



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu



mgr inż. Sławomir Kołodziejski

**KONCEPCJA INNOWACYJNEGO UKŁADU
DO FILTRACJI I MIKROFILTRACJI OLEJU
HYDRAULICZNEGO W POJAZDACH I MASZYNACH
BUDOWLANÝCH W ASPEKCIE ŚRODOWISKOWYM**

Praca doktorska

Promotor:
dr hab. inż. Wojciech SAWCZUK, prof. PP

Promotor pomocniczy:
dr hab. inż. Jakub KOWALCZYK

Poznań, 2026

SPIS TREŚCI

Streszczenie	5
Summary	6
Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli	7
WPROWADZENIE	9
1. SEPARACJA CIECZY	12
1.1. Separacja membranowa	12
1.2. Techniki filtracyjne	16
1.3. Rodzaje membran filtracyjnych	19
1.4. Przykłady zastosowań filtracji cieczy	26
1.5. Podsumowanie separacji membranowej cieczy	32
2. MIKROFILTRACJA OLEJÓW PRZEMYSŁOWYCH	33
2.1. Wymagania normatywne dla olejów przemysłowych	33
2.2. Zanieczyszczenie olejów	38
2.3. Mikrofiltracja oleju hydraulicznego	40
2.4. Wpływ zanieczyszczeń na zużycie układu hydraulicznego	45
2.5. Wilgotność oleju hydraulicznego	48
2.6. Podsumowanie problematyki mikrofiltracji oleju hydraulicznego	52
3. PROBLEMATYKA NAUKOWO-BADAWCZA PRACY DOKTORSKIEJ	54
3.1. Przesłanki naukowo-badawcze własnej problematyki	54
3.2. Teza i cel pracy	56
3.3. Zadania niezbędne do osiągnięcia celu pracy	58
4. BADANIA NOWEGO OLEJU NA KLASĘ CZYSTOŚCI I WILGOTNOŚĆ	60
4.1. Cel badań olejowych	60
4.2. Obiekt badań na klasę czystości i wilgotność oleju	60
4.3. Metodyka badań olejowych	62
4.3.1. Wyznaczenie minimalnej liczby pomiarów do oceny statystycznej	64
4.3.2. Wyniki badań olejowych na klasę czystości	71
4.3.3. Wyniki wilgotności względnej oleju hydraulicznego	72
4.4. Podsumowanie wyników badań na klasę czystości i wilgotność	75
5. BADANIA LEPKOŚCI I CZYSTOŚCI OLEJU HYDRAULICZNEGO	77
5.1. Cel badań lepkościowych	77
5.2. Metodyka badań lepkości oleju	77
5.2.1. Stanowisko do badań równoległych	78
5.2.2. Aparatura do badań lepkości kinematycznej	80
5.2.3. Wyniki badań lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego	84
5.2.4. Wyniki badań klasy czystości oleju hydraulicznego	88
5.3. Podsumowanie badań lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego	90
6. BADANIA ZUŻYCIA ZESPOŁÓW UKŁADU HYDRAULICZNEGO	92
6.1. Cel badań zużycia wybranych zespołów układu hydraulicznego	92
6.2. Metodyka badań zużycia rozdzielacza hydraulicznego	92
6.2.1. Aparatura do badań zużycia	93
6.2.2. Wyniki badań zużycia rozdzielacza hydraulicznego	95
6.3. Modelowanie badanych parametrów układu hydraulicznego	98
6.4. Podsumowanie badań zużycia układu hydraulicznego	103
7. KONCEPCJA DODATKOWEGO UKŁADU DO MIKROFILTRACJI	104
7.1. Wprowadzenie do koncepcji dodatkowej mikrofiltracji	104
7.1.1. Koncepcja I	107
7.1.2. Koncepcja II	108

7.2. Warunki brzegowe do realizacji koncepcji dodatkowej mikrofiltracji oleju	109
7.3. Budowa układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego.....	110
7.3.1. Układ MF 1 w ładowarce TEREX.....	111
7.3.2. Układ MF 2 w ładowarce MERLO.....	112
7.4. Badania oleju hydraulicznego w warunkach eksploatacyjnych.....	114
7.4.1. Cel badań eksploatacyjnych.....	114
7.4.2. Metodyka badań eksploatacyjnych.....	114
7.4.3. Wyniki badań eksploatacyjnych	117
7.5. Podsumowanie koncepcji dodatkowej mikrofiltracji.....	121
8. OCENA MIKROFILTRACJI OLEJU HYDRAULICZNEGO W	
 UJĘCIU ŚRODOWISKOWYM	123
8.1. Regulacje prawne dla odpadów olejowych.....	123
8.2. Recykling i opłaty za utylizację odpadów olejowych.....	126
8.3. Korzyści środowiskowe stosowania mikrofiltracji	129
8.4. Podsumowanie znaczenia mikrofiltracji w ujęciu środowiskowym	134
9. PODSUMOWANIE PRACY	136
9.1. Wnioski naukowe.....	136
9.2. Wnioski praktyczne.....	138
9.3. Propozycja kierunków dalszych badań	139
LITERATURA.....	140
ZAŁĄCZNIK A: Dokumentacja techniczna dodatkowego zewnętrznego układu	
do mikrofiltracji oleju hydraulicznego	149
ZAŁĄCZNIK B: Algorytm przeglądu dla instalacji hydraulicznej	
z dodatkowym układem filtrującym	156

Streszczenie

W niniejszej pracy doktorskiej podjęto problematykę zanieczyszczenia oleju hydraulicznego w maszynach drogowych i budowlanych. Są to specjalistyczne pojazdy wolnobieżne z napędem spalinowym zasilającym pracę układów hydraulicznych. Warunki pracy tych pojazdów oraz zmienność obciążenia sprawia, że oleje narażone są na przyspieszone zużycie i degradację, co również negatywnie przekłada się na stan techniczny zespołów układu hydraulicznego. Okresowa wymiana oleju zgodnie z dokumentacją techniczną maszyny budowlanej czy drogowej może okazać się niewystarczająca i przyczyni się do spadku wydajności, problemów ze sterowaniem lub awarii. Uszkodzenia układów hydraulicznych w około 70-90% przypadkach wynikają z zużycia ściernego spowodowanego przez zanieczyszczenia o różnej średnicy poruszające się razem z olejem w układzie. Ze względu na złożoność układów hydraulicznych z zaawansowanym sterowaniem przez np. serwozawory, wymusiło to na właściciela takich maszyn prowadzenie okresowej mikrofiltracji na przenośnych stanowiskach oraz badań olejowych między okresami planowanych wymian oleju dla utrzymania wymaganej kasy czystości oleju. Tego typu działania mają na celu utrzymanie ciągłej sprawności układów hydraulicznych i sprowadzenie do minimum przestoju maszyn z tytułu wystąpienia awarii.

Celem naukowym pracy doktorskiej jest wyznaczenie charakterystyk stanu oleju hydraulicznego rozumianych klasą czystości zgodnie z obecnymi normami, zawartości wody w oleju, zmiany lepkości oraz charakterystyk zużycia wybranych zespołów układu hydraulicznego pracującego z olejem hydraulicznym bez jak i z jednoczesną mikrofiltracją. Na podstawie sporządzonych charakterystyk opracowane zostaną modele do oceny stanu oleju hydraulicznego dla klasycznego układu hydraulicznego z podstawowymi filtrami jak i dla innowacyjnej instalacji z dodatkową bocznikową mikrofiltracją.

Celem użytkowym pracy jest opracowanie wytycznych dla dokumentacji technicznej budowy dodatkowych zewnętrznych układów do mikrofiltracji oleju oraz algorytmu przeglądowego dla maszyn i pojazdów budowlanych wyposażonych w instalacje do ciągłej filtracji oleju hydraulicznego.

Realizacja celów naukowych i użytkowych pozwoli na ocenę zbudowanych instalacji hydraulicznych na wybranych maszynach budowlanych ze względu na korzyści środowiskowe. Oszacowano korzyści związane z ilością generowanych odpadów olejowych, które później kierowane są do utylizacji oraz wydłużenia czasu użytkowania oleju do kolejnej wymiany przy zachowaniu parametrów oleju związanych z właściwościami smarnymi.

Summary

This doctoral dissertation addresses the issue of hydraulic oil contamination in road and construction machinery. These are specialized low-speed vehicles powered by internal combustion engines that supply energy to hydraulic systems. The operating conditions of these vehicles and the variability of loads because the oils to be exposed to accelerated wear and degradation, which also negatively affects the technical condition of hydraulic system components. Periodic oil replacement in accordance with the technical documentation of construction or road machinery may prove insufficient and may lead to reduced efficiency, control problems, or failures. Damage to hydraulic systems in approximately 70-90% of cases results, from abrasive wear caused by contaminants of various particle sizes moving with the oil within the system. Due to the complexity of hydraulic systems with advanced control elements such as servo valves, owners of such machinery are required to perform periodic microfiltration using portable units and conduct oil analyses between scheduled oil changes to maintain the required oil cleanliness class. These measures aim to ensure continuous operational reliability of hydraulic systems and minimize machine downtime resulting from failures.

The scientific objective of the dissertation is to determine the characteristics of hydraulic oil condition, understood in terms of cleanliness class according to current standards, water content in the oil, changes in viscosity, and wear characteristics of the main components of the hydraulic system operating both without and with simultaneous microfiltration. Based on the developed characteristics, models will be created to assess the condition of hydraulic oil for a conventional hydraulic system with basic filtration as well as for an innovative system with additional bypass microfiltration.

The practical objective of the study is to develop technical documentation for the construction of additional external oil microfiltration systems and maintenance and repair algorithms for construction machinery and vehicles equipped with continuous hydraulic oil filtration installations.

The implementation of the scientific and practical objectives will enable the evaluation of the constructed hydraulic installations on selected construction machines in terms of environmental benefits. These benefits include a reduction in the amount of waste oil generated and subsequently sent for disposal, as well as the extension of oil service life between changes while maintaining lubrication-related performance parameters.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli

C_w	–	rzeczywiste stężenie wody [ppm, mg/kg]
$C_{w,sat}$	–	zawartość wody przy nasyceniu 100% [ppm, mg/kg]
D	–	średnica wałka [m]
d_n	–	nominalna dokładność filtracji [μm]
e_f	–	skuteczność filtracji
H_L	–	wysokość profilu [μm],
I	–	intensywność zużycia
J_p	–	strumień oczyszczonej cieczy [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$],
l_e	–	luz efektywny [μm]
l_m	–	luz montażowy [μm]
L_p	–	przepuszczalność hydrauliczna [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{bar}^{-1}$]
n	–	współczynnik rodzaju filtracji
n_1	–	liczba cząstek przed filtrem
n_2	–	liczba cząstek za filtrem
p	–	nacisk jednostkowy [MPa]
p_m	–	czas pracy maszyny [mth]
R_a	–	średnia chropowatość 2D [μm]
RH	–	wilgotność względna [%]
R_M	–	opór hydrauliczny membrany
$R_{memb.}$	–	retencję oleju przez membranę [%]
R^2	–	współczynnik determinacji
T	–	temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
T_o	–	temperatura początkowa [$^{\circ}\text{C}$]
W	–	współczynnik zmienności [%]
W_{up}	–	absorpcja wody [%]
$\bar{x}$	–	średnia arytmetyczna

Litery greckie

β_x	–	współczynnik filtracji
$\beta_{k,s}$	–	współczynnik liniowej rozszerzalności korpusu lub suwaka hydraulicznego
γ_{SG}	–	napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe i gaz [J/m^2]
γ_{SL}	–	napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe i ciecz [J/m^2]
γ_{LG}	–	napięcie powierzchniowe na granicy faz cieczy i gazu [J/m^2]
Δl_c	–	przyrost luzu w wyniku oddziaływań ciśnienia [mm, μm]
Δl_T	–	przyrost luzu w wyniku rozszerzalności cieplnej [mm, μm]
Δv	–	błąd bezwzględny pomiaru lepkości kinematycznej [mm, μm]
ε	–	porowatość membrany filtracyjnej [%]
η	–	lepkość dynamiczna
θ_c	–	kąt zwilżenia [$^{\circ}$]
μ_w	–	lepkość wody [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]
ν	–	lepkość kinematyczna [mm^2/s]

Skróty

AFM	–	<i>atomic force microscope</i> – mikroskop sił atomowych
CBM	–	<i>condition based maintenance</i> – konserwacja oparta na stanie technicznym
CGS	–	<i>Centimeter Gram Second</i> – układ jednostek miar oparty na centymetrze, gramie i sekundzie
CVD	–	<i>chemical vapor deposition</i> – chemiczne osadzanie z fazy gazowej
DTR	–	dokumentacja techniczno-ruchowa
EC	–	<i>electrocoagulation</i> – elektrokoagulacja
EDX	–	<i>energy dispersive X-ray analysis</i> – analiza rentgenowska z dyspersją energii
EPS	–	<i>extracellular polymeric substances</i> – pozakomórkowe substancje polimeryczne
FTIR	–	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
IBC	–	<i>Intermediate Bulk Container</i> – pojemnik do transport materiałów masowych
KF	–	<i>Karl Fisher method</i> – metoda do badania wilgotności wg. Karla Fishera
LOA	–	<i>Liebherr Oil Analysis</i> – diagnostyka olejowa maszyn Liebherr
MD	–	<i>membrane distillation</i> – destylacja membranowa
MF	–	<i>microfiltration</i> – mikrofiltracja
MSP	–	<i>membrane separation process</i> – proces separacji membranowej
MTH	–	<i>machine hours</i> - motogodziny
NAS	–	<i>National Aerospace Standards</i> – Narodowy Standard Lotnictwa i Kosmonautyki
NF	–	<i>nanofiltration</i> – nanofiltracja
NTSB	–	<i>National Transportation Safety Board</i> – Narodowa Rada Bezpieczeństwa Transportu
OEMs	–	<i>original equipment manufacturers</i> – producenci oryginalnego sprzętu
PCB	–	polichlorowane bifenyle
PN-EN	–	Polska Norma wprowadzająca (metodą tłumaczenia) normę europejską
ppm	–	<i>parts per million</i> – części na milion
PPW	–	<i>petroleum produced water</i> – woda poprodukcyjna z ropy naftowej
PW	–	<i>produced water</i> – woda produkcyjna
RO	–	<i>reverse osmosis</i> – odwrócona osmoza
SEM	–	<i>scanning electron microscope</i> – skaningowy mikroskop elektronowy
SPE	–	<i>solid phase extraction</i> – ekstrakcja do fazy stałej
UF	–	<i>ultrafiltration</i> – ultrafiltracja
VG	–	<i>viscosity grade</i> – klasa lepkości

WPROWADZENIE

Układy hydrauliczne stanowią podstawę w zasilaniu współczesnych maszyn budowlanych, drogowych, rolniczych oraz urządzeń przemysłowych. Dzięki dużej gęstości mocy, precyzji sterowania oraz niezawodności umożliwiają realizację złożonych procesów roboczych w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Kluczowym medium roboczym tych układów jest olej hydrauliczny, który pełni jednocześnie funkcję przenoszenia energii, smarowania elementów ruchomych, chłodzenia oraz ochrony antykorozyjnej. Jakość i stan oleju w bezpośredni sposób determinują sprawność, trwałość oraz bezpieczeństwo pracy całego układu hydraulicznego. W praktyce eksploatacyjnej olej hydrauliczny narażony jest na stopniową degradację wynikającą z oddziaływań mechanicznych, termicznych i chemicznych. Szczególnie istotnym czynnikiem wpływającym na przyspieszone zużycie komponentów są zanieczyszczenia stałe oraz obecność wody w oleju. Cząstki metali powstające w wyniku tarcia, pył środowiskowy dostający się do układu przez nieszczelności czy niewłaściwe procedury serwisowe, a także produkty utleniania oleju tworzą mieszaninę prowadzącą do intensywnego zużycia ściernego pomp, zaworów, rozdzielaczy i siłowników hydraulicznych. Szczególnie niebezpiecznym zanieczyszczeniem jest woda, która może przedostawać się do oleju hydraulicznego na skutek kondensacji pary wodnej, nieszczelności wymienników ciepła, niewłaściwego magazynowania oleju lub błędów obsługowych. Obecność wody prowadzi do obniżenia właściwości smarnych oleju, przyspieszenia procesów korozyjnych oraz powstawania emulsji i osadów blokujących precyzyjne elementy sterujące.

W odpowiedzi na te ograniczenia, coraz bardziej popularne stają się technologie mikrofiltracji oleju hydraulicznego często realizowane, jako układy bocznikowe, umożliwiające skuteczne usuwanie zanieczyszczeń względem klasycznych filtrów olejowych. Technika mikrofiltracji sięga historycznie lat 70. kiedy miał miejsce konflikt izraelsko-arabski na Bliskim Wschodzie. Wówczas oddziały amerykańskie zgłaszały ze względu na klimat pustynny – problemy z pojazdami wojskowymi w zakresie smarowania układów hydraulicznych. Zaczęto wówczas montować dodatkowe filtry zewnętrzne do pojazdów wojskowych. Okres lat 80. sprawił, że technika weszła do użytku cywilnego w Stanach Zjednoczonych, a w latach 90. stała się już powszechna w Europie. W Polsce od około 10-20 lat zaczyna być dostrzegana przez firmy zajmujące się obsługą układów hydraulicznych zarówno w pojazdach budowlanych, rolniczych, sprzętu komunalnego oraz w przemysłowej hydraulice siłowej. Wiele firm zajmujących się serwisowaniem maszyn i urządzeń z układami hydraulicznymi jeszcze cały czas uznaje tylko okresową wymianę całego oleju zgodnie z zapisami Dokumentacji Techniczno-Ruchowej niezależnie od stanu oleju po przepracowaniu określonej liczby godzin. Należy jednak podkreślić, że w ten sposób wymienia się olej tylko ze zbiornika i częściowo z instalacji, a część zanieczyszczeń około 5% pozostaje na ściankach wewnętrznych układu hydraulicznego. Warunki pracy maszyn budowlanych są zróżnicowane i może się okazać, że okresowa wymiana oleju hydraulicznego nie będzie wystarczająca dla zachowania ciągłej sprawności instalacji hydraulicznej bez przyspieszonego zużycia elementów i zespołów hydraulicznych.

Awaryjne w układach hydraulicznych są efektem zanieczyszczenia oleju hydraulicznego, co przyspiesza zużycie ściernie. Woda w oleju hydrauliczny obniża lepkość, zmniejsza smarowność i prowadzi do korozji oraz powstawania szlamu w układzie, co również przyspiesza zużycie układu. W historii urządzeń, maszyn czy pojazdów z instalacjami hydraulicznymi znane są wypadki jak i poważne incydenty awarii wynikające z obniżonego, a w konsekwencji utraty smarowania przez zanieczyszczenie oleju. Są również przypadki niewłaściwej obsługi i konserwacji układu smarowania. Takim przykładem jest raport opublikowany w Biuletynie Bezpieczeństwa i Higieny Pracy nr 15 w dniu 1 marca 2024 roku przez Department of Energy, Mines, Industry Regulation and Safety (DEMIRS) stanu

Australia Zachodnia [24]. Jest to odpowiednik polskiej Państwowej Inspekcji Pracy. W raporcie przedstawiono incydent, w którym zanieczyszczony olej hydrauliczny spowodował niekontrolowany ruch podnośnika koszowego i ograniczenie w funkcjach podnośnika, co stwarzało zagrożenie dla operatora. Na tej podstawie wydano wytyczne dla użytkowników i podmiotów zajmujących się utrzymaniem urządzeń hydraulicznych, aby zwracali uwagę na stan oleju. Obecne podejście do nadzoru tych urządzeń zwiększa ryzyko zanieczyszczenia oleju. W raporcie podano również przyczyny zanieczyszczenia oleju hydraulicznego jak otwarcie układu w wyniku np. nieszczelności, wlanie zanieczyszczonego oleju czy niewłaściwe przechowywanie oleju (otwarte zbiorniki, beczki z olejem). Jako zalecenia podano konieczność prowadzenia konserwacji przez wyspecjalizowane podmioty, prowadzenie konserwacji w czystym otoczeniu. Ponadto na bieżąco kontaktować się z dostawcami olejów czy urządzeń hydraulicznych w przypadku zmian w sposobie utrzymania, przechowywać produkty w suchych i wolnych od zanieczyszczeń pomieszczeniach oraz przed montażem urządzeń hydraulicznych np. przewodów sprawdzać czy w środku nie znajdują się zanieczyszczenia.

Inny przypadek został opisany w artykule opublikowany w Monthly Safety Scenario w sierpniu 2024 roku przez The Swedish Club (tj. w międzynarodowej organizacji ubezpieczeń morskich typu P&I Protection&Indemnity) z siedzibą w Szwecji [128]. W wyniku zanieczyszczenia oleju silnikowego wodą doszło do zatarcia tłoka w silniku okrętowym. Jest to przypadek, w którym zanieczyszczony olej nie był bezpośrednią przyczyną uszkodzenia silnika, a zaniedbania personelu zajmującego się użytkowaniem i obsługą silnika mimo sprawnie działającego systemu diagnostycznego wykrywania stanów awaryjnych. W pierwszym przypadku zadziałał alarm wysokiej temperatury oleju silnikowego, co personel poprawnie zareagował, wyłączył silnik i stwierdził przedostawanie się wody z układu chłodzenia do skrzyni korbowej. Po wymianie uszkodzonej głowicy nie spuszczone mieszaniny olejowo-wodnej i ponownie uruchomiono silnik i kontynuowano rejs. Dwa dni później ponownie uruchomił się alarm wysokiej temperatury, oględziny silnika po jego zatrzymaniu nie wykazały zastrzeżeń jak np. wzrost poziomu oleju i ponownie uruchomiono silnik, co po pewnym czasie doprowadziło do zatarcia jednego z cylindrów i łożyska korbowodu. Statek został odholowany do portu. Badania po tym incydencie wykazały, że na miesiąc przed wypłynięciem statku pobrano próbkę oleju, która nie została wysłana do badań laboratoryjnych, a posiadała zawartość wody na poziomie 0,17%.

Kolejnym przykładem jest zdarzenie na statku pasażerskim Ocean Navigator z dnia 18 października 2023 roku w porcie Ocean Gateway Terminal w Portland w stanie Maine. Nad ranem na statku doszło do awarii pomocniczego silnika diesla. Uszkodzenie miało charakter gwałtowny i doprowadziło do wyrzutu elementów silnika oraz do pożaru. Jedna osoba z załogi została poważnie ranna w wyniku wybuchu i ognia. Komisja powołana przez Narodową Radę Bezpieczeństwa Transportu USA *NTSB* stwierdziła, że główną przyczyną uszkodzenia był zanieczyszczony olej silnikowy. W oleju znajdowały się drobiny metalu i innych zanieczyszczeń, które przyspieszyły zużycie łożyska. Zwiększony luz na czopie korbowym spowodował rozerwanie bloku silnika, przez który wydostał się gorący olej wywołując pożar w maszynowni. Komisja *NTSB* w raporcie [76] podała, że do zanieczyszczenia oleju przyczyniło się zbyt rzadkie jego wymienianie. Załoga znacznie przekraczała zalecane przez producenta interwały wymiany oleju i filtrów. Zużyte filtry przestawały skutecznie zatrzymywać zanieczyszczenia, w efekcie brudny olej krążył w układzie, powodując stopniową degradację silnika. Straty materialne oszacowano na około 2,4 miliona dolarów.

W świetle powyższych zagadnień, problematyka wpływu zanieczyszczeń i wody w oleju hydraulicznym na trwałość i efektywność układów hydraulicznych nabiera szczególnego znaczenia i stanowi podstawę niniejszej pracy doktorskiej.

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów. W rozdziale I pracy na podstawie przeglądu literaturowego przedstawiono zagadnienia związane z separacją cieczy. Omówiono techniki filtracyjne, rodzaje membran filtracyjnych, przedstawiono zależności do podstawowych obliczeń strumienia oczyszczanej cieczy oraz omówiono kilka przykładów zastosowań.

Rozdział II pracy omówiono proces mikrofiltracji olejów przemysłowych. Dokonano przeglądu wymagań normatywnych, przedstawiono problematykę zanieczyszczenia olejów oraz jej wpływ na stan techniczny urządzeń hydraulicznych. W rozdziale przedstawiono przegląd obecnych technik filtracji olejowej wraz z możliwością badań oleju w warunkach eksploatacyjnych oraz poruszono zagadnienie związane z wilgotnością olejów przemysłowych.

W rozdziale III sformułowano własną problematykę badawczą, zapisano tezę, cele i zakres badawczy pracy oraz przedstawiono zadania badawcze umożliwiające osiągnięcie wyznaczonych celów. Cele pracy zostały podzielone na badawcze i użytkowe.

Rozdział IV pracy jest poświęcony badaniom olejowym na klasę czystości i wilgotność oleju zgodnie z obowiązującymi normami. W rozdziale omówiono stanowisko, które zostało przygotowane do badań równoległych oleju na dwóch instalacjach hydraulicznych. Pierwsza instalacja jest klasycznym układem z podstawowymi filtrami olejowymi, druga instalacja wyposażona jest w dodatkowy boczny układ do mikrofiltracji oleju wykonywanej w sposób ciągły. Badania poprzedzone zostały opracowaniem metodyki badań.

W rozdziale V przedstawiono badania lepkościowe oleju pochodzącego z pracy stanowiska badawczego opisanego w rozdziale IV. Olej który badany był na klasę czystości oraz wilgotność, w kolejnym etapie przeznaczony był do badań w celu wyznaczenia zmiany lepkości kinematycznej w funkcji czasu pracy instalacji bez oraz z mikrofiltracją oleju.

Rozdział VI pracy poświęcony jest badaniom wpływu układu hydraulicznego, klasycznego bez mikrofiltracji oraz innowacyjnego z dodatkową mikrofiltracją na zużycie wybranych zespołów układu hydraulicznego. Badania te również przeprowadzono na stanowisku badawczym opisanym w rozdziale IV gdzie po badaniach olejowych po demontażu dwóch układów hydraulicznych sprawdzono zużycie pochodzące do zanieczyszczeń występujących w obu instalacjach. W rozdziale również przedstawiono modelowanie niektórych parametrów układu hydraulicznego.

W rozdziale VII zaprezentowano dwie koncepcje wykonania dodatkowych zewnętrznych układów do mikrofiltracji oleju hydraulicznego. Określono warunki brzegowe niezbędne do zbudowania wspomnianych instalacji. W rozdziale przedstawiono dwa pojazdy z zainstalowanymi układami, przeprowadzono badania olejowe na klasę czystości i wilgotność oleju po przepracowaniu określonej liczby godzin.

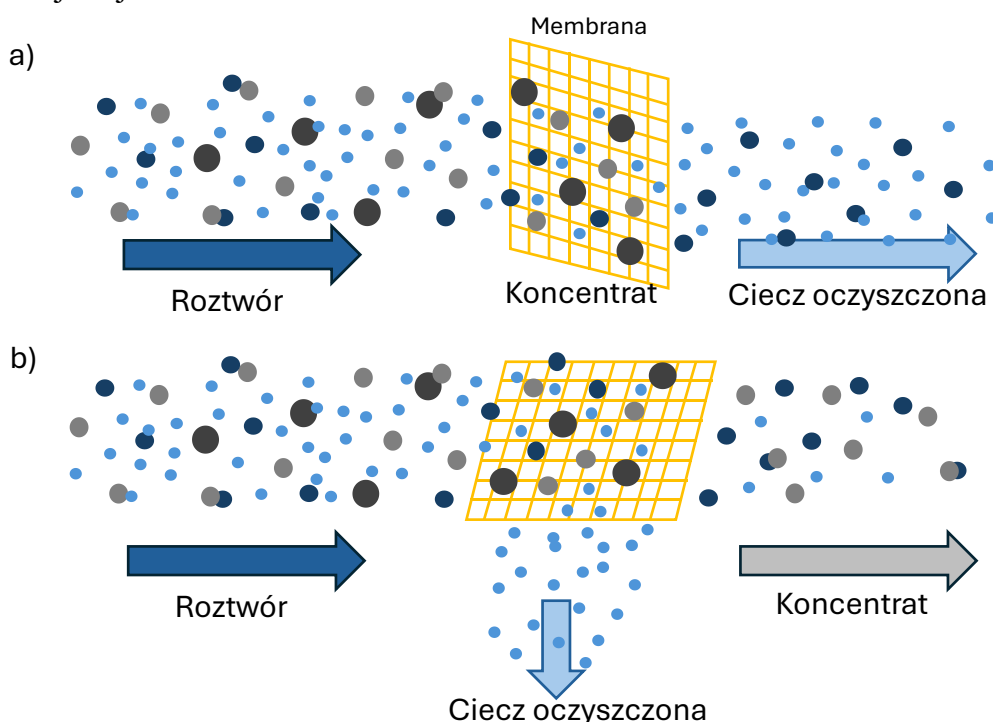
Rozdział VIII pracy zawiera ocenę zastosowania zewnętrznych układów do ciągłej mikrofiltracji oleju hydraulicznego w ujęciu środowiskowym. W rozdziale omówiono przepisy prawne regulujące zagadnienia postępowania z odpadami olejowymi, ich składowanie i utylizację. Na przykładzie podejścia do okresowej wymiany całego oleju zgodnie z zapisami dokumentacji techniczno-ruchowej maszyny lub pojazdu, oszacowano korzyści finansowe i środowiskowe stosowania mikrofiltracji oleju hydraulicznego. Na tej podstawie uzyskano potwierdzenie postawionych celów pracy i tezy badawczej.

W rozdziale IX podsumowano pracę, przedstawiono wnioski poznawcze i praktyczne oraz kierunki dalszych badań w zakresie rozwoju technik filtracji oleju hydraulicznego w zastosowaniach maszyn i pojazdów budowlanych i drogowych.

1. SEPARACJA CIECZY

1.1. Separacja membranowa

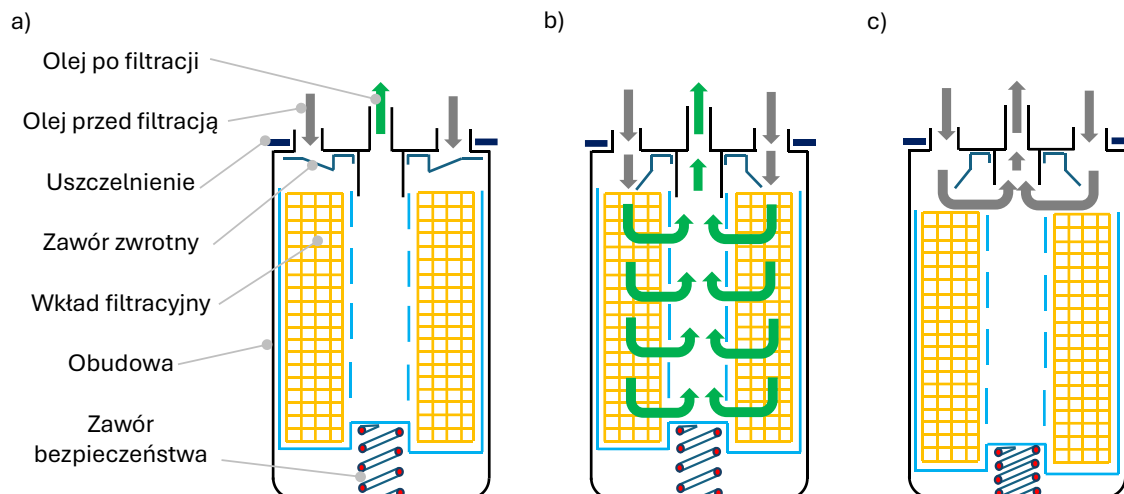
Proces separacji membranowej (*MSP*) to operacja oddzielenia mieszanin. W tym procesie membrana działa jak filtr, tworząc przepuszczalną lub półprzepuszczalną barierę, która częściowo lub całkowicie ogranicza przepływ niektórych składników w strumieniu cieczy. Płyn przepływający przez membranę napędzany jest różnicą ciśnień. W tym procesie roztwór rozdzielany jest na koncentrat pozostający na membranie oraz na ciecz oczyszczoną (z ang. permeate). Koncentrat zawiera składniki (zanieczyszczenia) z cząstkami większymi niż pory membrany, a strumień cieczy za membraną posiada składniki mniejsze niż rozmiar porów membrany. Na rysunku 1.1 przedstawiono schemat separacji membranowej z przepływem prostopadłym do powierzchni membrany (rys. 1.1a) oraz równoległym przepływem roztworu do membrany tj. przepływem stycznym (rys. 1.1b). Obecnie ten drugi rodzaj separacji nazywany również, jako krzyżowy jest stosowany w technice filtracyjnej, ze względu na spowolnienie procesu zatykania porów membrany, niż ma to miejsce podczas prostopadłej separacji olejowej.



Rys. 1.1. Idea separacji membranowej, a) prostopadłej, b) stycznej (krzyżowej) [20]

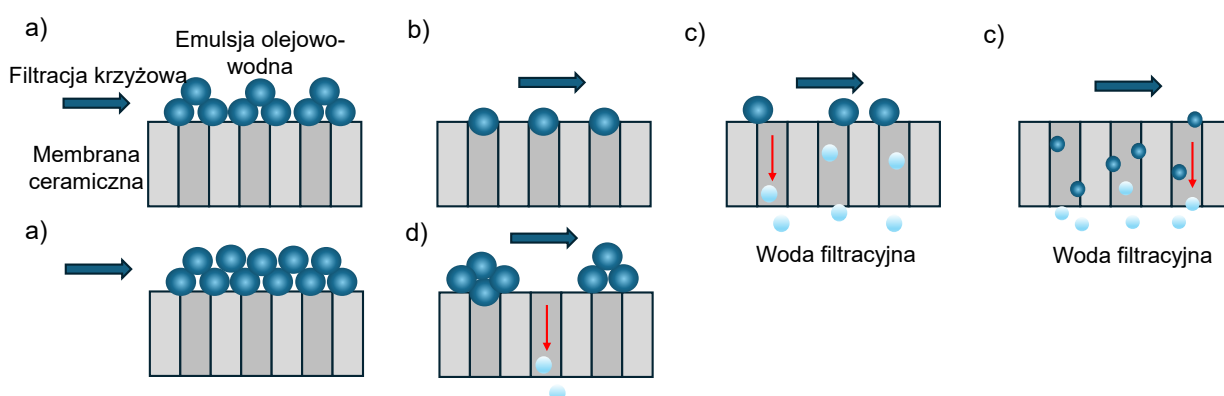
Badania opisane w pracach [31, 33] wykazały, że filtracja krzyżowa jest skuteczniejsza od przepływu prostopadłego ze względu na szybkie zatykanie porów membrany i spadek wydajności filtracji. Wymuszało to częste czyszczenie i płukanie membran filtracyjnych. Przykładem filtracji prostopadłej jest filtr olejowy w silniku spalinowym, w którym zastosowane są dwa zawory. Pierwszy zawór przelewowy znajdujący się na górze filtra, co przedstawia rysunek 1.2a) zapobiega cofaniu się oleju do pompy i miski olejowej. Drugi zawór bezpieczeństwa znajdujący się na dole filtra ma na celu otwarcie przepływu oleju z pominięciem wkładu filtracyjnego. Na rysunku 1.2b) przedstawiono pracę filtra olejowego przy ciśnieniu nominalnym oraz przy wyższym ciśnieniu (rys. 1.2c) z pominięciem wkładu filtracyjnego. Taka sytuacja tj. otwarcie zaworu bezpieczeństwa (nazywanego również zaworem obejściowym) występuje przy dławieniu oleju przez filtr przy wyższej prędkości

obrotowej silnika, kiedy wzrasta zapotrzebowanie na olej w układzie oraz kiedy zapchany jest wkład filtracyjny. Wówczas dla zachowania ciągłości przepływu oleju smarującego następuje częściowe lub całkowite otwarcie zaworu obejściowego. Należy zaznaczyć, że w krzyżowej separacji olejowej jest niedopuszczalne zastosowanie wspomnianego zaworu np. w przypadku zanieczyszczenia membrany (wkładu filtracyjnego) gdyż do układu dostanie się olej zanieczyszczony.



Rys. 1.2. Filtr olejowy w separacji prostopadłej, a) budowa filtra, b) praca filtra przy ciśnieniu nominalnym, c) praca filtra z otwartym zaworem obejściowym przy wzroście ciśnienia i zanieczyszczonej membranie [137]

Zanieczyszczenie membrany filtracyjnej podczas separacji krzyżowej jest bezpośrednim efektem spadku przepływu strumienia cieczy filtrowanej. Mechanizm ten przebiega w takiej kolejności, że cząstki zanieczyszczenia w pierwszej kolejności zatykają wewnętrzne pory membrany (jest to pośrednie blokowanie porów przez około 10 minut), co następnie blokuje wejście do szczelin membrany [75]. Następnie rozpoczyna się odkładanie koncentratu tzw. ciasta filtracyjnego na membranie. Modele zanieczyszczenia membran filtracyjnych wg. Hermia przedstawiono na rysunku 1.3. Pośrednie blokowanie porów membrany (rys. 1.3c) jest według [33] najlepszym przypadkiem gdyż występuje liniowa zależność strumienia czystej (przefiltrowanej) wody od stężenia emulsji oleju w wodzie wyrażonej w mg/l.



Rys. 1.3. Modele zanieczyszczenia membran filtracyjnych wg. Hermia, a) ciasto filtracyjne, b) całkowite zablokowanie porów, c) pośrednie zablokowanie porów, d) standardowe blokowanie porów [33, 75]

Należy zaznaczyć, że w modelu pośredniego blokowania porów, membranę filtracyjną można skutecznie oczyścić poprzez płukanie z zanieczyszczeń na jej powierzchni. W wielu procesach separacji membranowej płukanie wodą w kierunku przeciwnym regeneruje membranę. Jednak w niektórych zastosowaniach oraz w przypadku membran polimerowych regeneracja jest niemożliwa i membranę należy utylizować [132]. Innymi sposobami

regeneracji membran filtracyjnych jest czyszczenie środkami chemicznymi lub płukaniem kwasem. Jednak płukanie wodą i wymiana membrany to najczęstsze sposoby czyszczenia bez użycia środków chemicznych trudnych w późniejszej utylizacji [36].

Membrany filtracyjne wymagają hydrofilizacji w celu zwiększania jej zdolności do przyciągania i wiązania cząsteczek wody oraz do zwiększenia odporności na zanieczyszczenia powierzchni membrany. Opisane wcześniej czyszczenie syntetycznymi środkami chemicznymi nie jest przyjazne dla środowiska naturalnego. W pracy [52] autorzy zaproponowali hydrofilację membran poprzez powlekanie ich związkami naturalnymi tj. pirogalolem *PG* i e-polilizyną *EPL*. Powłoka *PG/EPL* poprawiła własności hydrofilowe membran polimerowych PVDF bez deformacji struktury porów membrany. Membrana mikrofiltracyjna po powlekanii wykazała znaczącą odporność na zanieczyszczenia względem klasycznej membrany *PVDF*. Przepuszczalność wody wzrosła o około 22%, poprawiła się separacja oleju od wody, o 27% był wyższy wskaźnik odrzucenia oleju. Ze względu na korzyści dla środowiska naturalnego bez generowania odpadów chemicznych po czyszczeniu membran filtracyjnych, w przyszłości spodziewa się rozwoju technik hydrofilizacji poprzez powlekanie roztworami związków naturalnych membran filtracyjnych.

Procesy separacji membranowej klasyfikuje się według rozmiaru porów membrany i cząstek, które są w nich zatrzymywane oraz ciśnienia w układzie podczas filtracji, co zawarto w tabeli 1.1.

Tab. 1.1. Klasyfikacja membran według ich porowatości [20, 44, 131]

Lp.	Membrana	Średnica porów	Ciśnienie	Zatrzymywane cząstki
1	Mikrofiltracja (MF)	0,1 – 10 μm (10^{-7} – 10^{-5} m)	od 0,1 do 2 bary	Mikroorganizmy i cząsteczki w zawieszynie koloidalnej
2	Ultrafiltracja (UF)	1 – 100 nm (10^{-9} – 10^{-7} m)	od 1 do 7 barów	Białka, wirusy i rozpuszczone makrocząsteczki o dużej masie molowej
3	Nanofiltracja (NF)	0,5 – 1 nm ($5 \cdot 10^{-10}$ – 10^{-9} m)	od 5 do 25 barów	Rozpuszczone makrocząsteczki o średniej masie molowej oraz jony dwuwartościowe i wielowartościowe
4	Odwrócona Osmoza (RO)	0,1 – 0,5 nm (10^{-10} – $5 \cdot 10^{-10}$ m)	od 15 do 80 barów	Rozpuszczone makrocząsteczki o małej masie molowej, sole i jony jednowartościowe
5	Separacja gazu (GS)	< 0,1 nm (10^{-10} m)	od 60 do 80 barów	Filtracji gazów poprodukcyjnych, osadzenie cząstek aerozolowych na porowatej powierzchni filtra

W zależności od swoich właściwości i wielkości porów, membrany mogą usuwać z wody różne zanieczyszczenia: zawieszone cząstki stałe, rozpuszczone sole, koloidy, białka, mikroorganizmy, kwasy organiczne, oleje i smary [29].

W zastosowaniach przemysłowych głównym celem jest utrzymanie wysokiego strumienia oczyszczonego strumienia cieczy za membraną J_p , który do obliczeń wyznacza się z zależności (1.1).

$$J_p = \frac{V}{A \cdot t} \quad (1.1)$$

gdzie: V – objętość oczyszczonej cieczy [m^3],
 A – powierzchnia filtracyjna membrany [m^2],
 t – czas filtracji [s].

W ujęciu wagowym strumień przenikania cieczy za membraną J_w oblicza się z zależności (1.2) ze współczynnikiem o wartości 600 w celu wstawienia masy cieczy penetrującej membranę w gramach, powierzchni membrany w cm^2 i czasu filtracji w minutach [65].

$$J_w = \frac{600 \cdot W}{A_c \cdot t_m} \quad (1.2)$$

gdzie: W – masa cieczy przepływającej przez membranę [g],
 A_c – powierzchnia filtracyjna membrany [cm^2],
 t_m – czas filtracji [min].

Drugim ważnym parametrem stosowanym w separacji membranowej jest przepuszczalność hydrauliczna L_p , która służy do oceny zmienności strumienia oczyszczonej cieczy (tj. permeatu) będącego funkcją zastosowanego ciśnienia w układzie filtrującym. Zależność (1.3) umożliwia wyznaczenie przepuszczalności hydraulicznej.

$$L_p = \frac{J_p}{\Delta p} \quad (1.3)$$

gdzie: J_p – strumień oczyszczonej cieczy [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$],
 Δp – zmiana ciśnienia [bar].

Trzecim istotnym parametrem w ocenie filtracji jest opór hydrauliczny membrany R_M wyznaczany z zależności (1.4). Jest on wyznaczany, jako odwrotność przepuszczalności hydraulicznej i lepkości wody. W badaniach membran filtracyjnych przyjmuje się wartość lepkości wody wynoszącej $0,89 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ przy temperaturze wody 25°C , jednak należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem temperatury wody lepkość jej nieliniowo maleje [34].

$$R_M = \frac{1}{L_p \cdot \mu_w} \quad (1.4)$$

gdzie: μ_w – lepkość wody [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]

Kolejnym parametrem w ocenie separacji jest porowatość ε membran opisaną zależnością (1.5) [34].

$$\varepsilon = \left(\frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet} - W_{sub}} \right) \cdot 100 \% \quad (1.5)$$

gdzie: W_{wet} – masa membrany mokrej [kg],
 W_{dry} – masa membrany suchej [kg],
 W_{sub} – masa membrany zanurzonej [kg].

Porowatość membrany filtracyjnej ε w stosunku do innego parametru wykorzystywanego w badaniach jak absorpcja wody W_{up} przedstawiona w dalszej części rozdziału dodatkowo uwzględnia masę membrany zanurzonej w roztworze filtrowanym. Wymienione masy w równaniu (1.5) zgodnie z pracą [34] wyznaczone są zgodnie z prawem Archimedesesa.

W celu analizy mechanizmu osadzania się zanieczyszczeń na membranie wykorzystuje się równanie różniczkowe opisane zależnością (1.6) uwzględniające przepływ krzyżowy przez membranę zgodnie z pracą [28]. Następnie równanie to zostało zmodyfikowane przez w celu uwzględnienia kolejnych zmiennych wpływających na proces separacji membranowej i opisane zależnością (1.7).

$$-\frac{dJ_v}{dt} \cdot J_v^{n-2} = k \cdot J_v - J_{ss} \quad (1.6)$$

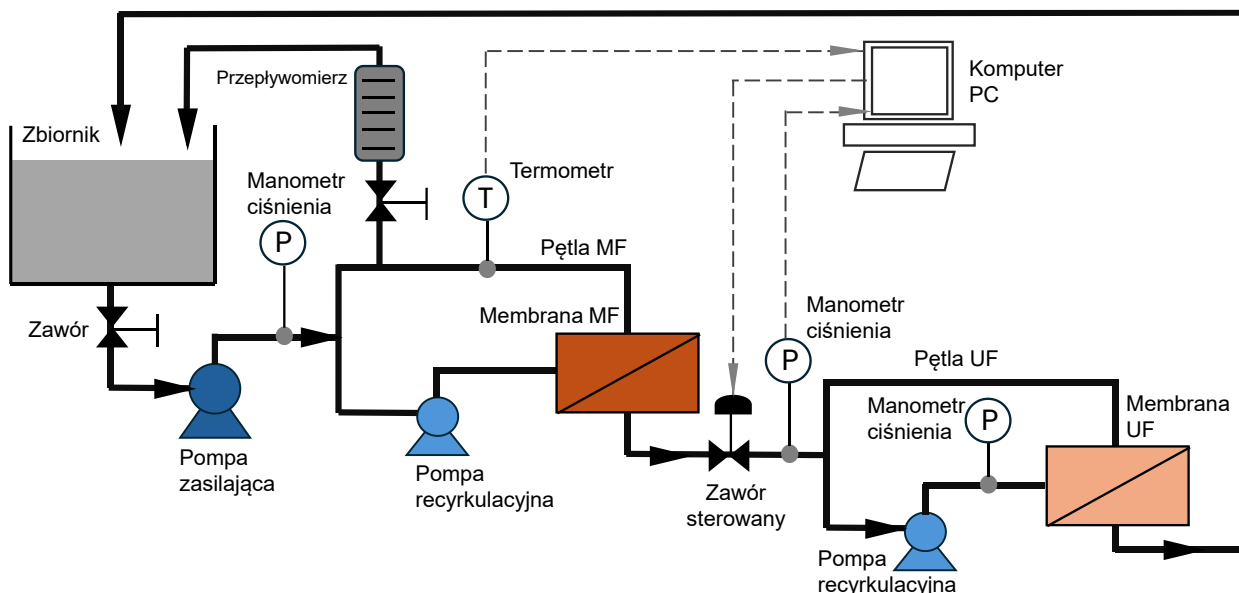
$$-\frac{1}{A^2 J_v^3} \cdot \frac{dJ_v}{dt} = k \left(\frac{1}{A J_v} \right)^n \quad (1.7)$$

gdzie: J_V – eksperymentalny strumień objętości [m^3/s],
 J_{SS} – strumień objętości dla stanu ustalonego [m^3/s],
 A – powierzchnia membrany (filtracji) [m^2],
 n – współczynnik rodzaju filtracji.

W równaniach (1.6) i (1.7) dla modelowania przepływu strumienia cieczy przez membranę zgodnie z pracą [34] największą trudność sprawia dobranie stałej k , jako współczynnika proporcjonalności. Dobór stałej k realizowane jest przy wykorzystaniu programów Matlab lub Scilab, aby obliczony strumień objętości odpowiadał strumieniowi z badań eksperymentalnych. Współczynnik n zależy od rozważanego modelu blokowania porów membrany i wynosi odpowiednio $n=0$ dla filtracji plackowej (z ciastem filtracyjnym), $n=1$ dla blokowania pośredniego, $n=1,5$ dla blokowania standardowego i $n=2$ dla blokowania całkowitego.

1.2. Techniki filtracyjne

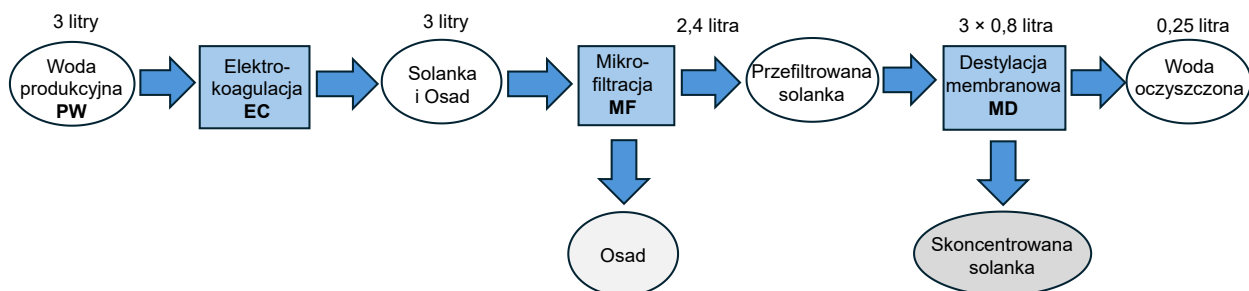
Z czasem membrana może stać się bardziej odporna na filtrację, zmniejszając strumień przepływu i wydajność separacji (mikrofiltracji). Wynika to z gromadzenia się cząstek stałych na powierzchni membrany lub w porach, co powoduje jej zatykanie. Pierwszym sposobem na poprawę filtracji membranowej w dłuższym okresie czasowym [10] jest zastosowanie szeregowego (kaskadowego) systemu filtracji, co przedstawia rysunek 1.4. W takim układzie membrana mikrofiltracyjna MF realizuje wstępne oczyszczenie, a membrana ultrafiltracyjna wykonuje dokładne czyszczenie. Wstępne oczyszczenie sprawia, że większe cząstki nie blokują kanałów membrany UF . Membrana wstępna MF nie blokuje i nie zmienia przepływu, w pracy [10] wykazano, że hybrydowy system MF/UF okazał się bardzo skuteczny zapewniając strumień oczyszczonego płynu poniżej dopuszczalnego limitu.



Rys. 1.4. Hybrydowy system filtracji MF/UF [10]

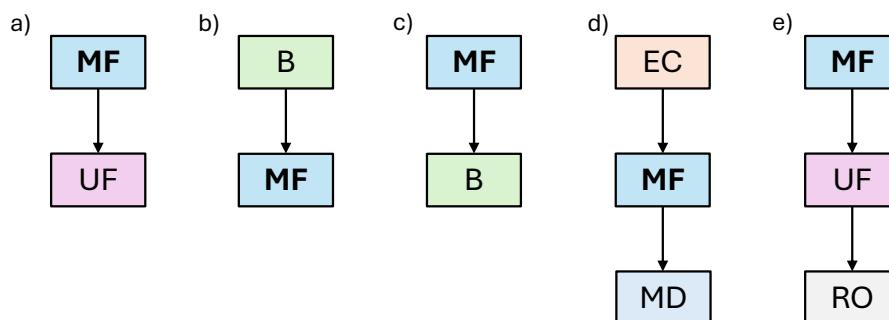
Drugim sposobem na zwiększenie przepływu przez membrany filtracyjne jest włączenie nanocząstek i modyfikacja powierzchni membrany. Doprowadziło to do opracowania membran zdolnych do wytrzymywania bardzo wysokich ciśnień [72]. Dla bardzo zanieczyszczonych ścieków zawierających rozpuszczone sole, związki organiczne polarne i niepolarne, oleje i środki powierzchniowo czynne stosuje się bardziej złożone niż hybrydowe systemy filtracji szeregowej filtracji MF i UF . W takim przypadku zgodnie

z pracą [46] wykorzystuje się łączony proces elektrokoagulacji *EC*, mikrofiltracji *MF* i destylacji membranowej *MD*. Elektrokoagulacja, a następnie mikrofiltracja jest wstępnym oczyszczeniem np. ścieku przed zasadniczą destylacją membranową. Schemat procesy filtracji *EC-MF-MD* przedstawiono na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Schemat złożonego systemu filtracji *EC-MF-MD* [46]

Elektrokoagulacja wody produkcyjnej prowadzi do flokulacji większości zanieczyszczeń (zawiesin stałych i nierozpuszczalnych związków organicznych) do osadu. Następnie oczyszczona przez *EC* woda produkcyjna poddana jest mikrofiltracji *MF* w celu oddzielenia solanki od osadu. Dla 3 litrów wody produkcyjnej zgodnie z [4] uzyskuje się około 0,6 l osadu i 2,4 l przefiltrowanej solanki. Na koniec prowadzona jest destylacja membranowa *MD* do odsalania solanki. W procesie destylacji *MD* oczyszcza się 0,8 litra wsadu, z którego odzyskuje się około 0,25 litra wody.



Rys. 1.6. Schematy hybrydowych separacji olejowych z zastosowaniem mikrofiltracji *MF*: a) mikrofiltracja z ultrafiltracją *UF*, b) oczyszczanie biologiczne *B* z mikrofiltracją, c) mikrofiltracja z oczyszczaniem biologicznym, d) elektrokoagulacja z *MF* i destylacją membranową *MD*, e) *MF* z *UF* i odwróconą osmozą *RO*

W badaniach autorów pracy [85] do oczyszczania wody produkcyjnej ze złożeń ropy naftowej zbadano kilka hybrydowych systemów mikrofiltracji, które odniesiono do klasycznej mikrofiltracji *MF* z użyciem rurowej membrany ceramicznej wykonanej z kaolinu i kwarcu. System hybrydowy (rysunek 1.6b) i 1.6c) uwzględniał proces oczyszczania biologicznego *B* wody produkcyjnej z wykorzystaniem bakterii oleistej *Rhodococcus opacus*. System hybrydowej mikrofiltracji w pierwszym przypadku poprzedzony był z oczyszczaniem biologicznym, jako *B-MF*, natomiast w drugim przypadku po mikrofiltracji w układzie *MF-B*. Badania w celu sprawdzenia skuteczności hybrydowych systemów filtracyjnych przeprowadzono dla zakresu ciśnień od 69 do 345 kPa. Badania autorów pracy [85] wykazały, że kombinowany system *MF-B* był najskuteczniejszym (wynoszącym 99,6%) procesem oczyszczenia wody produkcyjnej z emulsji *W/O* (wodno-olejowej) od systemu hybrydowego, *B-MF*, którego skuteczność wyniosła 85%. Dla porównania skuteczność pojedynczej, mikrofiltracji wykazała w tych badaniach skuteczność na poziomie 80%, a oczyszczenie biologiczne wyniosło 65%. Ponadto w tych badaniach wykazano, że wzrost ciśnienia filtracji nie przełożył się na wzrost wydajności separacji olejowej, gdyż przy wyższym ciśnieniu

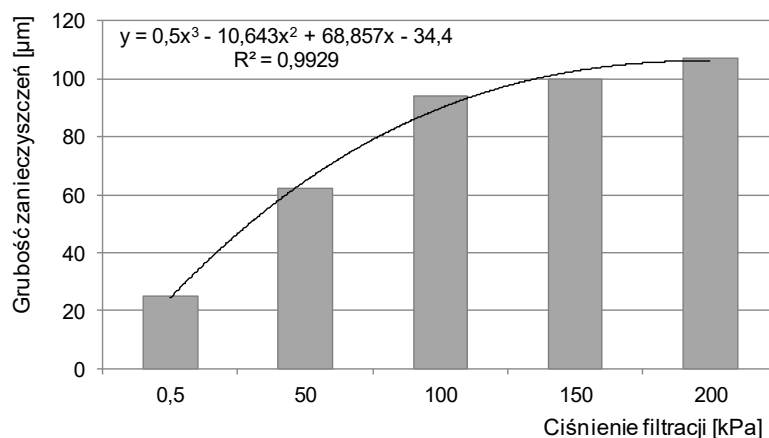
filtracji spadała skuteczność w odrzuceniu (zatrzymaniu) zanieczyszczeń na membranie filtracyjnej. Jedynie wzrost ciśnienia filtracji nie wpływał na mętność zawiesiny. Na tej podstawie wyciągnięto wniosek, że ciśnienie podczas separacji olejowej należy określić doświadczalnie. Przykłady obecnie stosowanych hybrydowych separacji olejowych przedstawiono na rysunku 1.6.

W przypadku odwadniania (zbioru) mikroalg, ze względu na jej rozkład komórek od 2 do 7 μm stosuje się złożony system filtracji składający ze wstępnej zanurzeniowej filtracji membranowej poprzez mikrofiltrację *MF*, następnie ultrafiltracji *UF* i odwróconą osmozę *RO* (rys. 1.6e). Ten proces dodatkowo prowadzony jest przy wyższym ciśnieniu w zakresie 0,5-200 kPa. Zgodnie z pracą [69] wyższe ciśnienie definiuje mikrofiltrację, jako dynamiczną w przeciwieństwie do krzyżowej. Wzrost ciśnienia w układach filtracyjnych zwiększa strumień filtratu, w tabeli 1.2 przedstawiono wyniki autorów [132] w zakresie wpływu ciśnienia filtratu na grubość warstwy zanieczyszczeń osadzonych na membranie (tzw. ciasta filtracyjnego).

Tab. 1.2. Grubość zanieczyszczeń (ciasta filtracyjnego) na membranie przy zmiennym ciśnieniu filtratu [132]

Ciśnienie filtracji w [kPa]	Grubość czystej membrany d_0 w [μm]	Grubość zanieczyszczeń d_1 na membranie w [μm]	d_1/d_0 w [%]
0,5	280	25	8,9
50	280	62	22,4
100	280	94	33,9
150	280	100	35,7
200	280	107	38,4

Dane zawarte w tabeli 1.2 autorów pracy [132] wykorzystano do wyznaczenia zależności ciśnienia filtracji do grubości warstwy zanieczyszczeń, co przedstawia zależność 1.7 w celu sprawdzenia charakteru zmian oraz funkcji opisującej tą zależność.



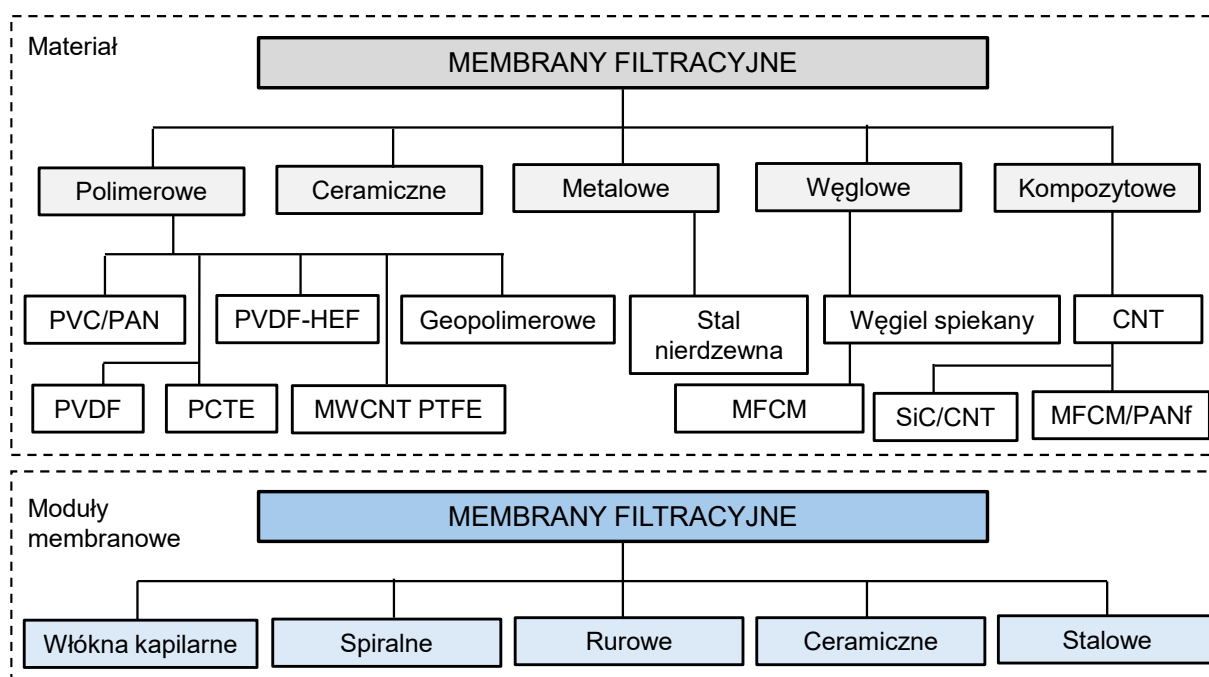
Rys. 1.7. Zależność ciśnienia filtracji od grubości zanieczyszczeń zatrzymywanych na membranie w oparciu o dane z tabeli 1.2 w pracy [132]

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 1.7 stwierdzono, że proporcjonalny wzrost ciśnienia filtracji nie wpływa na liniowy przyrost warstwy zanieczyszczeń zatrzymywanych przez membranę filtracyjną, co sugeruje silniejszą interakcję między cząsteczkami mikroalg a powierzchnią membrany. Jest to zmiana nieliniowa (wielomianowa), która została stwierdzona oceną dopasowania wielu funkcji aproksymujących do danych na podstawie współczynnik determinacji R^2 . Autorzy pracy [132] próbują wyjaśnić to faktem, że nieregularne i duże pory na powierzchni membrany sprawiają, że komórki mikroalg mogą łatwo wnikać do membrany i blokować wewnętrzne ścieżki porów. To powoduje zmniejszenie strumienia filtratu. Autorzy wykazali, że koagulant Fe^{3+} może być stosowany do zwiększania rozmiaru cząstek mikroalg przed filtracją, co skutkuje znacznie większym

strumieniem filtratu w porównaniu z nieskoagulowanymi zawiesinami. Wynik ten daje możliwość zredukowania zanieczyszczenia membrany do pomijalnego poziomu. Ten proces może skutecznie łagodzić zanieczyszczenie membrany i sprawić, że cząstki mikroalg zachowują się sztywniej podczas filtracji pod niskim ciśnieniem. W tych badaniach stwierdzono, że membrany ultrafiltracyjne wykorzystujące małe rozmiary porów (0,1–0,2 μm) dawały klarowny filtrat, podczas gdy większe ($>0,5 \mu\text{m}$) rozmiary porów membrany mikrofiltracyjne dawały mętny filtrat [14].

1.3. Rodzaje membran filtracyjnych

Membrany mogą być produkowane z materiałów polimerowych, ceramicznych, metalowych lub jako węglowe. Membrany polimerowe są szeroko stosowane w przemyśle, wykonane są z takich materiałów jak poliamid, octan celulozy i trioctan celulozy [89]. Membrana ta składa się z materiału polimerowego, którego łańcuchy przy ciśnieniu atmosferycznym są rozluźnione, a zastosowanie ciśnienia sprzyja zagęszczeniu łańcuchów polimerowych [20]. Membrany węglowe wykonuje się z węgla spiekane, natomiast membrany ceramiczne wytwarza się, jako wielokanałowe rurowe. Membrana polimerowa wykonana jest najczęściej z kopolimeru polichlorku winylu i poliakrylonitrylu (*PVC/PAN*). Na rysunku 1.8 przedstawiono schematyczny podział membran ze względu na materiał i konfigurację modułów membranowych [102].



Rys. 1.8. Podział membran filtracyjnych ze względu na materiał i konfigurację [102]

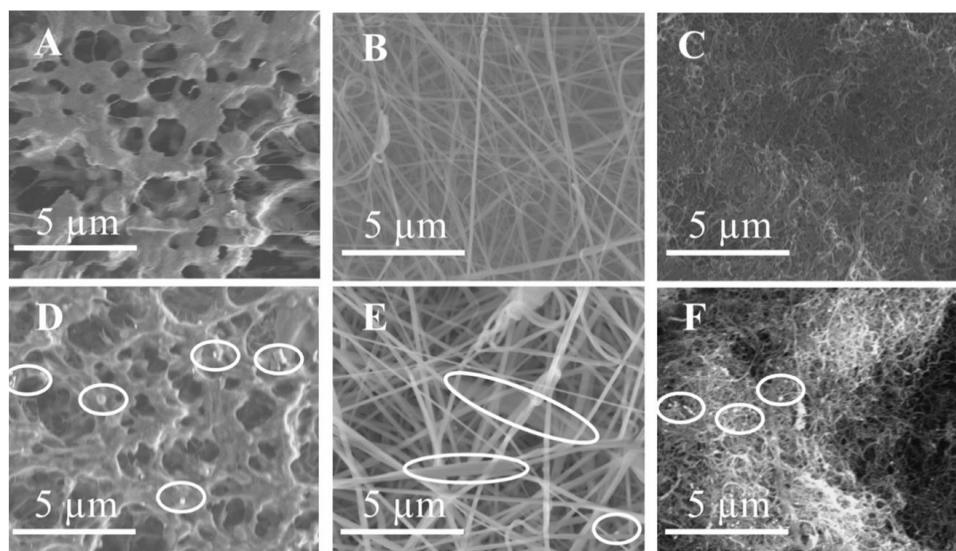
Porównanie membran węglowych względem ceramicznych zawarto w tabeli 1.3.

Tab. 1.3. Charakterystyka membran węglowych i ceramicznych [10]

Lp.	Parametr membrany	Węglowa	Ceramiczna
1	Konfiguracja membrany	Rurowa	Rurowa
2	Liczba kanałów	pojedynczy kanał	8 lub 39 kanałów
3	Średnica wewnętrzna	6 mm	2,5 i 6 mm
4	Średnica zewnętrzna	8 mm	25 mm
5	Powierzchnia membrany	0,022 m ²	0,2 i 0,5 m ²
6	Rozmiar porów	0,05 0,1 0,2 0,5 0,8 i 1,4 μm	0,07 0,8 i 1,4 μm

Analizując parametry membran przedstawione w tabeli 1.3 obserwuje się, że obie membrany (węglowa i ceramiczna) występują w konfiguracji rurowej. Membrany polimerowe wykonane są, jako włókno puste. Membrany węglowe cechuje budowa jednokanałowa ze zmniejszoną powierzchnią do mikrofiltracji, w przypadku membran ceramicznych występują one, jako wielokanałowe o znacznie większej powierzchni do filtracji (10-krotnie większa względem membrany węglowej). W obu przypadkach membrany występują te same rozmiary porów, tj. średnic (w zakresie 0,1 do 1,4 μm), tylko membrana węglowa może występować ze średnicami wynoszącymi nawet 0,05 μm . Badania opisane w [10] dowiodły, że w zakresie wstępnej mikrofiltracji *MF* membrana węglowa jednokanałowa wykazała większą skuteczność niż wielokanałowa membrana ceramiczna. W systemach hybrydowego płukania najlepszą wydajność uzyskuje się na węglowej membranie mikrofiltracyjnej wstępnej o średnicy porów 1,4 μm i dokładnej membranie *UF* (ultrafiltracyjnej) o średnicy kanałów 0,07 μm .

Opierając się na badaniach autorów w pracy [34] membrany ceramiczne są wykonane z takich materiałów jak tlenek glinu, tlenek cyrkonu, krzemionka i tlenek tytanu. Jednak cena tych surowców jest wysoka, co skłoniło badaczy do zbadania innych rodzajów surowców, takich jak glina, kaolin, dolomit, proszek apatytu i czerwona glina. Badacze zastosowali membranę ceramiczną zmieszaną z pięciotlenkiem niobu Nb_2O_5 i dwutlenkiem tytanu TiO_2 w celu poprawy właściwości filtracyjnych. Pięciotlenek niobu powoduje niższe opory hydrauliczne i generującym wyższe początkowe strumienie permeatu, co poprawia wydajność membrany w przeciwieństwie do dodatku dwutlenku tytanu. Ponadto pięciotlenek niobu zapewnia wyższą porowatość i większą średnicę porów, co poprawia przepuszczalności. Z drugiej strony, membrany na bazie dwutlenku tytanu charakteryzują się niższą przepuszczalnością i gorszą wydajnością ze względu na gęstszą strukturę, ale wyższą wytrzymałością mechaniczną i niższą porowatością przepuszczalnością hydrauliczną.



Rys. 1.9. Obrazy SEM przed destylacją membranową powierzchni membrany: a) *PVDF*, b) *PVDF-HFP*, c) *MWCNT PTFE* oraz po destylacji membranowej membran d) *PVDF*, e) *PVDF-HFP*, f) *MWCNT PTFE* [46]

Badania autorów pracy [33] doprowadziły do powstania nowej kompozytowej dwuwarstwowej z warstwą wiskerową (whisker layer) membrany ceramicznej o strukturze gradientowej z tlenku glinu. Membrana o średnicy porów wynoszących 120 nm wykazała dobre właściwości mechaniczne, wysoki strumień przepływu czystej wody tj. 4250 $\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1})$. W przypadku emulsji olejowo-wodnej o stężeniu 500 i 1000 mg/l uzyskano strumień przepuszczalności hydraulicznej wynoszący 901 i 547 $\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1})$, co pozwoliło uzyskać skuteczność usunięcia oleju ponad 99%. Nawet po 10 cyklach filtracji, strumień przepływu

wody dla membrany był stały i wyniósł $415 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1})$ dla emulsji *O/W* o stężeniu 1000 mg/l. Takie działania autorów pracy [33] miało na celu obniżenie ceny komercyjnych membran ceramicznych.

W pracy [46] oceniono trzy różne membrany do *MF* i *MD* wstępującej w złożonym procesie filtracyjnym *EC-MF-MD*. Przebadano komercyjnie dostępną membranę z polifluorku winylidenu (*PVDF*), membranę modyfikowaną kopolimerem wykonanej w technice elektroprzędzenia składającą się z poli(fluorku winylidenu-ko-heksafluoropropylenu) *PVDF-HFP* i membrany z wielościennych nanorurek węglowych *MWCNT* powlekanych politetrafluoroetylenem tj. teflonem (*PTFE*). Autorzy pracy dokonali próby porównania skuteczności filtracji wymienionych trzech typów membran polimerowych. Na rysunku 1.9 przedstawiono obraz SEM ze skaningowego mikroskopu elektronowego membran przed jak i po destylacji membranowej. Białym okręgiem na rysunkach 1.9d), e) i f) przedstawiono zatrzymane cząstki w wyniku filtracji. Autorzy przeprowadzili szereg kolejnych obserwacji na mikroskopie sił atomowych *AFM* oraz analizy rentgenowskie z dyssypacją energii *EDX* membran polimerowych. Wszystkie przebadane typy membran w procesie destylacji membranowej wykazały podobne i porównywalne właściwości w zakresie filtrowania solanki. Natomiast badania autorów [46] w zakresie skuteczności i czasu na odseparowanie czystej wody z przefiltrowanej w wyniku mikrofiltracji solanki wykazały nieznaczną wyższość membrany *PVDF* nad membranami *PVDF-HEP* i *MWCNT PTFE*, co przedstawiono w tabeli 1.4.

Tab. 1.4. Porównanie wyników badań wydajności membran polimerowych [46]

Membrana	Odfiltrowana woda przy I filtracji [ml]	Odfiltrowana woda przy II filtracji [ml]	Odfiltrowana woda przy III filtracji [ml]	Odfiltrowana woda przy IV filtracji [ml]	Całkowicie odfiltrowana wody [ml]
PVDF	131	121	–	–	252
PVDF-HFP	87	59	56	50	252
MWCNT PTFE	186	17	–	–	203

Analizując dane zawarte z badania trzech membran polimerowych stwierdzono, że zarówno membrana *PVDF* jak i membrana *MWCNT PTFE* odfiltrowuje najwięcej czystej wody już podczas pierwszej filtracji w procesie destylacji membranowej (131 i 186 ml z 800 ml solanki) W przypadku membrany polifluorku winylidenu *PVDF* odfiltrowano 252 ml czystej wody w dwóch filtracjach. Stosując membranę z wielościennych nanorurek węglowych (*MWCNT*) powlekanych teflonem odfiltrowano 203 ml czystej wody z 800 ml solanki w dwóch filtracjach.

Należy podkreślić zgodnie z pracą [131], że membrany polimerowe są grupą membran o największym zastosowaniu. Fluorek poliwinylidenu jest polimerem szeroko stosowanym w produkcji membran mikrofiltracyjnych, ultrafiltracyjnych i nanofiltracyjnych, ponieważ *PVDF* ma dobrą stabilność termiczną i mechaniczną oraz odporność chemiczną. Wielkość porów tych membran ma średnicę $0,22 \mu\text{m}$. Jednak główną wadą jest szybka tendencja do ich zanieczyszczenia, co zmniejsza przepływ przez membranę. Dotyczy to cieczy zanieczyszczonych olejem. W celu eliminacji tej wady membran polimerowych, dokonuje się modyfikacji powierzchni membrany z polifluorku winylidenu (*PVDF*) poprzez dodanie warstwy z polidopaminy (*PDA*) techniką elektroprzędzenia. Następnie na membranie wytworzono warstwę poliwinylpirolidonu-ko-polimetakrylanu metylu (*PVP-co-PMMA*) również metodą elektroprzędzenia. Po tych modyfikacjach membrana wykazał cechy hydrofilowe (przyciąganie wody) co wpłynęło na wyższy przepływ czystej wody i redukcję zanieczyszczeń podczas filtracji emulsji, w porównaniu z komercyjną mikrofiltracyjną membraną *PVDF*, która wykazuje hydrofobową naturę [131]. Membrany poliwęglowe wykorzystywane są w oczyszczaniu emulsji ropy naftowej z wody morskiej, olejów i innych

zanieczyszczeń [64]. W badaniach porównawczych membran z modyfikacją powierzchni (np. w przypadku membran polimerowych) lub w badaniach skuteczności membran wykonanych z różnych materiałów stosuje się dwie wielkości, tj. absorpcję wody W_{up} i retencję oleju przez membranę $R_{membrane}$ opisane zależnościami (1.8) i (1.9).

$$W_{up} = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \cdot 100 \% \quad (1.8)$$

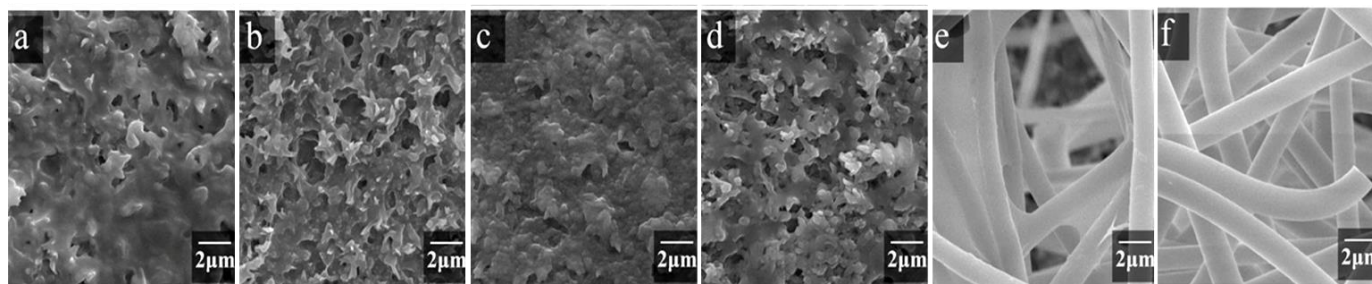
gdzie: W_{wet} – masa membrany po moczeniu w wodzie [kg],
 W_{dry} – masa membrany przed moczeniem w wodzie [kg].

$$R_{membrane} = 1 - \frac{P_{oc}}{F_{oc}} \cdot 100 \% \quad (1.9)$$

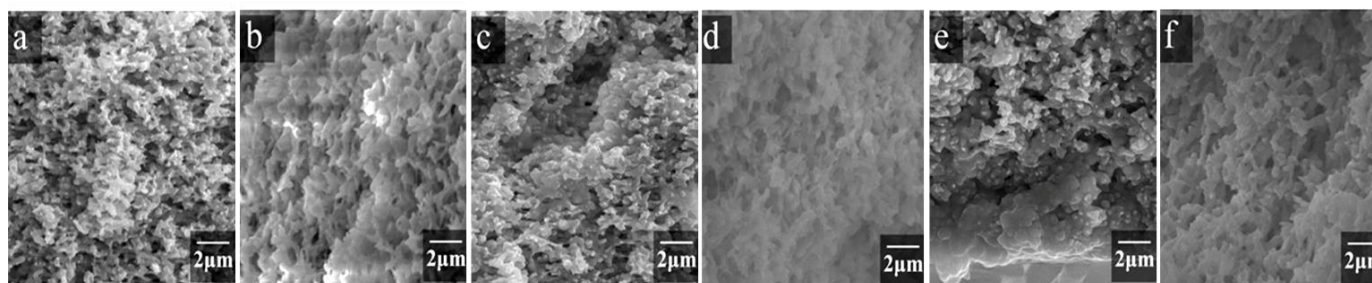
gdzie: P_{oc} – stężenie oleju w roztworze permeatu,
 F_{oc} – stężenie oleju w emulsji zasilającej.

Absorpcję wody zgodnie z zależnością (1.8) wyznacza się po moczeniu membran przez 24 godziny w wodzie. Obie zależności jako miary względne wyrażone są w % wykorzystuje się powszechnie w badaniach porównawczych i ocenie skuteczności różnych membran filtracyjnych.

Na rysunkach 1.10 oraz 1.11 przedstawiono widok powierzchni membran oraz przekrój poprzeczny membran zaobserwowany z elektronowego mikroskopu skaningowego. Na rysunkach zaprezentowano widoki trzech polimerowych membran, tj. standardowej *PVDF*, *PVDF* ze zmodyfikowaną *PDA* oraz ze zmodyfikowaną powierzchnią w wyniku elektroprzędzenia – *PVP-co-PMMA*. Wszystkie membrany zanieczyszczone były emulsją woda-olej (rysunek 1.10), następnie były czyszczone fizycznie i chemicznie oraz płukane wodą, co przedstawiono na rysunku 1.11.



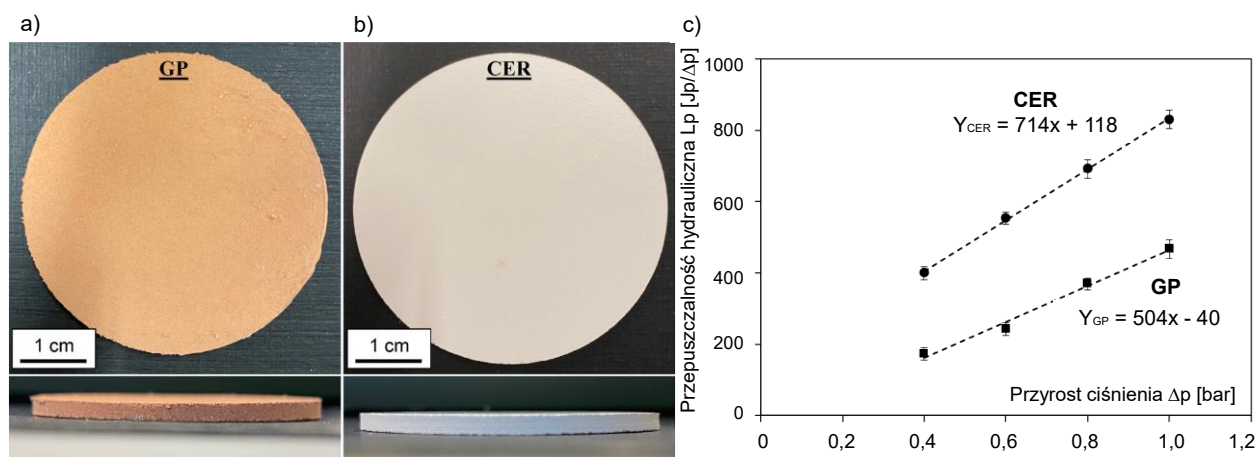
Rys. 1.10. Obrazy SEM powierzchni membran: a) zanieczyszczonej membrana *PVDF*, b) oczyszczonej *PVDF*, c) zanieczyszczonej membrany *PVDF* zmodyfikowana *PDA*, d) oczyszczona *PVDF* zmodyfikowana *PDA*, e) zanieczyszczonej membrany *PVDF* zmodyfikowana *PDA* i warstwą elektroprzędzoną *PVP-co-PMMA*, f) oczyszczonej *PVDF* zmodyfikowana *PDA* i warstwą elektroprzędzoną *PVP-co-PMMA* [131]



Rys. 1.11. Obrazy SEM przekroju poprzecznego: a) zanieczyszczonej membrana *PVDF*, b) oczyszczonej *PVDF*, c) zanieczyszczonej membrany *PVDF* zmodyfikowana *PDA*, d) oczyszczona *PVDF* zmodyfikowana *PDA*, e) zanieczyszczonej membrany *PVDF* zmodyfikowana *PDA* i warstwą elektroprzędzoną *PVP-co-PMMA*, f) oczyszczonej *PVDF* zmodyfikowana *PDA* i warstwą elektroprzędzoną *PVP-co-PMMA* [131]

Zanieczyszczenia trzech badanych membran przedstawiają rysunki 1.10a), c) i e) oraz 1.11a), c) i e). Procedura czyszczenia membran i płukania wodą okazała się bardziej skuteczna w przypadku modyfikowanej membrany warstwą poliwinylpirolidonu-co-polimetakrylanu metylu (*PVP-co-PMMA*) poddanego elektroprądzeniu. Zgodnie z pracą [131] wspomniana warstwa elektroprzędzona działa jako warstwa hydrofilowa i wraz z osadem dopaminy, całkowicie oddziela olej z emulsji (99%). Ponadto warstwa elektroprzędzona zatrzymuje krople oleju, bez trwałego przylegania do membrany, co w późniejszym procesie czyszczenia membrany (płukania) umożliwia rozdzielenie zanieczyszczeń i oleju od membrany.

W grupie polimerowych materiałów membranowych również prowadzone są prace [29] nad membranami geopolimerowymi. Są to nieorganiczne, amorficzne, syntetyczne polimery glinokrzemianowe, które można utwardzać w temperaturach poniżej 100°C. Geopolimery składają się z długich łańcuchów tj. kopolimerów tlenków glinu i krzemu oraz stabilizujących kationów metali [55]. Widok membrany geopolimerowej i ceramicznej użytych w badaniach porównawczych autorów [29] przedstawia rysunek 1.12.

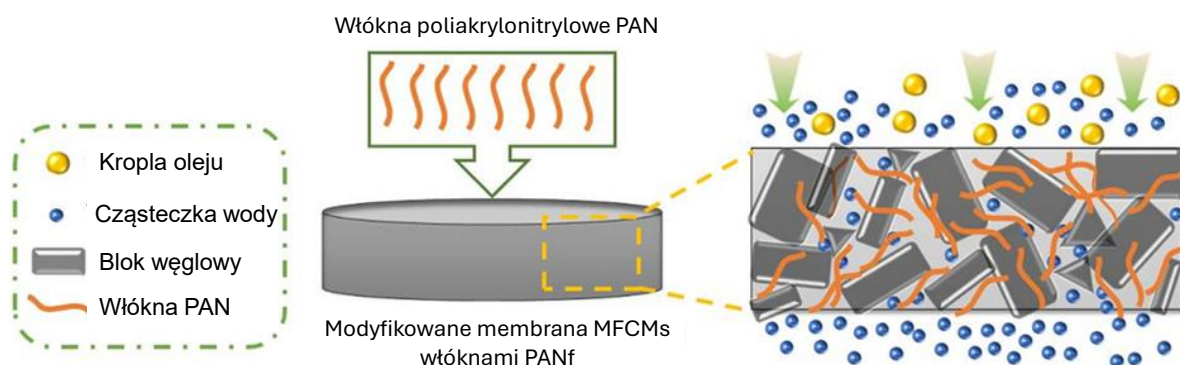


Rys. 1.12. Widok z góry i z boku membran: a) geopolimerowej GP, b) ceramicznej CER, c) wykres przepuszczalności hydraulicznej czystej wody membran CER i GP [29]

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 1.12c) badań autorów [1] stwierdzono, że przepuszczalność na przykładzie czystej wody membrany ceramicznej jest o 42% wyższa od membrany geopolimerowej. Membrana GP cechuje się progowym ciśnieniem wynoszącym 79 mbar, natomiast membrana CER charakteryzuje się dodatnim punktem przecięcia z osią pionową L_p . Różnicę w przepuszczalności hydraulicznej wyjaśnia się właściwościami fizycznymi membran. Membrana GP charakteryzuje się szerszym rozkładem wielkości porów w porównaniu z membraną CER i cieńszą warstwą selektywną (40 μm w porównaniu z 80–100 μm dla membrany CER). Pory w membranie ceramicznej mogą mieć mniejszą krętość, co przyczynia się do jej wyższej przepuszczalności [30]. Skuteczność membran geopolimerowych w zakresie oczyszczania emulsji woda-olej (zatrzymanych zanieczyszczeń) wyniosła w badaniach od 95 do 99,4%, co w przypadku membran ceramicznych wartość średnia wyniosła 99,1% [29].

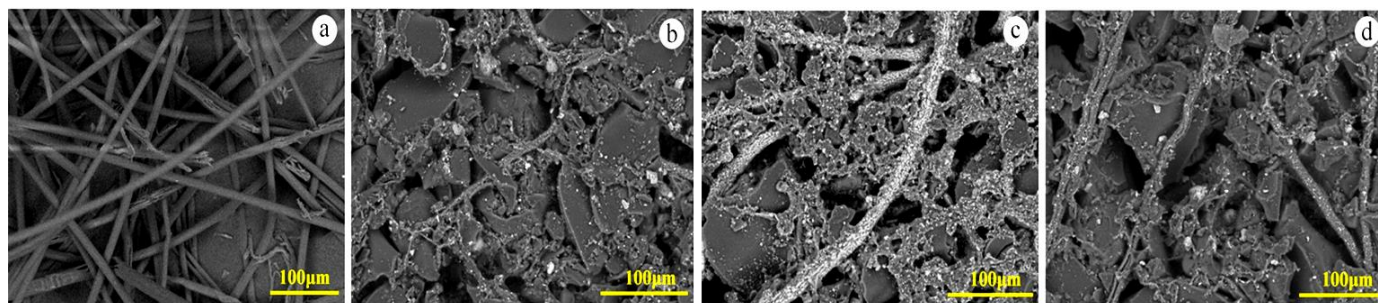
Porównując membrany polimerowe z ceramicznymi zgodnie z pracą [65] autorów, stwierdzono, że membrany polimerowe są nieskuteczne w zakresie agresywnych chemicznie substancji roboczych. Prowadzi to do szybkiego pogorszenia skuteczności filtracji. Natomiast membrany ceramiczne są drogie, mimo że cechują się wytrzymałością mechaniczną, stabilnością termiczną, obojętnością chemiczną, a także długim okresem użytkowania w procesie separacji. Zgodnie z pracą [22, 94] koszt membrany ceramicznej w zależności od zastosowanego materiału jest około 20 razy większy od membrany polimerowej. W praktyce

przemysłowej koszt membran podawany jest w odniesieniu do m^2 . Zbliżone cechy do membran ceramicznych posiadają membrany węglowe przy niższych kosztach produkcyjnych. W celu poprawy własności membran węglowych zaczęto prowadzić prace nad membranami kompozytowymi *CNT* jako membran węglowych mikrofiltracyjnych *MFCM* zmieszanych z włóknami poliakrylonitryłowymi *PANf* i żywicami fenolowymi. Dzięki tym domieszką można dowolnie modyfikować mikrostrukturę i właściwości membran *MFCM*. Na rysunku 1.13 przedstawiono schemat modułów membrany *MFCM* z dodatkami *PANf* na przykładzie mikrofiltracji zaolejonych ścieków.

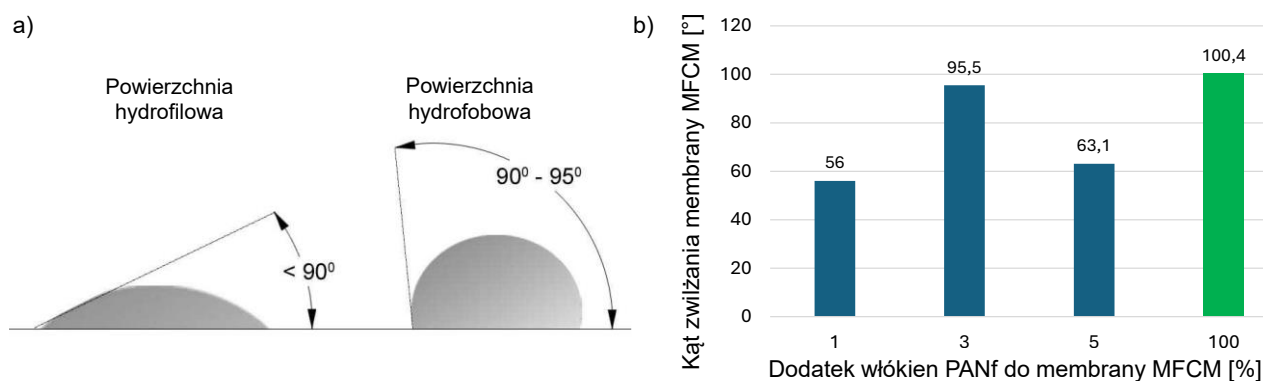


Rys. 1.13. Schemat membrany węglowej *MFCM* z włóknami poliakrylonitryłowymi *PANf* [65]

Na rysunku 1.14 przedstawiono widok ze skaningowego mikroskopu elektronowego membrany węglowej *MFCM* z różnymi procentowymi domieszkami włókien *PANf* (1, 3 i 5%). Dla porównania na rysunku 1.14a) zobrazowano widok samego włókna poliakrylonitrylowego *PANf*. Na rysunku 1.14c) zaobserwowano najwięcej białych punktów, które odnoszą się do zatrzymywanych na membranie osadów olejowych.



Rys. 1.14. Obrazy membrany węglowej *MFCM* z włóknami poliakrylonitryłowymi w udziale *PANf*: widok tylko *PANf*, b) 1%, c) 3%, d) 5% [65]

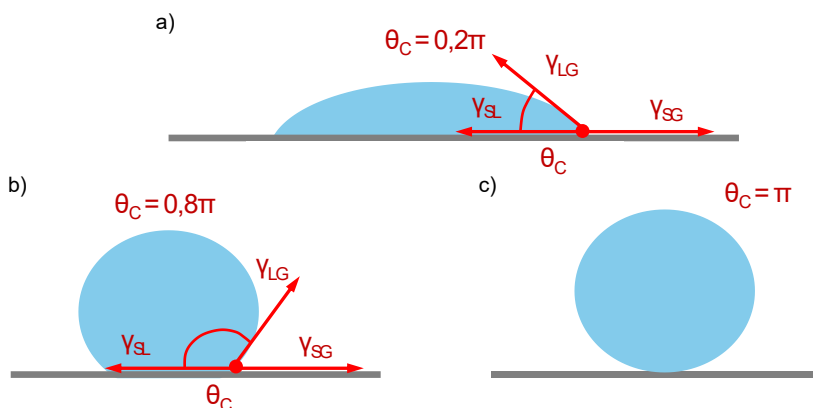


Rys. 1.15. a) Porównanie kąta zwilżania powierzchni ciała stałego dla powierzchni hydrofilowej i hydrofobowej [130], b) Zależność kąta zwilżania membrany *MFCM* od dodatku włókien *PANf* [65]

Na podstawie obrazu *SEM* z rysunku 1.14a) stwierdza się, że włókna poliakrylonitrylowe mają średnicę około 10–20 μm . Po modyfikacji membrany węglowej zauważa się, że włókna *PANf* są bardzo mocno osadzone w wewnętrznej matrycy *MFCM*. Autorzy pracy [65] w celu zbadania hydrofilowości membrany *MFCM* i wyznaczenia domieszki włókien *PANf* zmierzili kąt zwilżania powierzchni membrany, co przedstawia rysunek 1.15.

Analizując rysunek 1.15, autorzy badań z [65] stwierdzili, że wraz ze wzrostem zawartości *PANf* w membranie węglowej *MFCM*, kąt zwilżenia wodą najpierw wzrasta, a następnie maleje. Tendencja zmian jest ściśle związana ze zmiennością hydrofilowości powierzchni, zwilżalności matrycy i cechami strukturalnymi jak rozmiar porów czy porowatość membrany. Spośród modyfikowanych membran węglowych *MFCM*, dodanie 3% włókien *PANf* charakteryzował się najwyższym kątem zwilżenia wodą ze względu na najmniejszy średni rozmiar porów, co opóźnia wnikanie kropli wody do membrany węglowej. W czasie tych badań uzyskano zatrzymanie oleju na powierzchni membrany wynoszący 94,2%, przy strumieniu przenikania mieszaniny wynoszącego $15000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

W grupie membran kompozytowych również prowadzone są prace nad pokrywaniem ceramicznych membran mikrofiltracyjnych *SiC* nanorurkami węglowymi *CNT* metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej *CVD* zgodnie z pracą [83]. Zastosowanie nanorurek węglowych w membranie ceramicznej ma na celu poprawę wydajności procesu filtracyjnego i zapewnienie szerszego zakresu zastosowań tych membran. Autorzy pracy [83] zwrócili uwagę na fakt, że nanorurki węglowe *CNT* niestety wykazują hydrofobowe właściwości stąd ich domieszka oraz proces nanoszenia na membranę ceramiczną wymusza przeprowadzeniu wcześniejszych badań w celu uzyskania zamierzonego efektu filtracji.



Rys. 1.16. Kąt zwilżenia dla powierzchni: a) hydrofilowej, b) hydrofobowej, c) superhydrofobowej [83]

W badaniach membran filtracyjnych w celu określenia ich właściwości hydrofilowych lub hydrofobowych stosuje się pomiaru kąta zwilżenia zgodnie z zależnością (1.10), co również graficznie przedstawiono na rysunku 1.16. Jest to kąt utworzony przez powierzchnię płaską ciała stałego i płaszczyznę styczną do powierzchni cieczy graniczącej z ciałem stałym w wyniku różnicy i ilorazu napięcia powierzchniowego γ między dwoma płaszczyznami (ciała stałego i gazu γ_{SG} , ciała stałego i cieczy γ_{SL} oraz cieczy i gazu γ_{LG}).

$$\cos \theta_c = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (1.10)$$

gdzie: γ_{SG} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe *S* i gaz *G* [J/m^2],
 γ_{SL} – napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe *S* i ciecz *L* [J/m^2],
 γ_{LG} – napięcie powierzchniowe na granicy faz cieczy *L* i gazu *G* [J/m^2].

Autorzy pracy [64] w swoich badaniach skuteczności membran filtracyjnych dla emulsji olejowych, w których olej wymieszany był w dwóch różnych roztworach wodnych (woda dejonizowana i syntetyczna woda morska) zaproponowali dwa wskaźniki opisane równaniami (1.11) i (1.12). W oparciu o pomiary kąta zwilżenia membrany autorzy wyznaczyli względną hydrofilowość powierzchni membrany $RHPil_{L_2/L_1}$ zanurzonej w dwóch roztworach i względną olejofobność powierzchni membrany $ROPhob_{L_2/L_1}$. W przypadku względnej hydrofilowości ocenia się wpływ badanych dwóch roztworów wodnych L_1 i L_2 na względne wiązanie się i łączenie z membraną poprzez pomiar kątów zwilżania pęcherzyków powietrza na powierzchni membrany zanurzonej w badanych roztworach wodnych oraz obliczenie różnicy między $(\gamma_{S_2L_2}-\gamma_{S_2G})$ a $(\gamma_{S_1L_1}-\gamma_{S_1G})$. Gdy $RHPil_{L_2/L_1}>0$, substancja stała G (membrana) ma większą skłonność do wiązania (przyciągania) roztworu wodnego L_1 niż do roztworu L_2 .

$$\begin{aligned} RHPil_{L_2/L_1} &= -\gamma_{S_2L_2} - \gamma_{S_2G} + \gamma_{S_1L_1} - \gamma_{S_1G} \\ RHPil_{L_2/L_1} &= \gamma_{L_2G} \cos \pi - \theta_{GL_2} - \gamma_{L_1G} \cos \pi - \theta_{GL_1} \left[\frac{J}{m^2} \right] \end{aligned} \quad (1.11)$$

Wskaźnik olejofobności nie odnosi się do fazy γ_{SG} (ciało stałe-gaz) jak w przypadku wskaźnika hydrofilowości tylko do fazy γ_{OL} (olej-badany roztwór wodny). Podobnie jak w przypadku hydrofilowości, wpływ składu roztworu wodnego na względne wiązanie i przyleganie do membrany fazy olejowej oceniane było poprzez pomiar kątów zwilżenia kropelek oleju na powierzchni membrany zanurzonej w badanych roztworach L_1 i L_2 , a następnie obliczenie różnicy między $(\gamma_{S_2L_2} - \gamma_{S_2O})$ i $(\gamma_{S_1L_1} - \gamma_{S_1O})$:

$$\begin{aligned} ROPhob_{L_2/L_1} &= -\gamma_{S_2L_2} - \gamma_{S_2O} + \gamma_{S_1L_1} - \gamma_{S_1O} \\ ROPhob_{L_2/L_1} &= -\gamma_{OL_2} \cos \theta_{OL_2} + \gamma_{OL_1} \cos \theta_{OL_1} \left[\frac{J}{m^2} \right] \end{aligned} \quad (1.12)$$

Wskaźnik $ROPhob_{L_2/L_1}>0$ oznacza, że ciało stałe tj. membrana jest bardziej olejofobowa gdy jest zanurzone w cieczy L_2 niż w cieczy L_1 . Druga postać równań (1.11) i (1.12) z uwzględnieniem funkcji trygonometrycznych zapewnia wg. [64] dokładniejszą ocenę względnej hydrofilowości i olejofobności niż proste porównanie kątów zwilżania.

1.4. Przykłady zastosowań filtracji cieczy

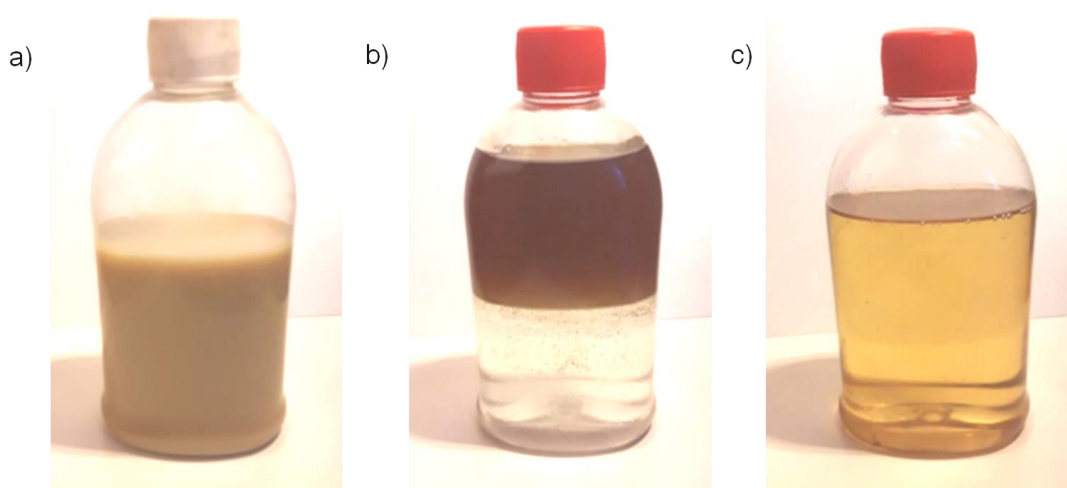
W inżynierii mechanicznej czy inżynierii lądowej, geodezji i transportu separacja olejowa poprzez mikrofiltrację powszechnie jest stosowana do czyszczenia olejów wykorzystywanych, jako medium robocze w układach hydraulicznych czy jako środek smarujący w silnikach spalinowych i przekładniach mechanicznych jak również do oczyszczania paliw ropopochodnych [103]. Oprócz przemysłu mechanicznego innym ważnym zastosowaniem membran filtracyjnych jest przemysł spożywczy, w szczególności w przetwarzaniu płynnej żywności. Przy użyciu konwencjonalnych metod separacji wiele lotnych aromatów żywności ma tendencję do oddzielenia. Jednak w procesach membranowych te składniki smakowe są zatrzymywane w żywności [63]. Nanofiltracja podobnie jak odwrócona osmoza jest stosowana w produkcji płynnej żywności. W przypadku nanofiltracji stosuje się ją do oczyszczania enzymów i zagęszczania laktozy i cukrów. Natomiast odwrócona osmoza może być użyta w zagęszczaniu soków owocowych i w dealkoholizacji napojów [90]. Separacja gazów jest jedną z podstawowych technik otrzymywania czystych gazów do wielu procesów przemysłowych, poprzez reakcje chemiczne, kriotechnikę lub poprzez metody absorpcyjno – desorpcyjne [17].

Zgodnie z pracą [20] porównując obie membrany (*MF* i *UF*), stwierdzono, że przepuszczalności hydrauliczne są zgodne z deklaracją producenta membran, mimo, że membrana *MF* wykazała wyższą wartość od deklarowanej (teoretycznej). Wraz ze wzrostem ciśnienia w układzie przepływającego czynnika, strumień przepływu również wzrasta. Jednak należy podkreślić, że w membrana *UF* może pracować na dwukrotnie wyższym ciśnieniu niż membrana *MF*. Przepuszczalność hydrauliczna membrany *MF* jest 10-15 razy większa od membrany *UF*. Czas filtracji podczas badań obu membran (120 minut) spowodował, że strumień przepływu w membranie *MF* spadał ze względu na zatykanie się szczelin w membranie, natomiast w membranie *UF* przepływ był stabilny bez wyraźnego spadku.

Separacja membranowa jest podstawową metodą wykorzystywaną w oczyszczalniach ścieków, w szczególności przy ściekach zaolejonych. Tego rodzaju ścieki występują w przetwórstwie spożywczym, barwieniu tekstyliów, wydobywaniu ropy naftowej i gazu, przetwórstwie petrochemicznym oraz w obróbce metali. Ścieki zaolejone zawierają dużą liczbę substancji toksycznych, takich jak węglowodory ropopochodne, fenol i wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Mieszaniny zaolejone zgodnie z pracą [65] dzielą się głównie na cztery rodzaje w zależności od wielkości kropli oleju, tj. na:

- a) olej pływający,
- b) olej rozproszony,
- c) olej zemulgowany,
- d) olej rozpuszczony.

Na rysunku 1.17 przedstawiono widok przykładowych mieszanin oleju z wodą.



Rys. 1.17. Widok mieszaniny oleju z wodą: a) emulsja, b) woda wydzielona, c) woda rozpuszczona [62]

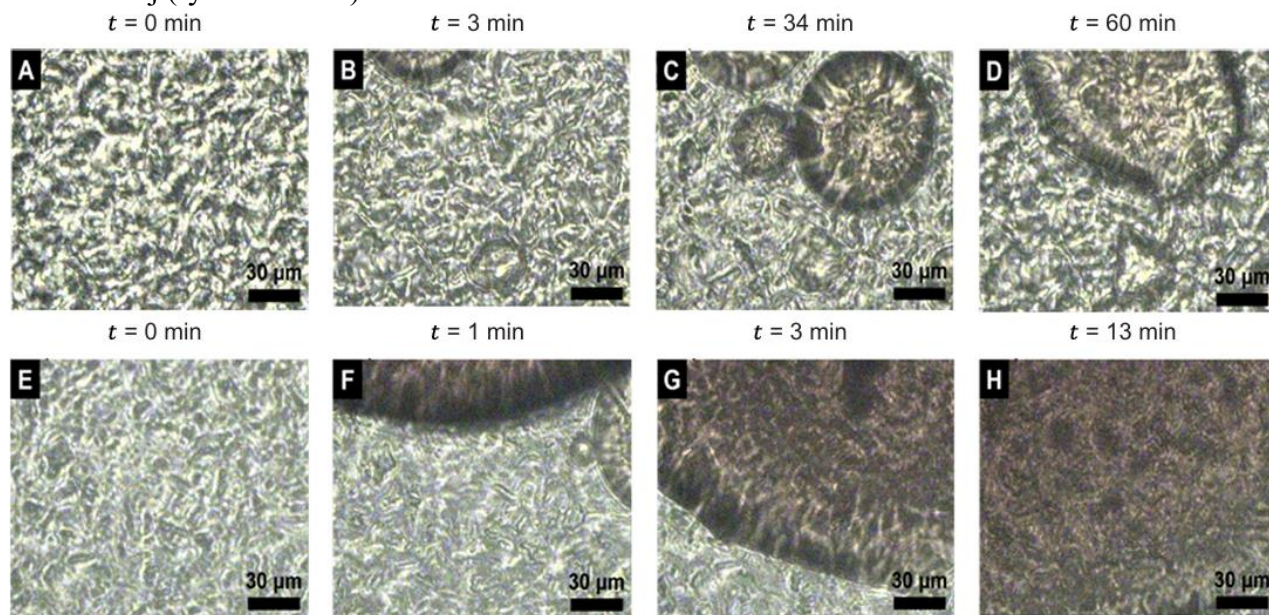
W przypadku mieszaniny oleju z wodą w postaci wody wydzielonej (niemieszającej się mieszaniny jak na rys. 1.17b) separacja olejowa jest bardzo prosta, ponieważ oba związki naturalnie rozdziela się ze względu na różnicę gęstości [29]. W pozostałych przypadkach jak emulsja i woda rozpuszczona separacja jest znacznie trudniejsza. Ze względu na obecność środków powierzchniowo czynnych, które utrzymują stabilność emulsji w czasie, nie występuje naturalny rozdział faz między składnikami i konieczne są bardziej zaawansowane techniki mikrofiltracji [136]. Autorzy pracy [24] przedstawili wyniki badań zastosowania nanokompozytowych membran mikrofiltracyjnych *SiC/CNT* do obróbki zarówno emulsji *O/W* jak i wody w oleju (*W/O*). Membrany modyfikowane nanorurkami węglowymi *CNT* znajdują zastosowanie w produkcji czystej wody, odsalaniu, uzdatnianiu powietrza czy innych ogólnych zastosowaniach przemysłowych [4, 6].

Obecnie do oczyszczania ścieków zaolejonych stosuje się kilka konwencjonalnych metod, jak flotację powietrzną, adsorpcję, odtłuszczanie, fotokatalizę, elektrochemię, koagulację

i flokulację z użyciem siarczanu żelaza i anionowego poliakrylamidu. Koagulacja i flokacja jako hybrydowy proces z użyciem membran ceramicznych skutecznie zwiększa skuteczność wstępnego oczyszczenia ścieków jak również wody morskiej i redukuje zanieczyszczenie membran [133]. Stwierdzono, że membrany mikrofiltracyjne (*MF*) o wielkości porów ok. 0,1 μm są skuteczne w oddzielaniu ścieków zaolejonych i odzyskiwaniu surfaktantu w surowcu [18]. W przypadku separacji membranowej stosuje się membrany najczęściej polimerowe i ceramiczne. Zgodnie z pracą [34, 65] również przeprowadzono udane badania nad membranami kompozytowymi *CNT* składającymi się z membrany węglowej, jako bazowej z dodatkiem 3% włókien poliakrylonitrylowych. W badaniach opisanych w pracy [134] do rozdzielania emulsji olejowo-wodnej zastosowano membranę węglową *MF* z dodatkiem SiO_2 . Dwutlenek krzemu umożliwia zmniejszenie średnicy porów z jednoczesnym wzmocnieniem struktury membrany. Krzemionka dodatkowo poprawia właściwości hydrofilowe i olejofobowe membrany węglowej. W badaniach autorów [134] uzyskano stopień usunięcia oleju wynoszący 99,99% przy strumieniu przenikania $5550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$. Takie działanie pozwala na łatwe modyfikowanie i wytwarzanie membran węglowych o wysokiej wydajności separacji zaolejonych ścieków. Przeprowadzono wiele badań nad oczyszczaniem ścieków zaolejonych, a dobre wyniki separacji odnotowano przy użyciu różnych materiałów membranowych. Ultrafiltracja membranowa (*UF*) jest również podstawową technologią w oczyszczaniu ścieków zaolejonych [10].

W zakresie zanieczyszczenia ropy naftowej również stosowana jest separacja olejowa różnymi membranami [64]. Zastosowanie dyspergatorów obniża napięcie międzyfazowe ropy naftowej na mniejsze krople (o około 50% do rozmiaru 10 μm), co utrudnia separację emulsji ropy naftowej. W przypadku wycieków ropy naftowej podczas jej transportu do wody morskiej konieczne jest użycie dyspergatorów, najczęściej surfaktantów do rozdzielania ropy naftowej od wody. Ich użycie jest konieczne, aby zmniejszyć bezpośrednie oddziaływanie oleju na życie morskie i ekosystemy, co minimalizuje szkody ekologiczne. Zebranie emulsji ropy naftowej wymaga późniejszego odfiltrowania (oczyszczenia z wody morskiej i innych związków chemicznych), co prowadzi się demulgatorami. Demulgatory zwiększają rozmiar kropli i poprawiają separację. Gdy obróbka demulgatorami nie jest możliwa lub jest niewystarczająca, filtracja membranowa może być uzupełniającym podejściem zapewniającym wysoką wydajność separacji. Jednakże polaryzacja stężeń i zanieczyszczenie membran ograniczają szersze zastosowanie membran do separacji oleju i wody. Wiele wcześniejszych badań [124] koncentrowało się na zanieczyszczeniu membran poliwęglanowych *PCTE* przez zemulgowany olej. Czynniki wpływające na dynamikę zanieczyszczeń obejmują *pH*, zasolenie, temperaturę, naprężenie ścinające, ciśnienie, stężenie oleju w surowcu, wielkość i ładunek kropli oleju, rodzaj surfaktantu, materiał membrany i rozmiar porów. Wykazano, że przeciwnie naładowany surfaktant i powierzchnia membrany powodowały szybkie zanieczyszczenie membrany z powodu przyciągania elektrostatycznego. Emulsje ropy naftowej oczyszcza się za pośrednictwem membran *MF*, *UF* i *NF*. Separacja poprzez mikrofiltrację i nanofiltrację w zależności od zanieczyszczenia ropy naftowej wykazywały w niektórych przypadkach niższą skuteczność, natomiast największą skuteczność wykazała ultrafiltracja *UF* w oczyszczeniu permeatu z oleju i innych zanieczyszczeń w ropie naftowej. Zasolenie emulsji ropy naftowej zmniejsza zarówno właściwości hydrofilowe i hydrofobowe membran filtracyjnych. Natomiast dyspergatory według badań [67] zmniejszają hydrofobowość, a nie wpływają na hydrofilowość membran. Autorzy badań również stwierdzili, że krople ropy naftowej stabilizowanej dyspergatorem w syntetycznej wodzie morskiej przylegają do membrany szybciej, w przeciwieństwie do kropeł ropy naftowej rozpuszczonych w wodzie dejonizowanej. Na rysunku 1.18 przedstawiono w różnych chwilach czasowych zachowanie się kropeł ropy naftowej na membranach

o rozmiarze porów $0,03\ \mu\text{m}$ w wodzie dejonizowanej (rys. 1.18 A-D) i w syntetycznej wodzie morskiej (rys. 1.18 E-H).

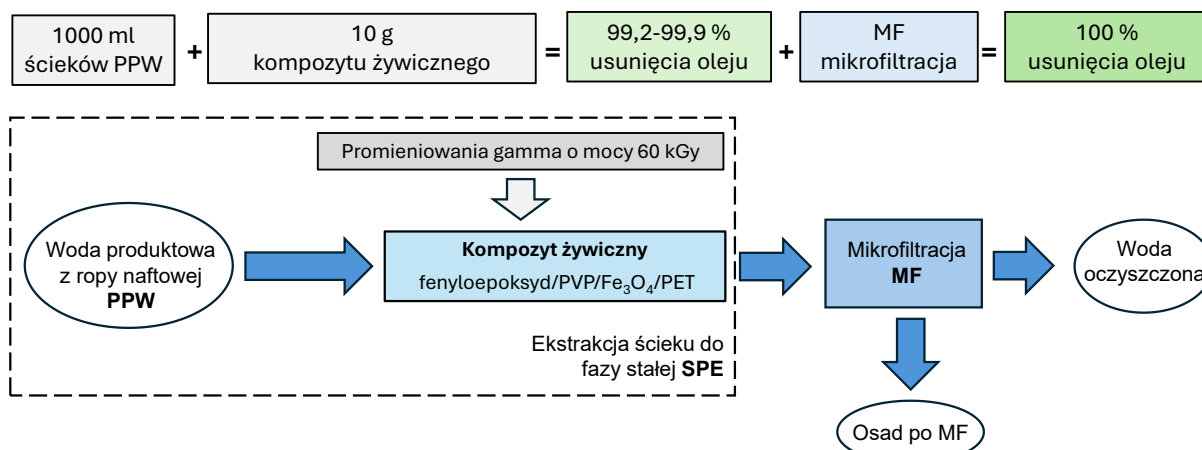


Rys. 1.18. Widok kroplel ropy naftowej stabilizowanych dyspergatorem na powierzchni membrany w wodzie dejonizowanej (A – D) i syntetycznej wodzie morskiej (E – H). Obrazy A i E przedstawiają widok membrany wolnej od zanieczyszczeń [64]

Analizując rysunek 1.18 stwierdzono, że w przypadku syntetycznej wody morskiej krople ropy naftowej całkowicie pokryły membranę po 13 minutach przy prędkości przepływu $0,1\ \text{m/s}$ i zablokowanie całkowite membrany. Natomiast w emulsji ropy naftowej w wodzie dejonizowanej membrana była częściowo pokryta dopiero po 35 minutach

W zakresie ścieków będących efektem szczelinowania hydraulicznego i wiercenia poziomego w skałach podczas wydobywania ropy naftowej i gazu z łubków stosuje się technologie łączonego procesu elektrokoagulacji *EC*, mikrofiltracji *MF* i destylacji membranowej *MD*. Elektrokoagulacja, a następnie mikrofiltracja jest wstępnym oczyszczeniem płynu ze szczelinowania przed zasadniczą destylacją membranową. Woda, która jest wykorzystywana podczas produkcji ropy naftowej i gazu, określana jako woda produkcyjna *PW* wymaga ciągłego oczyszczenia, aby mogła być ponownie wykorzystana. Ta technologia wymaga użycia dużej ilości wody. Płyn szczelinujący składa się w 98% z wody i piasku. Jednak dodawane są liczne substancje chemiczne, takie jak reduktory tarcia, środki powierzchniowo czynne, inhibitory korozji i środki poprawiające przepływ [46]. Po rozbiciu formacji skalnej ciśnienie jest obniżane, a woda szczelinująca wypływa z powrotem na powierzchnię wraz z ropą lub gazem. Woda *PW* zawiera wysokie stężenia rozpuszczonych soli określanych, jako całkowite rozpuszczone substancje stałe (*TDS*). Ponadto, występują rozpuszczone polarne i niepolarne związki organiczne (całkowity węgiel organiczny *TOC*), a także olej, smar, paliwa i dodatki związane z płynami szczelinującymi [13]. Na podstawie badań [46] stwierdzono, że układy filtracyjne *EC-MF-MD* pozwalają na oczyszczanie ścieków do granicy rozpuszczalności soli. Elektrokoagulacja skutecznie oddziela związki organiczne, a mikrofiltracja bardzo dobrze usuwa cząstki stałe. Natomiast na skuteczność procesu oczyszczania takich ścieków jak woda produkcyjna po szczelinowaniu hydraulicznym ma wpływ stabilność membrany *MD* w procesie destylacji.

Ścieki zaolejone, jako woda poprodukcyjna (*PPW*) z wydobywania ropy naftowej zgodnie z pracą [3] mogą być również oczyszczane w łączonym procesie mikrofiltracji *MF* z wcześniejszą ekstrakcją do fazy stałej *SPE*, co przedstawiono w postaci schematu na rysunku 1.19.

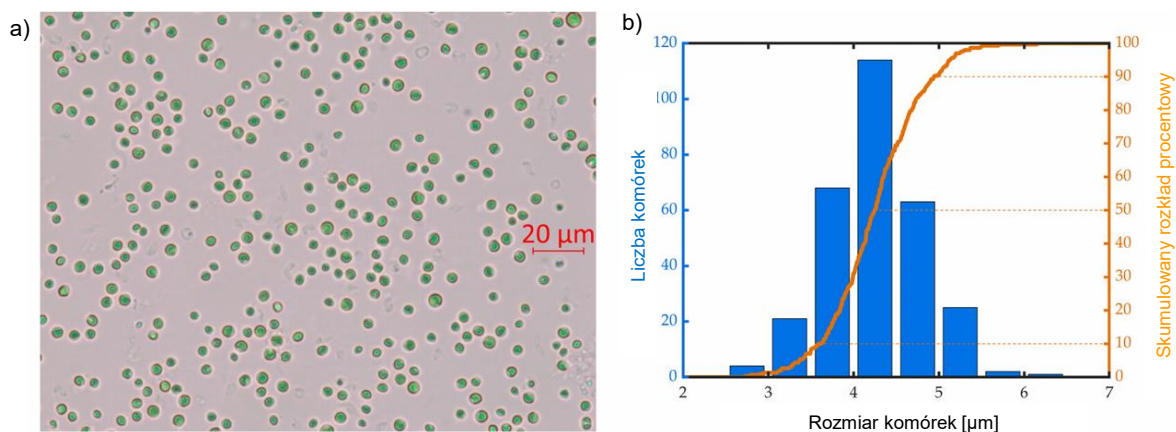


Rys. 1.19. Schemat oczyszczania ścieków zaolejonych z wydobycia ropy naftowej przy szeregowym procesie separacji z wykorzystaniem kompozytu żywicznego i mikrofiltracji [3]

Autorzy pracy [3] wykonali porowaty kompozyt żywiczny z mieszaniny fenyloepoksydu/poliwinylopirolidonu/ Fe_3O_4 w stosunku odpowiednio 90:8:2% ze śladową ilością politereftalanu etylenu (*PET*) dla jego wzmocnienia, a następnie poddali kompozyt napromienianiu gamma o mocy 60 kGy. Ten optymalny stosunek uzyskany doświadczalnie odznaczał się absorpcją wody na poziomie 12%. W badaniach wykonanego kompozytu o wadze 10 g przy oczyszczaniu 1000 ml ścieków *PPW* usunięto już około 99,2-99,9% oleju w procesie ekstrakcji do fazy stałej. Następnie przepuszczenie wstępnie oczyszczonej wody poprodukcyjnej przez filtr podczas mikrofiltracji pozwoliło na 100% oczyszczenie ścieku *PPW* z oleju i odzyskanie czystej wody do dalszego zastosowania przemysłowego. Należy zaznaczyć, że wcześniejsza jednorazowa mikrofiltracja umożliwiała na oczyszczenie wody poprodukcyjnej z zawartością oleju na poziomie 148,54 g/l, a po zastosowaniu kompozytu żywicznego zawartość oleju spadła do 1,13 g/l. Wadą łączonej metody separacji *SPE+MF* jest częste wymienianie wkładu żywicznego, gdyż na 1000 ml zaolejonego ścieku zużywa się 10 g kompozytu żywicznego z fenyloepoksydu/PVP/ Fe_3O_4 .

Membrany geopolimerowe mają szerokie zastosowanie w oczyszczaniu szeroko rozumianych ścieków. W przypadku usuwania azotu amonowego ze ścieków komunalnych w wyniku wymiany jonowej zgodnie z pracą wykorzystuje się odlewaną membranę geopolimerową z metakaolinu i żużla wielkopiecowego. Dla ścieków zaolejonych wykorzystuje się membrany geopolimerowe z popiołu lotnego i tlenku grafitu. Membrany geopolimerowe na bazie metakaolinu zgodnie z znalazły również zastosowanie do usuwania antybiotyków ze ścieków szpitalnych poprzez adsorpcję i fotodegradację. Membrany geopolimerowe umożliwiają usuwanie ze ścieków metali ciężkich, barwników i nanocząstek, rozmiar zatrzymywanych cząstek stałych jest powyżej 1,67 μm [29].

Mikrofiltracja oprócz podstawowego przeznaczenia związanego z oczyszczaniem różnych płynnych substancji z zanieczyszczeń, ma również odwrotne zastosowanie. Takim przykładem jest pozyskiwanie mikroalgi tj. samożywnych mikroorganizmów z wody słodkiej i morskiej. Najczęściej pozyskuje się zieloną morską mikroalgę *Nannochloropsis oculata* [132]. Jest to gatunek mikroalgi morskiej, charakteryzujący się bogactwem składników odżywczych wykorzystywanych w różnych dziedzinach, w tym w przemyśle kosmetycznym, suplementach diety oraz w akwakulturze. Jest źródłem kwasów tłuszczowych omega-3, zwłaszcza kwasu eikozapentaenowego (*EPA*). Na rysunku 1.20 przedstawiono widok mikroalg pod mikroskopem optycznym oraz rozkład jej średnic.



Rys. 1.20. Widok: a) zawiesiny mikroalgi *nannochloropsis oculata* pod mikroskopem optycznym ZEISS Axio Vert A1, b) rozkładu wielkości komórek mikroalg w zawiesinie [132]

Mikroalgi są również cennym źródłem biomasy dzięki nowym procesom usprawniającym fotosyntezę, co umożliwi produkcję nowej żywności, pasz i produktów zdrowotnych, jednocześnie przyczyniając się do postępu w zakresie zrównoważonego wytwarzania biopaliw. Te organizmy fotosyntetyczne naturalnie gromadzą węglowodany - głównie w postaci skrobi - które mogą być wykorzystywane, jako surowe substraty do biopaliw na bazie cukru, takich jak bioetanol lub biobutanol [39]. Problemem w filtracji zawiesin alg jest szybki spadek szybkości przepływu filtratu w funkcji czasu ze względu na zanieczyszczenie membrany i tworzenie się osadu filtracyjnego z zatrzymanymi komórkami mikroalg i ich pozakomórkowych substancji polimerycznych *EPS*. Obecność *EPS* negatywnie wpływa na wydajność zawiesin mikroalg, jako surowca do filtracji, ponieważ *EPS* powoduje nieodwracalne zanieczyszczenie membrany, mimo że występuje w niskich stężeniach. Próba rozpuszczenia pozakomórkowych substancji polimerycznych również powoduje zanieczyszczenie membran w ultrafiltracji i odwróconej osmozy z powodu tworzenia warstwy żelu hydrofilowych polisacharydów [132]. W przypadku biorafinerii mikroalg, proces separacji membranowej jest również odpowiednią technologią frakcjonowania (rozdzielenia) biocząsteczek tj. białek, lipidów lub węglowodorów. Mikrofiltracja wodnych ekstraktów mikroalg umożliwia zagęszczenie lipidów w retentacie i odzyskanie hydrofilowych białek z permeatu [69].

Mimo zainteresowania filtracji membranowej w biorafinacji mikroalg, niewiele prac poświęcono regeneracji membran po zanieczyszczeniu ich produktami roślinnymi. Obecna procedura czyszczenia membran *MF* nadal wymaga dużych ilości roztworów czyszczących, co prowadzi do dodatkowego zużycia energii i wody, co negatywnie wpływa na środowisko naturalne. W pracy [92] zastosowano roztwór *NaCl* do czyszczenia membran ultrafiltracyjnych zanieczyszczonych białkami serwatkowymi i emulsją ekstraktów lipidowych z mikroalg. Przed badaniami membrany na bazie polieterosulfonu (*PES*) o średniej średnicy porów 0,1 μm zostały zanieczyszczone, a następnie oczyszczone w kilku etapach: wstępne czyszczenie wodą, wstępne czyszczenie *NaCl*, czyszczenie detergentem i podchlorynem sodu. Wykazano, że stężenie 5 mM *NaCl* w temperaturze 50°C znacząco poprawia wstępne oczyszczenie membran, roztwór *NaCl* usuwa zanieczyszczenia z powierzchni membrany i znacząco zmniejsza liczbę zanieczyszczeń z wnętrza membrany. Ten proces ułatwia i skraca ostatni etap czyszczenia membrany detergentami. Autorzy badań z pracy [92] przyczynili się do rozwoju ekonomicznych i przyjaznych dla środowiska procedur czyszczenia w procesach separacji membranowej, w tym w biorafinerii mikroalg.

Na podstawie przeglądu literaturowego z zakresu separacji olejowej i jednocześnie odnosząc się do tytułu niniejszej pracy doktorskiej stwierdzono, że pojęcie filtracji i mikrofiltracji jest zamienne wykorzystywane w hydraulice siłowej. Należy jednak

podkreślić, że pojęcie filtracji jest bardziej ogólne i dotyczy oddzielania substancji stałych od cieczy poprzez mechaniczne ich zatrzymanie na filtrach przy użyciu różnych technik czy metod jak i wkładów filtracyjnych. Natomiast mikrofiltracja jest jedną z metod filtracji wykorzystująca filtry o średnicy porów od 1 do 4 μm zgodnie z [20, 62].

1.5. Podsumowanie separacji membranowej cieczy

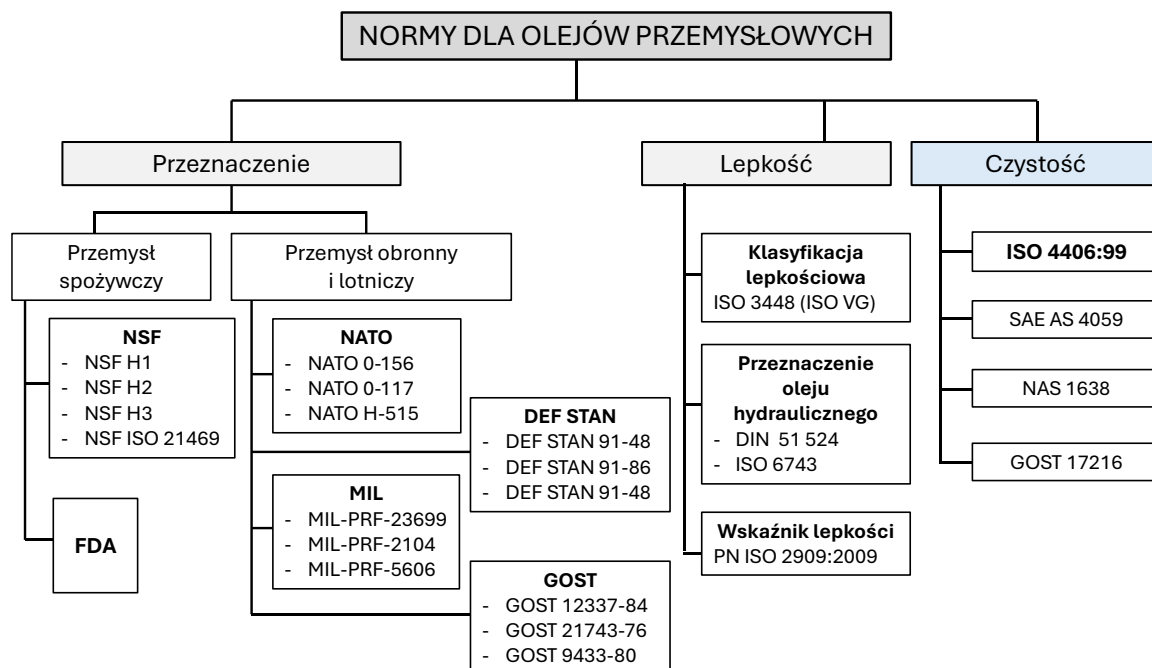
Z przeprowadzonej analizy literaturowej w zakresie separacji olejowej wynika, że zagadnienie filtracji membranowej jest przedmiotem wielu badań. Prace te prowadzone są w kilku płaszczyznach, w pierwszym przypadku jest to poprawa skuteczności filtracji membranowej, w drugim przypadku są to nowe dodatki do materiału membran, następnie rozwijanie hybrydowych systemów oczyszczania cieczy oraz kwestie związane z ochroną środowiska przy utylizacji substancji pochodzących z oczyszczania membran filtracyjnych. W szczególności analizując separację cieczy można stwierdzić, że:

- 1) Podstawową zaletą stosowania membran filtracyjnych w procesach separacji cieczy jest ich prosta obsługa. Jest to technologia generująca niewiele odpadów, w porównaniu z innymi metodami oczyszczania cieczy jak elektrokoagulacja czy biologiczne oczyszczanie jest bardziej przyjazna dla środowiska.
- 2) Membranowa separacja cieczy charakteryzuje się mniejszym zużyciem energii, co świadczy o jej opłacalności ekonomicznej względem chemicznych i biologicznych metod oczyszczania cieczy.
- 3) Mikrofiltracja ze względu na rozmiar porów jest pierwszą podstawową techniką w oczyszczaniu cieczy z zanieczyszczeń. W przypadku bardziej złożonych substancji w rozumieniu zanieczyszczeń, mikrofiltracja jest niewystarczająca i wymaga zastosowania kolejnych, bardziej dokładnych membran filtracyjnych jak ultrafiltracja, nanofiltracja czy odwrócona osmoza.
- 4) Stopień zanieczyszczenia cieczy sprawił, że jeden typ membrany filtracyjnej jest niewystarczający i konieczne jest użycie hybrydowych systemów filtracyjnych jak mikrofiltracja z ultrafiltracją, mikrofiltracja z oczyszczaniem biologicznym, elektrokoagulacja z mikrofiltracją i destylacją membranową czy np. mikrofiltracja z ultrafiltracją i odwróconą osmozą.
- 5) Najbardziej popularnymi i najczęściej stosowanymi membranami są polimerowe, wykonane z różnych włókien membrany filtracyjne. Ich przewaga nad membranami ceramicznymi, metalowymi czy węglowymi wynika z ich ceny, łatwości wytwarzania oraz możliwości dodawania innych składników wpływających na skuteczność filtracji. Ich główną wadą w stosunku do wymienionych materiałów jest szybkie zanieczyszczenie membran polimerowych i konieczność częstego płukania lub wymiany.
- 6) Współcześnie wielu badaczy prowadzi badania nad membranami kompozytowymi na bazie membran ceramicznych i węglowych z różnymi dodatkami. W przypadku membran ceramicznych wykorzystuje się nanorurki węglowe *CNT*, które poprawiają wydajność procesu filtracji, inne dodatki poprawiają właściwości hydrofilowe membran.
- 7) Niezależnie od zastosowanej membrany, największym ograniczeniem w separacji cieczy jest szybkość zanieczyszczenia membrany i całkowita utrata strumienia cieczy za membraną. Model Hermia podaje, że w pierwszym etapie następuje pośrednie blokowanie porów membrany i spadek wydajności filtracji. W drugim etapie następuje wewnętrzne i zewnętrzne formowanie się ciasta filtracyjnego (nazywane filtracją plackową) z ciągłym spadkiem filtracji. W ostatnim etapie jest całkowite zablokowanie porów membrany przez osadzone na powierzchni membrany ciasto filtracyjne.

2. MIKROFILTRACJA OLEJÓW DLA PRZEMYSŁU

2.1. Wymagania normatywne dla olejów przemysłowych

Oleje dla przemysłu jest szerokim pojęciem, które uwzględnia takie oleje jak: oleje hydrauliczne, silnikowe, przekładniowe, transformatorowe czy grzewcze (opałowe), które różnią się przeznaczeniem i właściwościami. Wiele z nich ma specjalne zastosowania, co wymaga spełnienia danej normy. Ze względu na przeznaczenie olejów w przemyśle, występuje wiele wymagań normatywnych, które olej powinien spełnić. Na rysunku 2.1 przedstawiono schematycznie podział na trzy grupy wymagań dla olejów przemysłowych.



Rys. 2.1. Podział wymagań normatywnych dla olejów przemysłowych [41, 42, 43, 53]

Na przykładzie przemysłu spożywczego, oleje muszą spełnić wymagania przepisów *NSF* International (National Sanitary Foundation) czy *FDA* (Food & Drug Administration) z certyfikatami *NSF H1*, *NSF H2*, *NSF H3* i *NSF ISO 21469*.

Oleje z certyfikatem *NSF H1* dopuszczone są w przemyśle spożywczym w sytuacjach, gdy może dochodzić tylko do przypadkowego kontaktu oleju z żywnością czy pokrewnymi produktami spożywczymi. Akceptowalne zanieczyszczenie nie może przekroczyć 10 ppm. Środki smarne *NSF H1* wolne są od metali ciężkich oraz czynników rakotwórczych czy mutagennych. To najczęściej stosowane produkty smarownicze w branży spożywczej. Oleje z certyfikatem *NSF H2* to produkty dopuszczone do stosowania w przemyśle spożywczym w sytuacjach, gdy nie występuje ryzyko zanieczyszczenia nimi produktów żywnościowych. Tego typu oleje stosowane są w maszynach na linii produkcyjnej bez ryzyka kontaktu z żywnością. W przypadku przypadkowego dostania się oleju do żywności, cała partia produktu spożywczego kierowana jest na utylizację. Oleje z certyfikatem *NSF H3* mogą mieć bezpośredni kontakt z produktami żywnościowymi. Wykorzystuje się je w procesach produkcji np. oleje roślinne, oleje białe, a także, jako środki przeciwrdzewne i czyszczące. Zapobiegają również przywieraniu składników spożywczych do różnych powierzchni maszyn produkcyjnych. Norma *NSF ISO 21469* określa wymagania higieniczne do produkcji olejów i smarów stosowanych w przemyśle spożywczym. Norma również określa niezależnie od zastosowania oleju – sposoby kontroli jakości wytwarzania oleju lub smaru.

Oleje dla przemysłu obronnego i lotniczego wymagają spełnienia norm *NATO*, *DEF STAN*, *MIL* oraz *GOST*. System kodów *NATO* dla olejów, płynów i smarów zapewnia kompatybilność w krajach sojusznicznych. Dla przykładu oleje turbinowe syntetyczne mają spełniać wymagania normy *NATO 0-156*, oleje silnikowe mineralne – normę *NATO 0-117*, a płyny hydrauliczne – normę *NATO H-515*. W Stanach Zjednoczonych również obowiązują kolejne normy wojskowe jak *MIL* (Military Standard). Norma *MIL-PRF-23699* dotyczy olejów turbinowych syntetycznych dla lotnictwa wojskowego i cywilnego, norma *MIL-PRF-2104* odnosi się do olejów silnikowych wielosezonowych stosowanych w pojazdach wojskowych, a norma *MIL-PRF-5606* do płynów hydraulicznych.

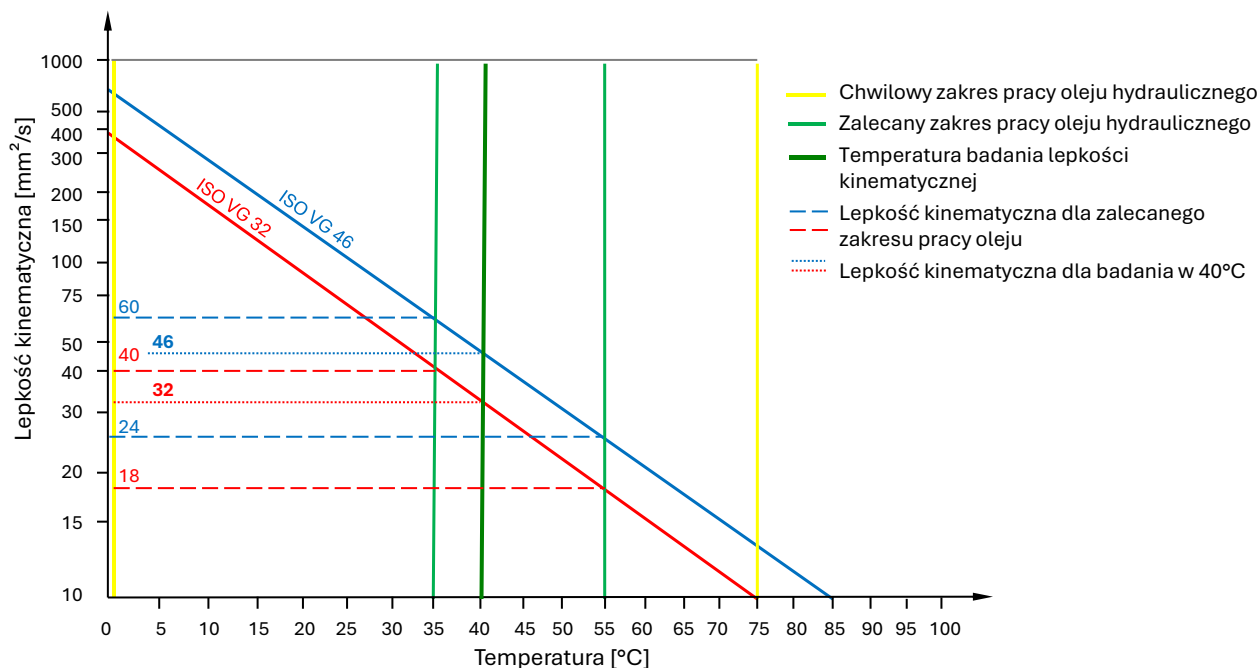
Normy *DEF STAN* to brytyjskie normy opracowane przez Ministry of Defence (*MoD*). Dla olejów turbinowych jest to norma *DEF STAN 91-99*, dla olejów silnikowych – *DEF STAN 91-86*, a dla płynów hydraulicznych – norma *DEF STAN 91-48*. Normy *GOST* dotyczą głównie Rosji oraz krajów Wspólnoty Niepodległych Państw (byłego *ZSRR*). Jest to rosyjski system standaryzacji określający szczegółowe wymagania jakości produktów, usług i procesów w różnych branżach przemysłowych. W zakresie lotnictwa, pojazdów wojskowych i systemach uzbrojeniach dla olejów silnikowych, silników wysokoprężnych należy spełnić normę *GOST 12337-84*, dla olejów turbinowych jest to norma *GOST 21743-76*, a dla płynów hydraulicznych – *GOST 9433-80*. Dla wszystkich wymienionych norm nie podano podziału tych norm dla smarów stosowanych w lotnictwie czy przemyśle zbrojeniowym. W przypadku olejów sprężarkowych konieczne jest spełnienie normy *ISO 6743-3*, która określa zastosowanie oleju do danej sprężarki ze względu na jego lepkość czy skład chemiczny. Każda gałąź przemysłu wykorzystuje na różnym etapie oleje hydrauliczne w swoich instalacjach.

Tab. 2.1. Klasyfikacja lepkościowa olejów przemysłowych według ISO 3448 [53]

Lp.	Klasa ISO VG	Średnia lepkości kinematyczna [mm ² /s] w temperaturze 40 [°C]	Przedział lepkości kinematycznej [mm ² /s] w temperaturze 40 [°C]
1	ISO VG 2	2	1,98 – 2,42
2	ISO VG 3	3	2,88 – 3,52
3	ISO VG 5	4,7	4,14 – 5,06
4	ISO VG 7	6,8	6,12 – 7,48
5	ISO VG 10	10	9,00 – 11,00
6	ISO VG 15	15	13,50 – 16,50
7	ISO VG 22	22	19,80 – 24,20
8	ISO VG 32	32	28,80 – 35,20
9	ISO VG 46	46	41,40 – 50,60
10	ISO VG 68	68	61,20 – 74,80
11	ISO VG 100	100	90,0 – 110,0
12	ISO VG 150	150	135,0 – 165,0
13	ISO VG 220	220	198,0 – 242,0
14	ISO VG 320	320	288,0 – 352,0
15	ISO VG 460	480	414,0 – 506,0
16	ISO VG 680	680	612,0 – 748,0
17	ISO VG 1000	1000	900,0 – 1100,0
18	ISO VG 1500	1500	1350,0 – 1650,0

W odniesieniu do lepkości olejów przemysłowych również występuje szereg norm. Jednak punktem wyjściowym jest lepkościowa klasyfikacja przemysłowych środków smarnych według *ISO 3448*. Ta klasyfikacja zapisywana, jako *ISO VG* (viscosity grade) definiuje 18 klas, dla których przypisane są lepkości kinematyczne wyrażone w cSt tj. w mm^2/s w temperaturze 40°C . W tabeli 2.1 na podstawie [53] przedstawiono najważniejsze dane w zakresie lepkości i jej przedziału dla poszczególnych klas lepkościowych według *ISO VG*.

Klasyfikacja olejów hydraulicznych zgodnie z ich przeznaczeniem podana jest w dwóch normach, jest to norma *DIN 51 524* oraz norma *ISO 6743*. Pierwsza norma dzieli oleje na 4 klasy (*H*, *HL*, *HLP* (*HVLP*) i *HLPD* (*HVLPD*)), natomiast druga norma *ISO* w grupie *H* (układy hydrauliczne) na 17 klas z uwzględnieniem olejów syntetycznych i emulsji olejowo-wodnych jak *HH*, *HL*, *HM*, *HR*, *HV*, *HG*, *HS*, *HETG*, *HEPG*, *HEES*, *HEPR*, *HFAE*, *HFAS*, *HFB*, *HFV*, *HFDR* i *HFDU*). Oleje do układów hydrokinetycznych zgodnie z *ISO 6743* podzielone są na dwie klasy tj. *HA* dla olejów do przekładni automatycznych i *HN* dla sprzęgieł i przemienników mocy (zmienników momentu obrotowego). Ze względu na szerokie zastosowanie olejów hydraulicznych, najczęściej spotykany zakres lepkości kinematycznej jest od 10 do $68 \text{ mm}^2/\text{s}$ [87]. Należy zaznaczyć, że mimo dużej różnorodności olejów hydraulicznych wynikającej z bardzo szerokiego zastosowania, w przypadku maszyn budowlanych czy drogowych jak i maszyn produkcyjnych, najczęściej wykorzystywany jest olej *HL 32*, *HL 46* lub *HV46*. Różnica między olejem *HL* a *HV* wynika z wyższej odporności na ścinanie i stabilną charakterystyką lepkościowo-temperaturową (rys. 2.2) w przypadku oleju *HV 46*. Ten olej jest szczególnie zalecany do układów pracujących w zmiennych warunkach temperaturowych i przy dużym obciążeniu, co jest cechą maszyn budowlanych. Oba oleje (*HL* lub *HV*) wykazują ten sam przedział lepkości kinematycznej w zakresie $41 - 51 \text{ mm}^2/\text{s}$, zakres temperatur (płynięcia) od -24°C , temperatury zapłonu ponad 210°C oraz wskaźnikiem lepkości na poziomie minimum 90 [79]. Wytyczne do badania lepkości kinematycznej zawiera norma *PN-EN ISO 3104* oraz norma amerykańska *ASTM D445*. W zakresie samego wskaźnika lepkości, który bazuje na pomiarze lepkości kinematycznej w temperaturze 40 i 100°C należy zastosować kolejną normę tj. *PN ISO 2909:2009*.



Rys. 2.2. Zależność lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego *HL 32* (*ISO VG 32*) i *HL 46* (*ISO VG 46*) od temperatury, opracowanie własne na podstawie [41, 53]

Na charakterystyce lepkościowo-temperaturowej przedstawionej na rysunku 2.2 dodatkowo zaznaczono zakres pracy oleju hydraulicznego. Zgodnie z [21] zalecanym zakresem pracy oleju hydraulicznego jest przedział 35-55°C, chwilowo podczas uruchomienia maszyny budowlanej np. w warunkach jesiennie-zimowych temperatura oleju może być niższa i wynieść 0°C lub mniej. Zalecane jest nieprzekraczanie temperatury 75°C, co w wielu instalacjach hydraulicznych sygnalizowane jest zaświeceniem się czerwonej kontrolki na pulpicie operatora. Od temperatury 75°C następuje przyspieszone zużycie oleju, olej traci swoje właściwości smarne. Dobór oleju hydraulicznego wymaga pełnej wiedzy o zakresie pracy maszyny od temperatury oleju podczas rozruchu aż do temperatury maksymalnej. Dla różnych cieczy hydraulicznych lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C może być zbliżona, podczas gdy już w temperaturach 0°C lub niższej, która występuje w krótkim czasie – lepkości mogą istotnie się zmieniać i różnić się między olejami. W przypadku dużych wahań temperatury pracy (niska temperatura podczas rozruchu i wysoka temperatura pracy ciągłej tj. około 55-60°C), zgodnie z [68] należy zastosować olej o wysokim wskaźniku lepkości powyżej 105. Natomiast dla układów hydraulicznych pracujących w pomieszczeniu ogrzewanym, gdzie wahania temperatury są niewielkie, można stosować olej ze wskaźnikiem lepkości w przedziale 95-105. Nie dotyczy to układów w maszynach przemysłowych, gdzie wymagana jest wysoka dokładność, gdyż producent może zalecić wyższy wskaźnik lepkości.

W tej klasyfikacji celowo pominięto klasyfikację lepkościową olejów silnikowych wg. *SAE*, *API* i *ACEA*. Dla tych olejów zostały specjalnie przygotowane wytyczne i wymagania nie poruszone w niniejszej pracy doktorskiej ze względu na przedmiot badań tj. olej hydrauliczny wykorzystywany w maszynach budowlanych czy drogowych. Podsumowując należy podkreślić, że świadomość użytkowników maszyn i pojazdów z instalacjami hydraulicznymi jak i osób zajmujących się ich obsługą w odniesieniu do klasyfikacji olejowej i lepkości oleju ma bezpośrednie przełożenie trwałość zespołów hydraulicznych tj. przyspieszone ich zużycie, losowe uszkodzenia, a w konsekwencji na wzrost kosztów naprawy przed planowanym przeglądem.

Tab. 2.2. Klasy czystości oleju hydraulicznego, zgodnie z normami *ISO 4406* i *NAS 1638* [7]

Klasa czystości		Ilość zanieczyszczeń na rok*	Wymagana klasa czystości oleju dla danego zespołu			
ISO	NAS		Pompy i silniki	Zawory	Łożyska	Napędy
23/21/18	12		Olej bardzo zanieczyszczony. Bezwzględna wymiana oleju lub mikrofiltracja z czyszczeniem układu			
22/20/17	11	> 589 kg				
21/19/16	10					
20/18/15	9		zębate	zwrotne		liniowe (cylindry)
19/17/14	8	144 kg	łopatkowe, tłoczkowe	Proporcjonalne, grzybkowe	ślizgowe	
18/16/13	7				rolkowe	hydrostatyczne
17/15/12	6	36 kg				
16/14/11	5	17 kg	Zastosowania w lotnictwie, układy wysokociśnieniowe do 32 MPa z elementami proporcjonalnymi i dużym obciążeniem roboczym			
15/13/10	4					
14/12/9	3	7,5 kg				
13/11/9						
12/10/8	2		Bardzo precyzyjne układy hydrauliczne powyżej 32 MPa			
10/9/8						
10/9/7	1					
10/8/6						
9/8/6	0					
* Ilość zanieczyszczeń, jakie przechodzą przez pompę w ciągu roku przy wydajności 200 l/min, 18 h/dzień, 340 dni roboczych w roku						

* Ilość zanieczyszczeń, jakie przechodzą przez pompę w ciągu roku przy wydajności 200 l/min, 18 h/dzień, 340 dni roboczych w roku

W odniesieniu do trzeciego wymagania dla olejów hydraulicznych tj. ich czystości, występują cztery główne normy. Pierwsza to norma *ISO 4406:99*, która została opublikowana

przez Turecki Instytut Normalizacyjny (TSE) pod tytułem: Moc płynów hydraulicznych - Ciecze - Metoda kodowania poziomu zanieczyszczenia cząstkami stałymi. Druga norma to *SAE AS 4059 Aerospace*. Pełna nazwa tego standardu to: *SAE AS 4059 Płyny lotnicze – klasyfikacja czystości dla płynów hydraulicznych*. Norma ta określa klasy czystości dla zanieczyszczeń pyłowych płynów hydraulicznych i obejmuje metody raportowania odpowiednich danych. Norma ta została wycofana w 1963 roku. Od roku 1964 zaczęła obowiązywać trzecia norma to *NAS 1638*, która jest amerykańskim standardem w zakresie olejów dla przemysłu lotniczego. Norma ta została formalnie wycofana w 2001 roku. Ostatnia czwarta norma to *GOST 17216*, jest to rosyjska norma czystości olejów. Ze względu na prostą (jednoliczbową) klasyfikację czystości oleju w normie *NAS 1638* wiele branż w zakresie filtracji olejów i hydrauliki siłowej na przestrzeni kilku dekad przyzwyczało się do jej stosowania i jest nadal powszechnie używana. W tabelki 2.2 przedstawiono klasyfikację porównawczą czystości oleju hydraulicznego według normy *ISO 4406* i *NAS 1638*.

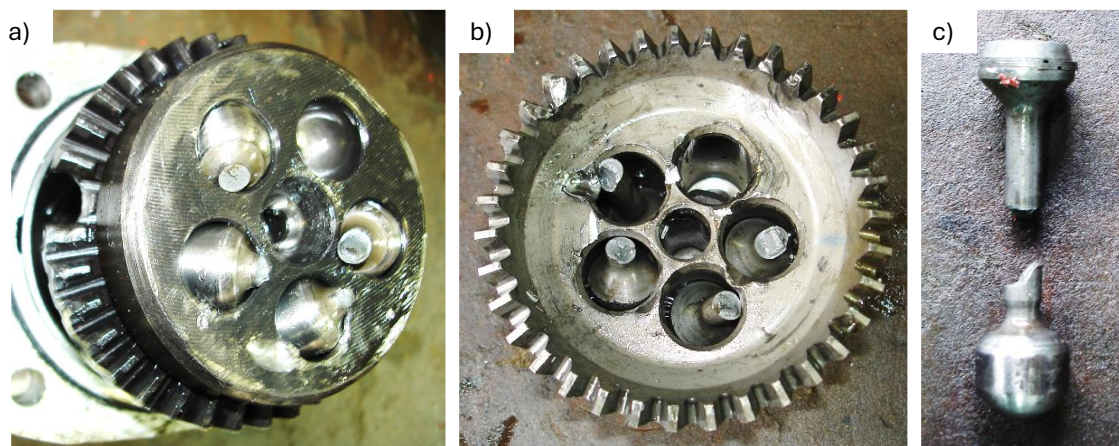
Zarówno norma *ISO 4406* jak i *SAE AS 4059* (wycofana w 1963 roku) odnoszą się do liczby cząstek identyfikowanych, jako zanieczyszczenie o wielkości większych niż 4 µm, 6 µm, 14 µm i 21 µm. Do oceny stanu oleju w rozumieniu jego zanieczyszczenia, wybiera się pierwsze 3 wielkości zanieczyszczeń (4, 6 i 14 µm), jakie znajdują się w 100 ml badanego oleju. Dla przykładu olej hydrauliczny, który po badaniu (zgodnie z *ISO 4406*) otrzymał wynik klasy czystości wynoszący 22/20/17, co odpowiada 11 klasie *NAS* oznacza, że w przeliczeniu na 1 ml było w nim zanieczyszczeń w liczbie [7, 96]:

- od 20 000 do 40 000 o rozmiarze powyżej 4 µm – kod 22,
- od 5 000 do 10 000 o rozmiarze powyżej 6 µm – kod 20,
- od 640 do 1300 o rozmiarze powyżej 14 µm – kod 17.

Dokładna liczba zanieczyszczeń określana jest w czasie badania na przenośnym analizatorze stanu oleju hydraulicznego, jak np. OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos szczegółowo opisanego w rozdziale z metodyką badań. Zarówno norma *ISO 4406* jak i *SAE AS 4059* (wycofana w 1963 roku) odnoszą się do liczby cząstek identyfikowanych, jako zanieczyszczenie o wielkości większych niż 4 µm, 6 µm, 14 µm i 21 µm. Olej, który po badaniach jak opisano wcześniej posiadał klasę czystości *ISO 22/20/17* (11 klasa *NAS*) jest zgodnie z tabelą 2.2 olejem pozaklasowym i wymaga wymiany lub mikrofiltracji w celu jego oczyszczenia. Dopuszczalną w eksploatacji klasą czystości oleju jest klasa *ISO 20/18/15* (9 klasa *NAS*). Obecnie wielu dostawców urządzeń zasilanych olejem hydraulicznym jak windy ładunkowe czy żurawie *HDS* w dokumentacja techniczno-ruchowych tych urządzeń wymagają utrzymania klasy czystości *ISO* na poziomie 17/15/12 (6 klasa *NAS*) co dopuszcza zgodnie z normą następującą liczbę zanieczyszczeń:

- od 640 do 1300 o rozmiarze powyżej 4 µm (kod 17),
- od 160 do 320 o rozmiarze powyżej 6 µm (kod 15),
- od 20 do 40 o rozmiarze powyżej 14 µm (kod 12).

Na przykładzie dwóch klas oleju hydraulicznego, 22/20/17 i 17/15/12 między którymi różnica wynosi 5 klas należy zaznaczyć, że kod 17 z liczbą zanieczyszczeń od 640 do 1300 występuje dla cząstek o największym rozmiarze, tj. powyżej 14 µm dla oleju pozaklasowego i dla cząstek powyżej 4 µm w oleju z klasą 17/15/12. Odnosząc się tylko do cząstek o największym rozmiarze, tj. 14 µm w oleju pozaklasowym jest ich około 30 razy więcej niż w oleju z zalecaną klasą czystości. Na podstawie pracy [11] zanieczyszczenia o wielkości od 4 do 6 µm są unoszone w oleju i w zależności od luzów występujących w zespołach hydraulicznych mogą bezpośrednio lub pośrednio wpływać na ich zużycie. Cząstki powyżej 14 µm są bezpośrednią przyczyną wzrostu tarcia, zużycia, blokowania, a w konsekwencji uszkodzenia zespołów hydraulicznych. Na rysunku 2.3 przedstawiono widok uszkodzonej wielotłoczkowej pompy hydraulicznej, w której doszło do zablokowania (zatarcia się) tłoczków w cylindrach, co w konsekwencji doprowadziło do ich pęknięcia na przewężeniu.

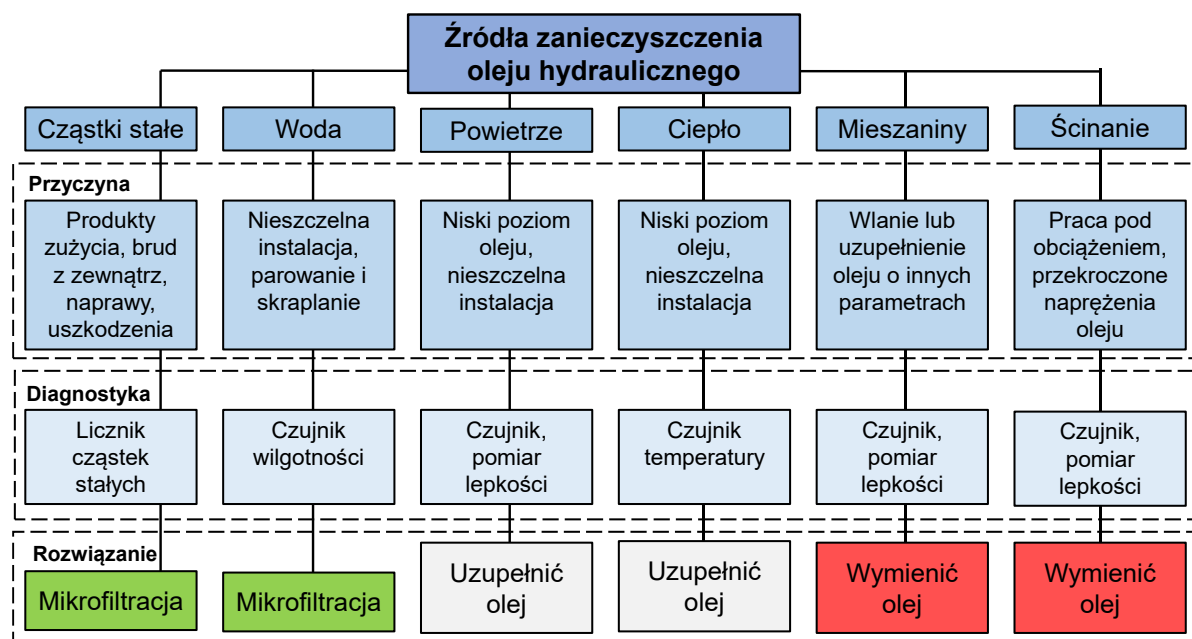


Rys. 2.3. Widok uszkodzonej pompy wielotłoczkowej: a), b) widok na wieniec tarczy łożyskowej oraz pęknięte tłoczki, c) widok pękniętego tłoczka w części środkowej [fot. S. Kołodziejcki]

Należy zaznaczyć, że uszkodzenia w zespołach hydraulicznych jak przedstawiono na rysunku 2.3 przez występowanie zanieczyszczeń stałych w oleju jest poprzedzone zatykaniem porów w filtrach i spadkiem przepływu w wyniku zamulania.

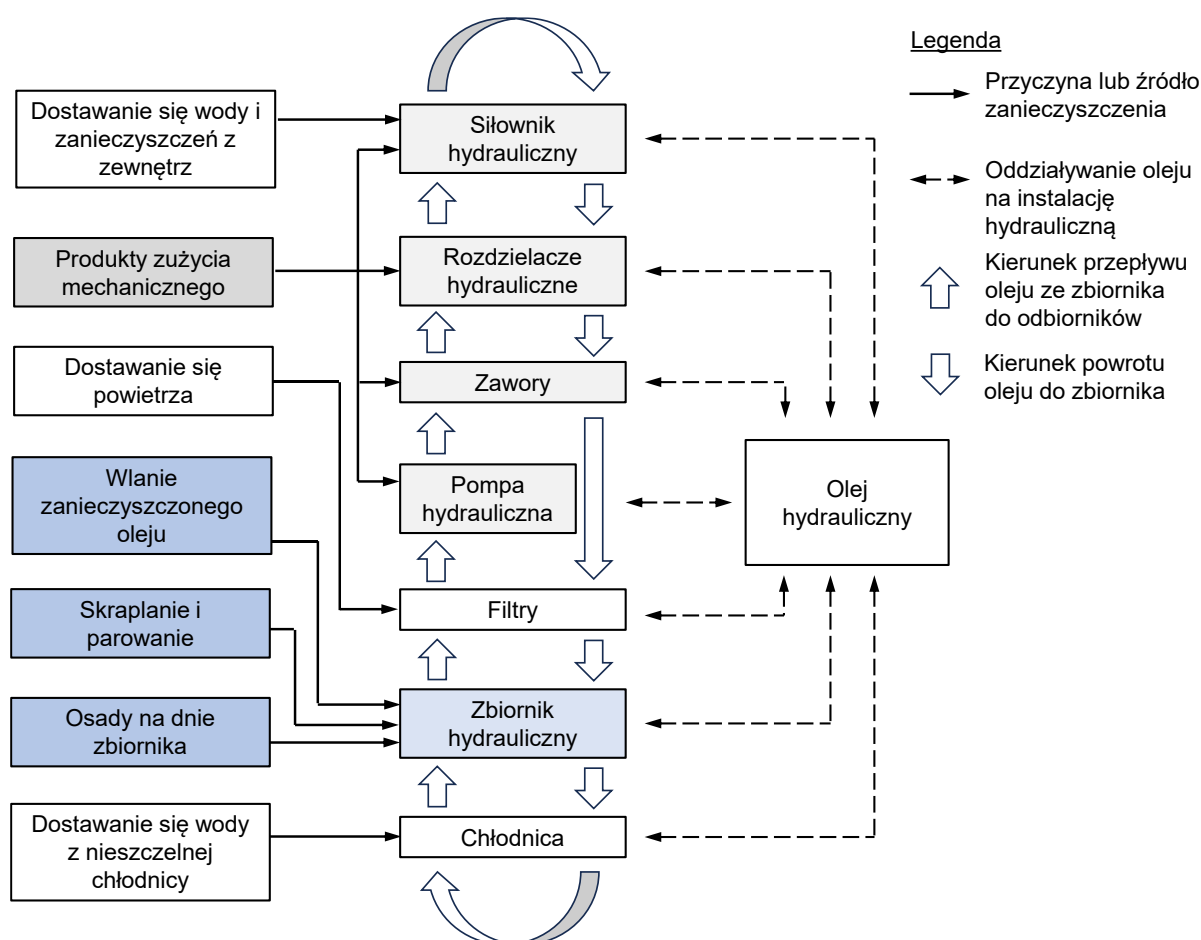
2.2. Zanieczyszczenie olejów

Na podstawie przykładowych zagranicznych prac naukowych autorów [9, 31], artykułów technicznych z tematyki hydrauliki siłowej [45, 78] oraz dokumentacji technicznych pojazdów [7, 53, 54] czy poradników technicznych dostawców wkładów filtrujących [i4, i5] źródłami zanieczyszczeń oleju są ciała stałe (brud, piasek), woda, powietrze oraz różnice temperatur, mieszaniny oraz warunki użytkowania instalacji hydraulicznej. Należy zaznaczyć, że olej hydrauliczny nie tylko pełni funkcję medium roboczego do zasilania (uruchamiania) silników liniowych czy obrotowych, ale również jest czynnikiem pośredniczącym w sterowaniu układu hydraulicznego. Na rysunku 2.4 przedstawiono podział czynników wpływających na zanieczyszczenie oleju hydraulicznego.



Rys. 2.4. Źródła zanieczyszczeń oleju hydraulicznego z uwzględnieniem ich przyczyn, diagnostyki stanu oleju oraz rozwiązania przywracającego klasę czystości oleju [7, 12]

Analizując schemat przedstawiony na rysunku 2.4 stwierdza się, że mikrofiltracją (separacją olejową) możliwe jest oczyszczenie oleju w przypadku zabrudzenia oleju cząstkami stałymi oraz z obecności wody. W przypadku pozostałych źródeł zanieczyszczeń możliwe jest niedopuszczenie do spadku czystości oleju poprzez kontrolowanie stanu filtrów odpowietrzających znajdujących się na zbiorniku olejowym, sprawdzenie stanu chłodnicy oleju (stopnia zanieczyszczenia), podaniu informacji o parametrach oleju na zbiorniku lub w miejscu wlewania oleju, aby nie dopuścić do błędu podczas uzupełniania oleju oraz poprzez użytkowanie układu hydraulicznego przez przeciążenia przy maksymalnych obrotach silnika napędzającego pompę hydrauliczną.



Rys. 2.5. Schemat sytemu hydraulicznego z oddziaływaniem oleju na zespoły układu hydraulicznego i źródłami zanieczyszczeń [7, 11]

Zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 2.5 wnioskuje się, że w układzie hydraulicznym rozpatrywanym z punktu stanu technicznego i czystości oleju głównym źródłem zanieczyszczeń są produkty zużycia mechanicznego pochodzącego z takich zespołów jak pompa czy silniki hydrauliczne, rozdzielacze, siłowniki i zawory hydrauliczne. Są to zespoły, w których mimo przepływu oleju dochodzi do zjawiska tarcia. Natomiast zespołem, w którym oprócz produktów zużycia mechanicznego zbierają się wszystkie zanieczyszczenia pochodzące z różnych źródeł to zbiornik hydrauliczny. Jest to element układu hydraulicznego, w którym dochodzi dodatkowo do zjawiska parowania i skraplania oleju jak również z punktu obsługi dochodzi lub może dochodzić do błędów w zakresie zastosowania niewłaściwego oleju. Na tej podstawie stwierdza się, że zbiornik hydrauliczny jest głównym miejscem, w którym występuje najwięcej zanieczyszczeń i wzrost klasy czystości oleju hydraulicznego.

2.3. Mikrofiltracja oleju hydraulicznego

W zastosowaniach praktycznych ocenę jakości filtrów przeprowadza się przy użyciu takich parametrów jak współczynnik filtracji β_x i skuteczność filtracji e_f opisanych równaniami (2.1) i (2.2). Współczynnik filtracji jest to stosunek liczby cząstek wyrażonych w mikrometrach znajdujących się w tej samej objętości oleju przed filtrem do liczby cząstek za filtrem [54].

$$\beta_x = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

gdzie: n_1 – liczba cząstek przed filtrem,
 n_2 – liczba cząstek za filtrem.

Skuteczność filtracji wyrażona jest w procentach i wyznaczona jest z różnicy cząstek przed jak i za filtrem do liczby cząstek przed filtrem.

$$e_f = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Kolejnym parametrem oceny jakości filtracji jest nominalna dokładność filtracji d_n , która definiuje najmniejszą zastępczą średnicę cząstek zatrzymywanych przez wkład filtracyjny. Producenci wkładów do mikrofiltracji podają różne wartości procentowe skuteczności filtracji od 99,50 do 99,95% [31, 54]. Odnosząc się krytycznie do zależności (2.1) i (2.2) należy podkreślić, że współczynnik filtracji β_x i skuteczność filtracji e_f nie określają średnicy zanieczyszczenia (cząstki stałej) jak definiowane jest to w normie *ISO 4406*. Natomiast wymienione zależności mogą być przydatne w ocenie całkowitej dla filtracji i jej skuteczności bez odnoszenia się do rozmiaru zanieczyszczenia.

Skuteczność filtracji olejowej również w sposób pośredni przeprowadza się w badaniach porównawczych membran z modyfikowaną powierzchnią w badaniach membran wykonanych z różnych materiałów. W takich badaniach stosuje się dwie wielkości, tj. absorpcję wody W_{up} i retencję oleju przez membranę $R_{membrane}$ opisane zależnościami (1.8) i (1.9) przedstawionymi w podrozdziale 1.3 pracy doktorskiej. W rozważaniach naukowych przedstawionych w pracy [129] skuteczność membran filtracyjnych dla różnych emulsji określona jest pomiarem kąta zwilżenia kropel na membranie. W oparciu o pomiary kąta zwilżenia membrany autorzy wyznaczyli względną hydrofilowość powierzchni membrany $RHPhil_{L2/L1}$ zanurzonej w dwóch roztworach i względną olejofobność powierzchni membrany $ROPhob_{L2/L1}$ opisanych zależnościami (1.11) i (1.12) w podrozdziale 1.3.

W praktyce skuteczność filtracji przeprowadza się przenośnymi analizatorami stanu oleju hydraulicznego, co przedstawia rysunek 2.6.



Rys. 2.6. Widok przenośnego analizatora stanu oleju: a) OPEComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos, b) Oil Sampler (IOS) firmy Parker [8, 80]

Przenośne analizatory stanu olejów i paliw posiadają zbliżoną budowę i zasadę działania. W zakresie ich możliwości, analizatory na podstawie pobranej próbki oleju dokonują pomiaru liczby zanieczyszczeń o różnych średnicach wykorzystując detektor (czujnik laserowy). Ten pomiar zliczonych zanieczyszczeń o średnicy powyżej 4 μm , 6 μm , 14 μm i 21 μm odnoszony jest do klasyfikacji kodów *ISO* normy 4406 i określana jest klasa czystości. Różnica w obecnie dostępnych analizatorach na rynku jest w przeliczaniu liczby zanieczyszczeń na jedną lub kilka norm czystości olejów i paliw. Oprócz klasy czystości analizatory wyznaczają w procentach wilgotność względną. Zagadnienie możliwości pomiarowych analizatorów stanu oleju hydraulicznego szerzej opisano w rozdziale z metodyką badań oleju hydraulicznego. Filtrację oleju prowadzi się tak długo na przenośnych stanowiskach aż uzyska się zadowalającą klasę czystości podczas badania na przenośnym laboratorium lub jeżeli kolejne mikrofiltracje nie obniżają klasy czystości oleju. W maszynach budowlanych i drogowych zalecane jest przez dostawców układów hydraulicznych utrzymanie w całym okresie użytkowania klasy czystości oleju na poziomie 17/15/12 wg *ISO 4406*, co przekłada się na 6 klasę *NAS*. Graniczną klasą czystości jest 20/18/15 według *ISO* (9 klasa *NAS*), która jest dopuszczalna w przypadku prostych układów hydraulicznych bez zaworów proporcjonalnych.

W sposób wizualny skuteczność mikrofiltracji ocenia się obserwując wygląd wkładów filtracyjnych oraz filtra magnetycznego. Na rysunku 2.7 przedstawiono widok wymiennych wkładów filtracyjnych w odniesieniu do nowego przed montażem do zasobnika maszyny filtracyjnej. Ze względu na szeroki zakres materiałów stosowanych na membrany filtracyjne, w przemyśle maszynowym najbardziej popularne i stosowane są membrany polimerowe wykonane z długowłóknistej celulozy, polipropylenu i polistru do zatrzymywania zanieczyszczeń o średnicy powyżej 1 μm oraz wody ze względu na hydrofilowe właściwości.



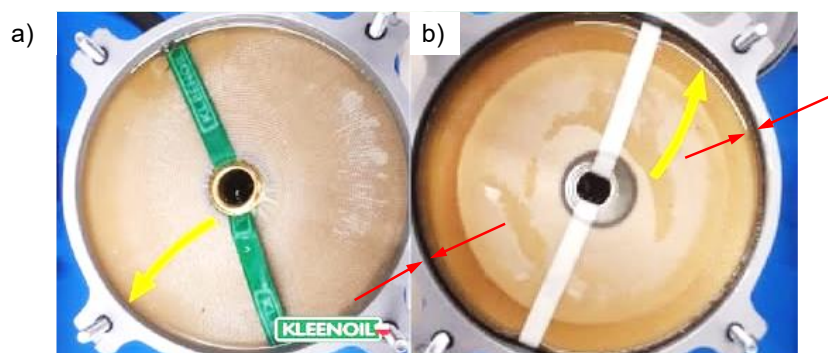
Rys. 2.7. Widok wkładów filtracyjnych firmy Kleenoil: a) nowy filtr [104], b), c) wkłady zanieczyszczone w różnym stopniu [105]

Na rysunku 2.8 przedstawiono widok filtra magnetycznego. Filtr magnetyczny montowany jest opcjonalnie za dopłatą w maszynach do mikrofiltracji. Jeżeli jest montowany to stosuje się centralny rdzeń magnetyczny Micromag z mocnym materiałem magnetycznym z ziem rzadkich, który generuje pole magnetyczne o wysokiej intensywności [62].



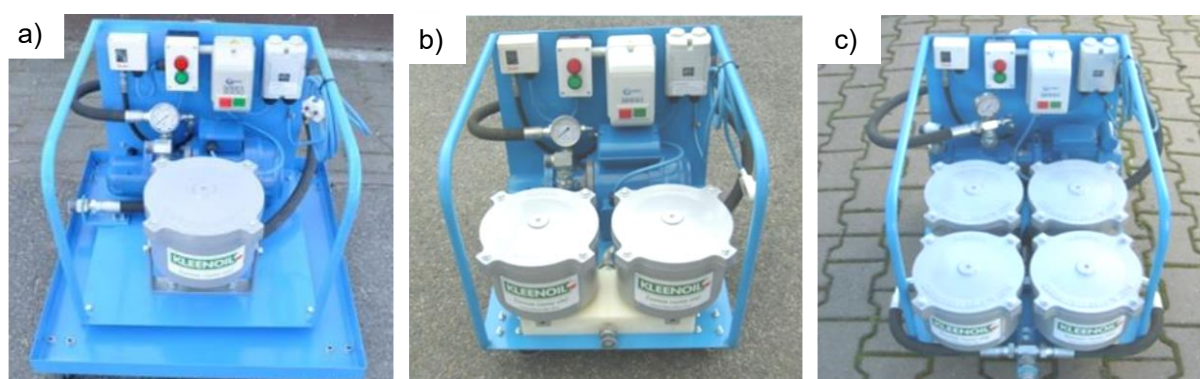
Rys. 2.8. Widok filtra magnetycznego z urządzenia MS2+MM5: a) przed filtracją w zamkniętej i przezroczystej obudowie, b) po filtracji z niewielkim zanieczyszczeniem, c) po filtracji z zanieczyszczeniem na większości powierzchni [62]

Należy podkreślić, że mimo zachowania procedury czyszczenia oleju na maszynie do mikrofiltracji i badania oleju na klasę czystości oraz zawartość wody – mikrofiltracja będzie nieskuteczna. Taka sytuacja ma miejsce przy użyciu wkładu filtracyjnego (zamiennika) o średnicy mniejszej niż średnica otworu zasobnika w urządzeniu *MS2+MM5*. Niewielka kilkumilimetrowa różnica w tych średnicach sprawia, że wkład filtracyjny wkładany jest do zasobnika bez wyczuwalnego oporu i nie uszczelnia się obwodowo na swojej średnicy względem ścianek zasobnika. Zważywszy, że proces mikrofiltracji jest procesem krzyżowego (stycznego) przepływu oleju wzdłuż membrany filtracyjnej w ciągłym obiegu, występowanie szczeliny względem wkładu, a ścianka zasobnika spowoduje przepływ oleju z pominięciem membrany. Na rysunku 2.9 przedstawiono widok wkładów filtracyjnych o różnej średnicy po włożeniu ich do zasobników maszyny filtracyjnej.



Rys. 2.9. Widok wkładów filtracyjnych zamocowanych w zasobnikach maszyny filtracyjnej Kleenoil *MS2+MM5*: a) wkład oryginalny, b) zamiennik z widocznym luzem [106]

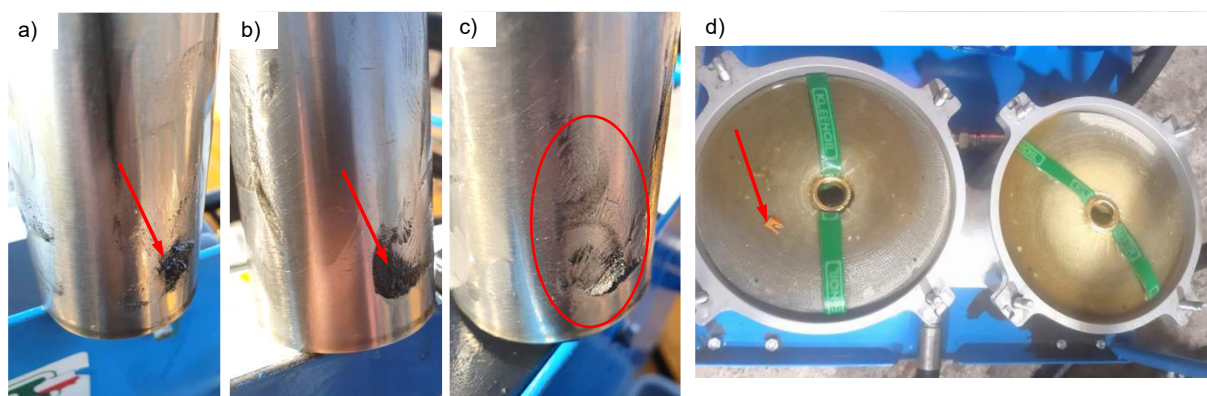
Oprócz oceny wizualnej stopnia zanieczyszczenia wkładów filtracyjnych, ocenę skuteczności mikrofiltracji można przeprowadzić w sposób wagowy. Producent wkładów filtracyjnych deklaruje, że ich chłonność wynosi 1,2 litra wody wraz z zanieczyszczeniami. W celu zwiększenia wydajności procesu mikrofiltracji możliwy jest zakup maszyny do mikrofiltracji oleju hydraulicznego, co przedstawia rysunek 2.10 z większą liczbą zasobników. Wówczas wydajność filtracji zwiększa się z 400 litrów na godzinę przy jednym zasobniku do 600 i 1200 l/h przy maszynie z dwoma i czterema zasobnikami.



Rys. 2.10. Widok przenośnej maszyny filtracyjnej Kleenoil: a) *MS1* z jednym wkładem filtrującym, b) *MS2* z dwoma wkładami filtrującymi, c) *MS4* z czterema wkładami filtrującymi [62]

W przypadku, kiedy kolejne mikrofiltracje nie zwiększają wagi wkładu filtracyjnego po jego osuszeniu można zakończyć czyszczenie oleju, a próbkę oleju zbadać na klasę czystości. W przypadku, kiedy wkład filtracyjny zwiększył swoją wagę o ponad kilogram należy wymienić go na nowy gdyż wykorzystano maksymalną jego chłonność. Wzrost masy o ponad kilogram wynika głównie z wchłonięcia, rozdzielania wody od oleju i zatrzymaniu jej na

filtrze oraz z zatrzymania zanieczyszczeń stałych niemetalicznych oraz metalicznych z grupy ferromagnetycznych, paramagnetycznych i diamagnetycznych. Na rysunku 2.11 przedstawiono przykład zanieczyszczeń stałych na filtrze magnetycznym oraz na wkładzie filtrującym.



Rys. 2.11. Widok zanieczyszczeń: a), b), c) stałych metalicznych na filtrze magnetycznym [62], d) stałych niemetalicznych na polimerowym wkładzie filtracyjnym [fot. S. Kołodziejski]

Zanieczyszczenia z grupy materiałów ferromagnetycznych to produkty zużycia takich części jak suwak w otworze rozdzielacza hydraulicznego, tłoczki w cylindrach pompy wielotłoczkowej, tłok w cylindrze hydraulicznym czy koła zębate w obudowie pompy zębatej. W zakresie metali nieżelaznych (metali kolorowych) produkty zużycia mogą pochodzić np. z przegubów kulowych osadzenia tłoczków na tarczy pompy lub silnika hydraulicznego. Zanieczyszczenia niemetaliczne to fragmenty zużytych uszczelek gumowych czy tworzyw jak kauczuk nitrylowy, poliuretan, silikon, teflon czy kompozyty tkaninowe.

Skuteczność procesu mikrofiltracji jak opisano w tym podrozdziale na podstawie prac [81, 82] można przeprowadzić w sposób ilościowy wykorzystując szereg zależności lub metodą jakościową obserwując stan membran filtracyjnych i filtrów magnetycznych. Możliwa jest również ocena wagowa wkładów filtracyjnych przed i po mikrofiltracji, co szczególnie odnosi się do wody rozdzielonej od oleju hydraulicznego. Należy podkreślić, że mikrofiltrację oleju prowadzi się dla wymaganego zakresu lepkości kinematycznej. W technice olejów, smarów i paliw lepkość kinematyczna opisana zależnością (2.3) nazywana jest również lepkością kinetyczną lub bezwzględną to zależność lepkości dynamicznej cieczy od jej gęstości.

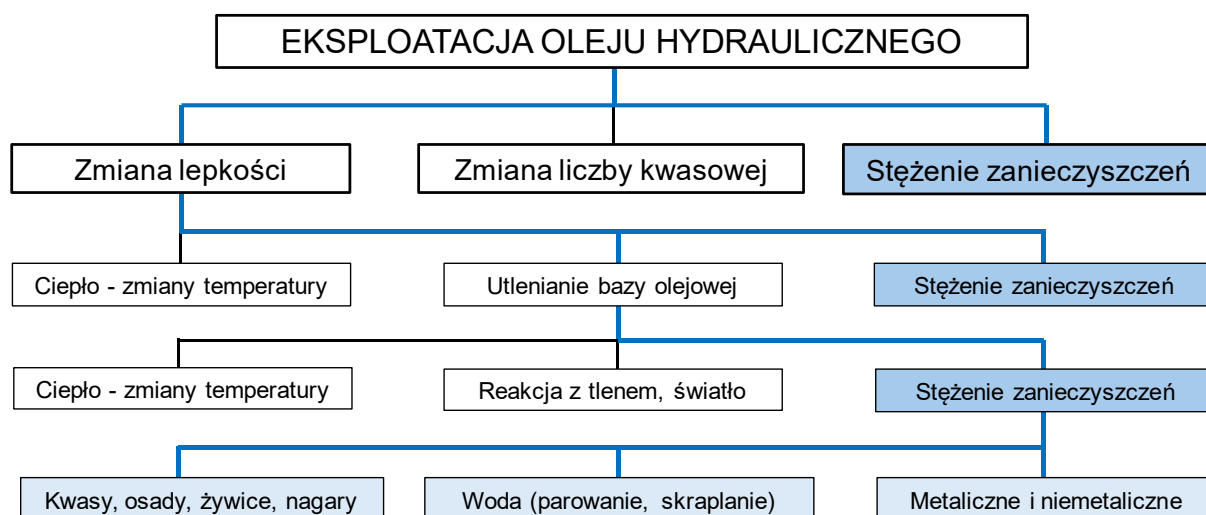
$$v = \frac{\eta}{\rho}, \quad cSt = \left[\frac{mm^2}{s} \right] \quad (2.3)$$

gdzie: η – lepkość dynamiczna,
 ρ – gęstość oleju.

W układzie CGS lepkość kinematyczna wyrażana jest w Stokes St, w praktyce używa się jednostki 100 razy mniejszej nazywanej centystokesem cSt. Profesjonalne podejście firm zajmujących się separacją olejową poprzez mikrofiltrację uwzględnia każdorazowe badanie oleju na klasę czystości po każdym procesie czyszczenia oleju oraz badanie oleju na spełnienie zakresu lepkości kinematycznej. Zarówno mikrofiltrację jak i badanie oleju na jego czystość i zawartość wody można przeprowadzić przy maszynie budowlanej, drogowej lub maszynie produkcyjnej, ze względu na niewielki rozmiar i masę stanowiska do mikrofiltracji oraz przenośnego laboratorium. W przypadku badania lepkości kinematycznej jest to bardzo trudne do przeprowadzenia w warunkach terenowych. Badanie lepkości kinematycznej przeprowadza się w ściśle określonych warunkach, jest to m.in. stała temperatura oleju wynosząca 40°C w czasie badania. Szczegółowe wytyczne do wyznaczenia lepkości kinematycznej zawarto w normie PN-EN ISO 3104 pod nazwą produkty naftowe, ciecze

przeźroczyste i nieprzeźroczyste. Ta norma określa pomiar lepkości kinematycznej metodą kapilarną. Najczęściej wykorzystuje się szklany wiskozymetr Ostwalda-Pinkiewicza. Uwzględniając dodatkowe wyposażenie do badania lepkości oleju metodą kapilarną oraz warunki temperaturowe, takie badania wykonuje się w laboratoriach na podstawie przekazanych próbek. W praktyce może się okazać, że olej będzie poddawany ciągłej okresowej mikrofiltracji dla utrzymania wymaganej klasy czystości oleju zgodnie z dokumentacją techniczno-ruchową, a będzie poza zakresem lepkości kinematycznej. Brak odniesienia wyników klasy czystości do lepkości kinematycznej oleju może spowodować, że mimo kolejnych mikrofiltracji olej nie będzie miał swoich właściwości smarnych, co przełoży się na prawidłowe funkcjonowanie układu hydraulicznego. W szerszym sensie, po określonym czasie użytkowania układu hydraulicznego wystąpi przyspieszone zużycie zespołów i prawdopodobieństwo uszkodzenia. Zgodnie z pracami [54] lepkość oleju uzależniona jest od wielu czynników, do których należy temperatura oleju, typ oleju (klasyfikacja *ISO VG*), wiek oleju czy zanieczyszczenie oleju i warunki pracy. Trzy ostatnie czynniki związane są z eksploatacją oleju. Zanieczyszczenia stałe i woda w oleju zmieniają lepkość oleju, na podstawie [27] woda obniża, zaś zanieczyszczenia stałe zwiększają lepkość kinematyczną oleju. Świadczy to, że w badaniach na klasę czystości olej przed i po mikrofiltracji konieczne jest równoległe badanie na lepkość kinematyczną.

Degradacja oleju hydraulicznego w procesie jego użytkowania jest efektem zmiany jego lepkości, liczby kwasowej i zawartości zanieczyszczeń oraz obecności wody. W przypadku lepkości oleju, jak już wspomniano wcześniej, jest jej związek do stężenia zanieczyszczeń. Badania opisane w [62] dowodzą, że podwyższona wartość liczby kwasowej oleju nie wpływa na wzrost agresywności korozyjnej gdyż kwasy organiczne należą do grupy słabych kwasów, a olej hydrauliczny ma bardzo dobre właściwości przeciwkorozyjne. Zastosowanie różnych dodatków uszlachetniających wynika z zastosowania i przeznaczenia oleju. Stąd rzeczywista zmiana lepkości jest głównie efektem wahań temperatury w szerokim zakresie od temperatury podczas rozruchu do wartości na granicy lub przekraczającej dopuszczalną temperaturę pracy oraz jest zależna od utleniania się bazy olejowej, co jest efektem starzenia się oleju. Na rysunku 2.12 na podstawie prac naukowych w tej tematyce i badań autora, przedstawiono schemat czynników wpływających na zmiany właściwości oleju hydraulicznego podczas jego eksploatacji



Rys. 2.12. Czynniki powodujące degradację oleju hydraulicznego w czasie jego użytkowania w maszynie lub pojeździe budowlanym i drogowym

Analizując schemat czynników powodujących degradację oleju hydraulicznego, należy wskazać, że zanieczyszczenia (stałe i ciekłe) są przyczyną m.in. utleniania się bazy olejowej, co bezpośrednio wpływa na zmianę lepkości oleju. Proces utleniania oleju hydraulicznego jest efektem reakcji chemicznych, a główną konsekwencją jest wzrost lepkości [100], powstawanie kwaśnych produktów reakcji oraz produktów nierozpuszczalnych, w postaci szlamów i osadów. Utlenianie się oleju powoduje w praktyce jego ciemnienie. Proces ten można kontrolować przez okresowe badanie lepkości kinematycznej oleju i badanie czystości w rozumieniu wyznaczenia klasy czystości wg. *ISO 4406* lub *NAS 1638*.

2.4. Wpływ zanieczyszczeń na zużycie układu hydraulicznego

Instalacje hydrauliczne składają się z wielu zespołów i elementów połączonych ze sobą przewodami hydraulicznymi. Zanieczyszczenia w oleju stanowią zakłócenie dla prawidłowej pracy układu. W pierwszej kolejności praca zespołów wykonawczych jak siłowniki i silniki jest nieefektywna (mniejsze siły, mniejszy moment obrotowy), z drugiej strony jest to zmniejszenie trwałości i niezawodności tych zespołów. Zanieczyszczenia w oleju są przyczyną zużycia ściernego, erozyjnego, zmęczeniowego oraz zamulania (obliteracji) kanałów, przewodów instalacji hydraulicznej. Zgodnie z pracą [7] są przyczyną około 75% awarii w układach hydraulicznych. Intensywność zużycia zależy od rozmiaru (średnicy) zanieczyszczenia, twardości, ilości zanieczyszczeń w oleju oraz od luzów między współpracującymi elementami układu hydraulicznego. Duże rozmiary ziaren zanieczyszczeń mogą powodować awarię i zatrzymanie pracy pompy, silnika czy rozdzielacza hydraulicznego, kiedy średnica zanieczyszczenia jest równa lub większa od luzów montażowych ruchomych elementów. Mniejsze rozmiary zanieczyszczeń powodują przyspieszone zużycie ściernie, erozyjne, korozyjne czy zmianę przekroju kanałów i przewodów hydraulicznych poprzez zamulanie. Zanieczyszczenia tak, tak jak zapisano w podrozdziale 2.3 zmieniają właściwości oleju (utlenianie) i wyciskanie oleju prowadzące do ścinania oleju. Na podstawie prac [45] największe zużycie (ściernie), co stanowi 90% uszkodzeń układów hydraulicznych powodują cząstki zanieczyszczeń o wymiarze stanowiącym grubość filmu olejowego. W układach wysokociśnieniowych są to zanieczyszczenia już o średnicy mniejszej od 5 μm , które zawierają się w przedziale luzu montażowego, co przedstawia tabela 2.3.

Tab. 2.3. Wartości luzów w elementach układów hydraulicznych [11]

Lp.	Zespół układu hydraulicznego	Podzespół	Wartość luzu [μm]
1	Pompa zębata	Koła zębata (luzы średnicowe i czołowe)	0,5÷5*
2	Pompa wielotłoczkowa	Tłoczek-cylinder (luz promieniowy)	0,5÷5*
3	Pompa łopatkowa	Końcówki łopat (grubość filmu)	0,5÷1
4	Rozdzielacz hydrauliczny Ø 10 mm	Para suwakowa (luz promieniowy)	5
5	Rozdzielacz hydrauliczny Ø 40 mm	Para suwakowa (luz promieniowy)	10
6	Serwowawór	Korpus-tuleja (luz promieniowy)	1÷3*
7	Zawór regulacyjny	Korpus-tuleja (luz promieniowy)	1÷23*
8	Wzmocniacz	Para suwakowa	3÷4*
9	Łożyska hydrostatyczne		1÷25
10	Łożyska ślizgowe	Grubość warstwy oleju	0,5*

* w zależności od średnicy, luz montażowy wynosi 0,05÷0,1% średnicy tłoczka lub suwaka

Analizując dane zawarte w tabeli 2.3 stwierdza się, że wartość luzów montażowych zawiera się w przedziale od 0,5 do 25 μm , co jest głównie uzależnione od średnicy suwaka

lub tłoczka. Układy wysokociśnieniowe mają luzy do 5 μm , a układy niskociśnieniowe 10-20 μm . Cząstki zanieczyszczeń o średnicy większej od 0,75 wartości luzu między współpracującymi elementami, zwiększają intensywność zużycia ściernego. W inżynierii mechanicznej przyjęła się zasada luzu montażowego l_m wałka względem otworu w obudowie, co przedstawia zależność (2.4).

$$l_m = (0,001 \div 0,002)D \quad (2.4)$$

gdzie: D – średnica wałka (tłoczka) w [mm].

Podany przedział (zakres) luzu montażowe nie wynika z przepisów czy norm, a dobierany jest na podstawie pasowania. W przypadku układów hydraulicznych współpracujące elementy dopasowuje się na zasadach pasowania luźnego zgodnie z normą *PN-EN ISO 286*. Dla pasowań luźnych stosuje się następujące zapisy pola tolerancji z klasą dokładności: *H7/g6* dla połączeń precyzyjnych (mały luz), *H7/f7* to standardowy montaż ze średnim luzem i *H8/f7* lub *H9/d9* z większym luzem dla łatwego i swobodnego montażu. Zgodnie z pracą [25] luz między np. suwakiem rozdzielacza, a obudową nie wynika tylko z zasad montażu (pasowania), a uzależniony jest jeszcze od warunków pracy i określany jest pojęciem luzu efektywnego l_e , co opisuje zależność (2.5).

$$l_e = l_m + \Delta l_c - \Delta l_T \quad (2.5)$$

gdzie: Δl_c – przyrost luzu w wyniku oddziaływania ciśnienia,
 Δl_T – przyrost luzu w wyniku różnicy rozszerzalności cieplnej elementów.

Luz efektywny nazywany również rzeczywistym zależy jest oprócz luzu montażowego l_m od odkształceń sprężystych elementów rozdzielacza w wyniku działania ciśnienia w układzie hydraulicznym Δl_c oraz od rozszerzalności cieplnej elementów rozdzielacza Δl_T . Działanie ciśnienia oleju w obudowie rozdzielacza hydraulicznego zwiększa luz całkowity. Zmiana ciśnienia w układzie hydraulicznym również będzie powodować zmiany luzu. Własności materiałowe pary suwak-obudowa rozdzielacza w wyniku różnicy temperatur, jaka występuje w czasie pracy układu hydraulicznego również zmienia (zmniejsza) luz efektywny. Suwaki rozdzielaczy hydraulicznych wykonane są ze stali, natomiast korpusy są najczęściej wykonane z żeliwa. Współczynnik rozszerzalności liniowej dla żeliwa wynosi $10 \cdot 10^{-6}$ 1/K, a dla stali $12 \cdot 10^{-6}$ 1/K [125]. Efektywny luz uwzględniający wpływ współczynników rozszerzalności liniowej opisuje zależność (2.6):

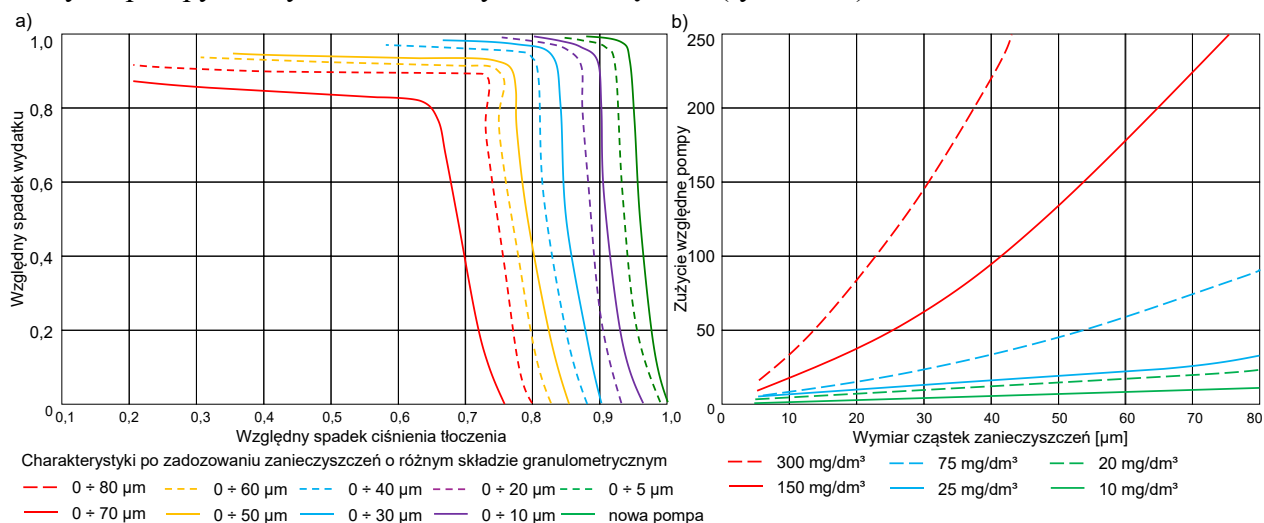
$$l_e = l_m + \Delta l_c + \beta_k \cdot D_k (T_k - T_o) - \beta_s \cdot D_s (T_s - T_o) \quad (2.6)$$

gdzie: β_k, β_s – współczynniki liniowej rozszerzalności liniowej korpusu i suwaka,
 T_k, T_s – temperatura korpusu i suwaka hydraulicznego,
 D_k, D_s – średnica otworu korpusu i średnica suwaka hydraulicznego,
 T_o – temperatura początkowa.

Różnice temperatur według pracy [45] w skrajnych przypadkach mogą wynosić 55-65°C, przy założeniu wzrostu temperatury do 50°C dla stalowego suwaka hydraulicznego o średnicy 10 mm, średnica zwiększy się o 6 μm , natomiast otwór w obudowie żeliwnego korpusu o 5 μm . Z prostego obliczenia różnicy ΔD_k i $\Delta D_s = D_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta T$ luz zmniejszy o wartość 1 μm . Autorzy również dowiedli, że na zmiany luzu efektywnego większy wpływ ma różnica temperatury niż działanie ciśnienia w układzie hydraulicznym.

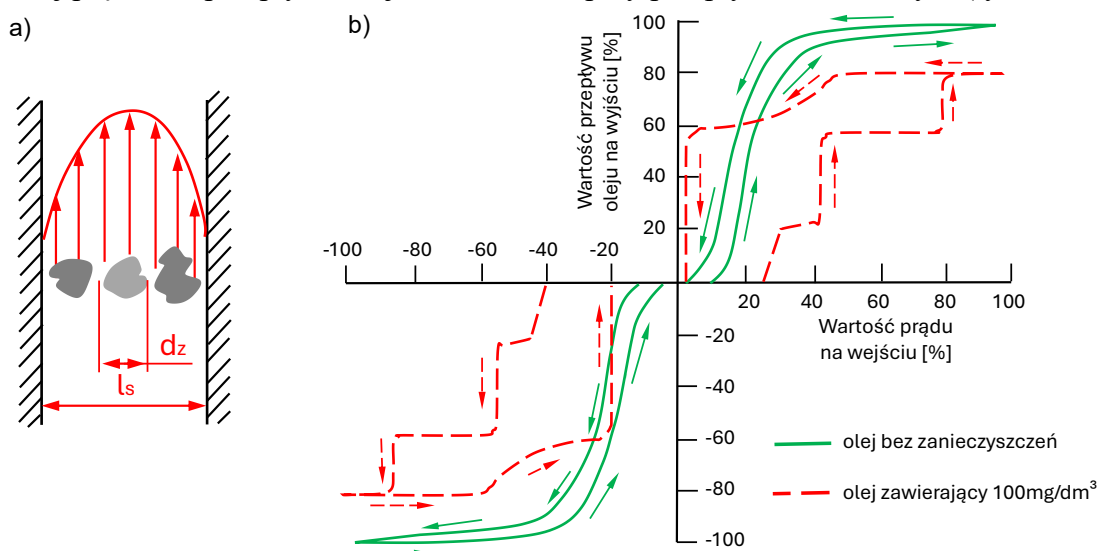
Zużycie ściernie pomp hydraulicznych zwiększa się wraz ze wzrostem wymiary (średnicy) i stężenia cząstek zanieczyszczeń. Według badań [10] cząstki o rozmiarze do 30 μm powodują 3 razy większą intensywność zużycia elementów pompy niż cząstki o średnicy do 5 μm . Podobna zależność występuje w przypadku stężenia zanieczyszczeń w oleju. Przy wzroście stężenia z 25 mg/dm^3 do 75 mg/dm^3 , zużycie wzrasta dwukrotnie, a do 150 mg/dm^3 ,

zużycie wzrasta pięciokrotnie. Na rysunku 2.13 przedstawiono zależność wpływu zanieczyszczeń na zmiany parametrów pompy i jej zużycie (rys. 2.13a) oraz zależność zużycia pompy od wymiaru zanieczyszczeń i stężenia (rys. 2.13b).



Rys. 2.13. Zależność: a) wpływu zanieczyszczeń na zmiany parametrów pompy i jej zużycie, b) wymiaru cząstek zanieczyszczeń na zużycie elementów pompy przy różnym stężeniu w oleju [11]

W wyniku zużycia ściernego powstają nowe cząstki zanieczyszczeń (najczęściej metalicznych), co nieliniowo zwiększa intensywność zużycia zespołów hydraulicznych. Cząstki zanieczyszczeń mniejszych od 0,75 wartości luzu między ruchomymi elementami powodują zgodnie z [11] zużycie erozyjne, które jest szczególnie intensywne przy dużym stężeniu zanieczyszczeń i dużej prędkości strumienia oleju hydraulicznego w kanałach i przewodach. Zanieczyszczenia o najmniejszym rozmiarze pochodzenia mineralnego i organicznego powodują obliterację szczelin (zmniejszenie ich przekroju), a w skrajnych przypadkach całkowitą blokadę przepływu. Cechą obliteracji jest jej występowanie tylko przy małej prędkości przepływu oleju w szczelinie przy przepływie laminarnym (rys. 2.14a).



Rys. 2.14. Rozkład a) prędkości oleju i cząstek zanieczyszczeń w szczelinie przy przepływie laminarnym, b) charakterystyka elektrycznego zaworu proporcjonalnego [11]

Mechanizm obliteracji polega na osadzeniu się na ściankach przewodu cząsteczek zanieczyszczeń, które mają mniejszą prędkość niż cząsteczki w środku strumienia oleju.

Zgodnie z pracą [11] obliterację powodują cząstki o średnicy nie większej niż 1/3 średnicy kanału (szczeliny).

Innym przykładem negatywnego działania zanieczyszczeń w układach hydraulicznych oprócz przyspieszonego zużycia jest zmiana charakterystyki zaworów. Na przykładzie zaworu proporcjonalnego, zanieczyszczenia w oleju poszerzają pętlę histerezy, osiągając zdolność przepływu maksymalnego tylko na 80%, a przepływ nie jest proporcjonalny do sygnału prądowego. Na rysunku 2.14b) przedstawiono charakterystykę elektrycznego zaworu proporcjonalnego. Należy również podkreślić, że zmniejszenie przekroju przewodów czy kanałów w zaworach przez zanieczyszczenia (ich zamulanie) powoduje wzrost siły potrzebnej do ich uruchomienia oraz utratę szczelności w wyniku przedostawania się zanieczyszczeń pod uszczelki, gdzie występuje ruch posuwisty lub obrotowy elementów.

2.5. Wilgotność oleju hydraulicznego

Poziom wilgoci w oleju hydraulicznym możliwy jest to sprawdzenia kilkoma metodami. Pierwszym podstawowym sposobem jest przeprowadzenie testu gorącej płytki (crackle test). To badanie wykorzystuje rozgrzaną do 160°C płytkę, na którą spuszcza się kroplę badanego oleju. Jeżeli w kontakcie kropli oleju z gorącą płytką pojawi się słyszalne skwierczenie (wyparowanie wody) świadczy to o występowaniu wody w oleju. Brak skwierczenia oznacza, że w oleju jest mniej niż 0,1% wody (1000 ppm). W przypadku pozytywnego testu gorącej płytki na obecność wody (wilgotny olej) w drugim etapie przeprowadza się dokładny pomiar metodą Karla Fischera *KF*, co przedstawia rysunek 2.15.

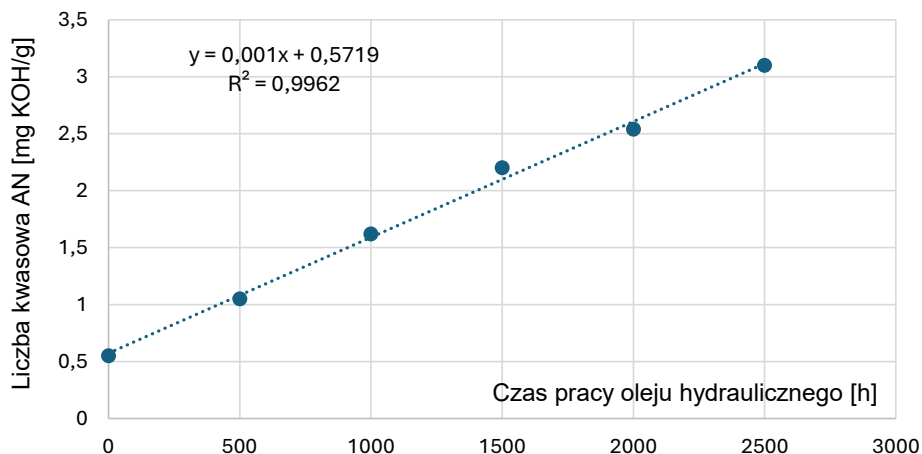


Rys. 2.15. Widok urządzenia do badania zawartości wody w oleju hydraulicznym metodą Karla Fischera [109]

Miareczkowanie metodą Karla Fischera pozwala na uzyskanie dokładności do 10 ppm wilgoci w badanym oleju i opiera się na reakcji jodu w wodzie w odczynie *KF*. Jod jest generowany elektronicznie przy anodzie i reaguje z wodą w próbce. Jod jest stosowany tak długo jak długo utrzymuje się w oleju. Na tej podstawie możliwe jest bezpośrednie określenie ilości wody, mierząc prąd potrzebny do elektrolizy [47]. Oznaczenie wody metodą *KF* może być wolumetryczne lub kulometryczne, bezpośrednie lub pośrednie, wynik podaje się w ppm. Metodyka badania oleju na zawartość wody w produktach naftowych, olejach podana jest w normie *ASTM D 6304*.

Oprócz wyznaczenia wilgoci w oleju również przeprowadza się pomiar liczby kwasowej i zasadowej. Liczba kwasowa (*AN/TAN*) jest miarą kwasowości w olejach przemysłowych. W metodzie tej, która przeprowadza się zgodnie z normą *ASTM D 664* podaje się ilość wodorotlenku potasu (*KOH*) dostarczonej do oleju w celu zobojętnienia kwasowości

w jednym gramie oleju. Wynik podaje się w mg KOH/g. Rosnąca liczba *AN* oznacza degradację oleju (pokost). Należy podkreślić, że niektóre dodatki jak siarka w oleju powodują wysokie początkowe wskazanie *AN* w świeżym oleju, np. 1,0 mg KOH/g stąd konieczna jest znajomość liczby kwasowej na nowym oleju. W przypadku olejów silnikowych mierzy się również liczbę zasadową *BN/TBN* ponieważ olej posiada dodatki (pakiet detergentów i dyspersantów) stosowanych do zobojętnienia kwasowości powstałej jako efekt uboczny procesu spalania. Zgodnie z [62] podwyższona liczba kwasowa nie przełożyła się na wzrost agresywności korozyjnej oleju. Wynika to dwóch powodów, kwasy organiczne należą do grupy słabych kwasów oraz na fakt, że olej hydrauliczny ma bardzo dobre właściwości przeciwkorozyjne. Liczba kwasowa w badanym oleju wzrastała liniowo z wartości 0,5 mg KOH/g do 3,0 mg KOH/g po przepracowaniu 2500 godzin pracy (rys. 2.16).



Rys. 2.16. Zależność liczby kwasowej *AN* badanego oleju hydraulicznego od czasu pracy [62]

W badaniach oleju hydraulicznego przed i po mikrofiltracji z użyciem przenośnych analizatorów stanu oleju nie wyznacza się wilgotności oleju w sposób bezpośredni w jednostkach ppm metodą Karla Fishera. Wilgotność oleju wyznacza się w sposób pośredni jako wilgotność względną *RH* i wyraża się w procentach, co przedstawia zależność (2.6).

$$RH = \frac{c_w}{c_{w, sat}} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

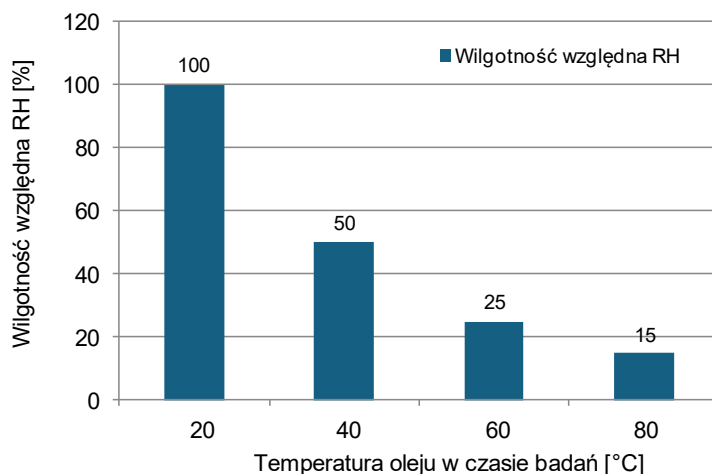
gdzie: c_w – rzeczywiste stężenie wody (ppm, mg/kg),
 $c_{w, sat}$ – zawartość wody przy nasyceniu 100%.

Wilgotność względna *RH* (z ang. relative humidity) to zależność rzeczywistej zawartości wody w badanym oleju do maksymalnej zawartości wody jaką da się rozpuścić w oleju uzyskując stan nasycenia. Należy podkreślić, że maksymalne nasycenie wody w oleju jest uzależnione w mniejszym stopniu od rodzaju oleju i dodatków uszlachetniających, a w największym stopniu zależy od temperatury oleju. Im wyższa jest temperatura oleju, tym więcej można rozpuścić w nim wody. Utlenianie się oleju, co jest również efektem jego starzenia się przy długim okresie jego użytkowania, również wpływa na wzrost nasycenia oleju wodą w stosunku do oleju bazowego (nowego). W instalacjach przemysłowych, ze względu na przebieg procesu produkcyjnego montowane są pojemnościowe czujniki wilgotności oraz czujniki temperatury do kontrolowania w sposób ciągły zawartości wody w oleju. Czujniki montowane są najczęściej w zbiornikach z olejem hydraulicznym lub na przewodach powrotnych. W tabeli 2.4 przedstawiono na przykładzie oleju hydraulicznego *HV 46* zależność nasycenia oleju wodą od temperatury, natomiast w tabeli 2.5 ukazano zależność procentowej wilgotności oleju na stopień nasycenia (wilgotności) oleju i wpływ na stan układu hydraulicznego.

Tab. 2.4. Punkt nasycenia wody w oleju hydraulicznym [73]

Lp.	Temperatura [°C]	Nasycenie wodą [ppm]	Uwagi
1	10	100–120	Bardzo niska rozpuszczalność, łatwe wydzielanie wolnej wody
2	20	150–200	Typowe warunki magazynowe
3	30	250–300	Początek stabilnego rozpuszczania wody
4	40	350–450	Typowa temp. pracy układów hydraulicznych
5	50	500–650	Woda głównie w postaci rozpuszczonej
6	60	700–900	Ryzyko korozji i degradacji dodatków
7	70	900–1200	Wysoka zawartość wody niewidoczna wizualnie
8	80	1200–1500	Bardzo wysoka rozpuszczalność, szybkie starzenie oleju

Jeżeli w czasie badań np. metodą Karla Fischera wyznaczono zawartość wody, która wyniosła 200 ppm, to w zależności od temperatury oleju w czasie badań, jego wilgotność względna zgodnie z zależnością (2.6) zawiera się w przedziale 15-100%, co również przedstawia wykres na rysunku 2.17.

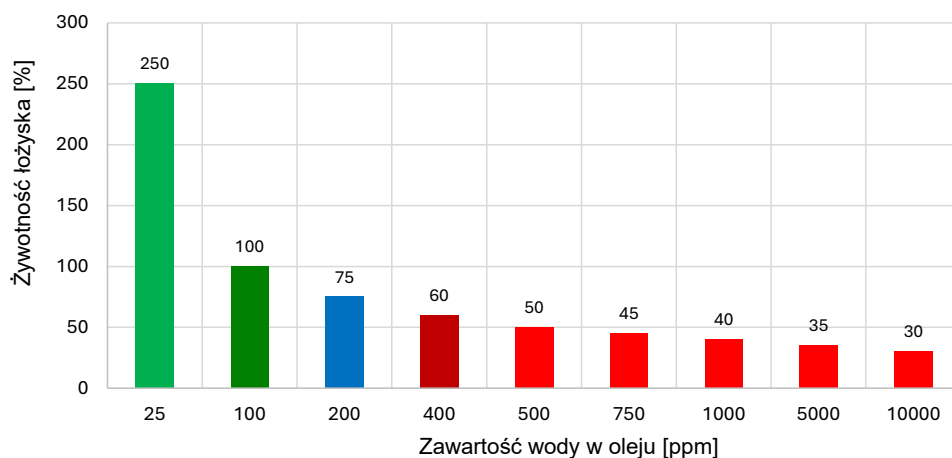
Rys. 2.17. Zależność wilgotności względnej RH od temperatury oleju przy 200 ppm H_2O [23]Tab. 2.5. Wpływ wilgotności względnej RH na stopień nasycenia oleju wodą oraz na stan układu hydraulicznego w maszynie budowlanej [23, 91]

Lp.	Wilgotność względna RH [%]	Uwagi
1	do 50	Woda całkowicie rozpuszczona, bezpieczny i akceptowalna ilość wody w oleju
2	od 50 do 70	Woda całkowicie rozpuszczona, przyspieszone starzenie się oleju hydraulicznego
3	od 70 do 100	Możliwe wydzielanie się wody z oleju lub tworzenie się emulsji, korozja układu hydraulicznego, zużycie kawitacyjne, pogorszone smarowanie, uszkodzenia pomp
4	100	Olej maksymalnie nasycony wodą, woda wydzielona, szybkie uszkodzenia zespołów hydraulicznych

Zakresy wilgotności względnej podane w tabeli 2.5 mogą nieznacznie się różnić w zależności od rodzaju oleju hydraulicznego, zgodnie z pracą [47, 107] zmianie może ulec drugi i trzeci zakres tj. od 50 do 80 oraz od 80 do 100. W innej pracy [110] przedstawiono przedział RH do 40%, 40-60% i powyżej 60%. W badaniach eksploatacyjnych (poligonowych) oleju hydraulicznego przyjęto, że od 70% wilgotności względnej

przekroczona jest dopuszczalna zawartość wody, która działa destrukcyjnie na układ hydrauliczny. Woda jest w całej instalacji hydraulicznej i konieczna jest pilna mikrofiltracja lub wymiana oleju na nowy również mikrofiltracją w celu usunięcia wody z układu po spuszczeniu oleju.

Ciekawe i ważne wyniki swoich badań opublikował Richarda E. Cantleya w 1977 roku w pracy [16]. Autor prowadził badania wpływu poziomu wody w oleju klasy *SAE 20* zawierającym dodatki przeciwkorozyjne i antyutleniające na żywotność łożysk tocznych (rys. 2.18). W tej pracy przedstawiony został wykres Cantley'a, z którego wynika, że żywotność łożyska można wydłużyć pięciokrotnie obniżając zawartość wody w oleju z 400 ppm do 25 ppm. Dla olejów hydraulicznych zgodnie z [49] zalecane jest utrzymanie ilości wody na poziomie do maksymalnie 250 mg/kg (250 ppm – 2,5% wody oleju), wartość dopuszczalna według [7] to 600 ppm, a przy przekroczeniu 600 ppm konieczne jest działanie w zakresie wymiany oleju lub jego mikrofiltracji.



Rys. 2.18. Wykres Cantley'a [16]

Na podstawie prac [7, 97, 108] przygotowano tabelę do praktycznych zastosowań podsumowując zagadnienia związane z wilgotnością oleju, liczbą kwasową, klasą czystości i lepkością oleju opisaną w poprzednich podrozdziałach. Tabelę przygotowano dla oleju hydraulicznego *HL* i *HV 46*, który w kolejnych rozdziałach wykorzystany był w badaniach wstępnych i zasadniczych.

Tab. 2.6. Zestawienie podstawowych parametrów wraz z wartościami do trójstanowej kontroli oleju hydraulicznego *HL* i *HV 46* [7, 97, 108]

Parametr	Poziom bazowy	Poziom ostrzegawczy	Poziom krytyczny
Klasa czystości ISO 4406	15/13/10 wstępna mikrofiltracji	17/15/12	19/17/15 ¹⁾
	16/14/11		20/18/15 ²⁾
Klasa czystości NAS 1638	4 lub 5	6	8 lub 9
Lepkość w 40°C [mm²/s]	46	41 – 51	poniżej 41 i powyżej 51
Liczba kwasowa [mg KOH/g]	0,5	1,0 – 1,5	powyżej 1,5
Wilgoć KF [ppm]	100	200 – 300	powyżej 300
¹⁾ Układy średnio i niskociśnieniowe			
²⁾ Proste układy hydrauliczne			

W badaniach laboratoryjnych olejów przemysłowych [84] dodatkowo wykonuje się jeszcze zawartość w ppm takich pierwiastków jak *Fe*, *Al*, *Si*, *Cu*, *O*, *Zn*, gęstość żelaza (*PQ*, *WPC*, *DR*) oraz degradację oleju (proces utleniania się oleju). W ostatnim przypadku

przeprowadza się spektroskopię w podczerwieni z transformatą Fouriera, metodą *FTIR* opisaną w normie *ASTM E 2412*. Jest to dokładna lecz kosztowa analiza, poprzez pomiar stopnia absorpcji podczerwieni podczas przechodzenia światła podczerwonego przez próbkę oleju. Metoda zgodnie z [84] pozwala wykryć degradację oleju, pokost oraz inne substancje zanieczyszczające, takie jak glikol, paliwo, sadzę, niewłaściwy rodzaj oleju itp.

2.6. Podsumowanie problematyki mikrofiltracji oleju hydraulicznego

Oleje dla przemysłu charakteryzują się różnym przeznaczeniem, które wymaga spełnienia różnych przepisów i norm. Z przeprowadzonej analizy literaturowej dla olejów przemysłowych stwierdza się, że wszystkie normy, można podzielić na trzy grupy odnoszące się do przeznaczenia oleju, lepkości i czystości. Ze względu na różne zastosowanie olejów (ich przeznaczenie) w tej grupie jest najwięcej norm, które wynikają z funkcjonowania instytucji zagranicznych specjalizujących się badaniach i wytycznych dla danego typu oleju. Dla lepkości podstawową normą jest *ISO 3448* nazywana również *ISO VG* dla lepkości kinematycznej oraz *ISO 2909* dla wskaźnika lepkości kinematycznej. W odniesieniu do czystości oleju jest to norma *ISO 4406*. Na podstawie przeglądu literaturowego z zakresu mikrofiltracji oleju hydraulicznego stwierdzono, że:

- 1) Źródłami zanieczyszczeń oleju są ciała stałe (metaliczne i niemetaliczne), woda, powietrze, ciepło oraz proces ścinania oleju podczas długotrwałej pracy układu pod obciążeniem.
- 2) Proces mikrofiltracji pozwala na usuwanie zanieczyszczeń stałych i wody z oleju, w pozostałych przypadkach instalacje hydrauliczne powinny być wyposażane w układy diagnostyczne w postaci czujników.
- 3) Źródłem zanieczyszczeń stałych metalicznych są współpracujące elementy w takich zespołach jak silniki, pompy hydrauliczne, rozdzielacze, zawory i siłowniki hydrauliczne.
- 4) Zbiornik hydrauliczny jest elementem układu, w którym zbierają się zanieczyszczenia stałe, wytrąca się woda w wyniku parowania i skraplania wody w wyniku podwyższonej temperatury oleju.
- 5) Dla olejów hydraulicznych zakres temperatury pracy to 35-55°C, przy wyższych temperaturach następuje przyspieszone zużycie oleju, olej traci swoje właściwości smarne.
- 6) Proces mikrofiltracji oleju powinien być prowadzony z równoległym badaniem klasy czystości oleju według normy *ISO 4406* na przenośnym analizatorze stanu oleju. Ocen wizualna wkładów filtracyjnych jest niewystarczająca, ze względu na brak informacji o klasie czystości przed jak i po badaniu.
- 7) Ocenę jakości filtracji można przeprowadzić wyznaczając współczynnik filtracji, skuteczność filtracji lub dokładność filtracji. Pierwsze dwa parametry nie określają średnicy zanieczyszczenia (cząstki stałej) jak definiowane jest to w normie *ISO 4406*.
- 8) Pełną skuteczność filtracji (separacji membranowej) można przeprowadzić przenośnym analizatorem stanu oleju. Dopuszczalną w eksploatacji klasą czystości oleju jest klasa *ISO 20/18/15* (9 klasa *NAS*). Wielu dostawców urządzeń zasilanych olejem hydraulicznym w dokumentacji techniczno-ruchowych wymaga utrzymania klasy czystości *ISO* na poziomie 17/15/12 (6 klasa *NAS*).
- 9) Klasa czystości oleju zgodnie z normą *ISO 4406* określa liczbę zanieczyszczeń powyżej 4, 6 i 14 µm, mimo, że analizatory stanu olej również podają klasę dla zanieczyszczeń powyżej 21 µm.
- 10) Zanieczyszczenia w oleju są przyczyną zużycia ściernego, erozyjnego, zmęczeniowego zespołów hydraulicznych oraz zamulania (obliteracji) kanałów czy przewodów instalacji hydraulicznej.

- 11) Zużycie elementów w instalacji hydraulicznej uzależnione jest od rozmiaru (średnic) i stężenia zanieczyszczeń w oleju hydraulicznym.
- 12) Na intensywność zużycia w układzie hydraulicznym z zanieczyszczonym olejem, również przyczynia się wartości luzów wynikających z montażu współpracujących ze sobą elementów. Całkowity luz między tymi elementami nie wynika tylko z luzu montażowego, który jest stały, ale również od działania ciśnienia co zwiększa luz oraz od przyrostu temperatury, gdzie ze względu na różne wartości współczynników rozszerzalności liniowej, luz całkowity zmniejsza się.
- 13) Układy wysokociśnieniowe mają luzy do 5 μm , a układy niskociśnieniowe 10-20 μm . Cząstki zanieczyszczeń o średnicy większej od 0,75 wartości luzu między współpracującymi elementami, zwiększają intensywność zużycia ściernego.
- 14) Cząstki zanieczyszczeń mniejszych od 0,75 wartości luzu między ruchomymi elementami powodują zużycie erozyjne, które jest szczególnie intensywne przy dużym stężeniu zanieczyszczeń i dużej prędkości strumienia oleju hydraulicznego w kanałach i przewodach.
- 15) Zanieczyszczenia o najmniejszym rozmiarze pochodzenia mineralnego i organicznego powodują obliterację szczelin (zmniejszenie ich przekroju), a w skrajnych przypadkach całkowitą blokadę przepływu. Cechą obliteracji jest jej występowanie tylko przy małej prędkości przepływu oleju w szczelinie.
- 16) Wilgotność oleju wyznaczoną w sposób bezpośredni metodą Karla Fischera i wyrażoną w ppm należy zawsze odnieść do temperatury oleju w czasie badania. Na tej podstawie możliwy będzie pomiar pośredni wilgotności względnej wyrażonej w procentach przy znajomości wartości maksymalnego nasycenia oleju wodą dla danej temperatury. Zalecane jest nieprzekraczanie 250 ppm wody w oleju, co przekłada się na 2,5% wody w oleju hydraulicznym
- 17) W zastosowaniach praktycznych na przenośnych analizatorach stanu oleju dokonywany jest pomiar wilgotności względnej oleju. Według różnych źródeł akceptowalny poziom wody w oleju hydraulicznym jest przy pomiarze *RH* do 40 lub do 50%. Wspomniana rozbieżność wynika z faktu, że braku informacji o typie i parametrach oleju. W zakresie 40-60 lub 50-70% wilgotności względnej oleju, rozpoczyna się proces starzenia się oleju i przyspieszone zużycie elementów układu hydraulicznego.

3. SFORMUŁOWANIE WŁASNEJ PROBLEMATYKI BADAWCZEJ

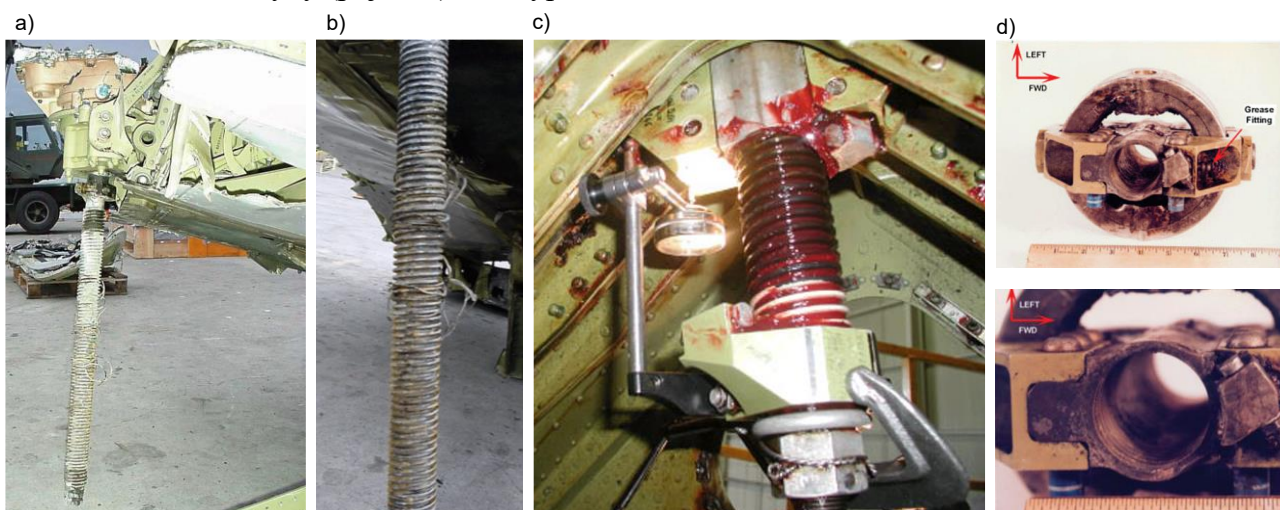
3.1. Przesłanki naukowo-badawcze własnej problematyki

W literaturze olejów przemysłowych mikrofiltracja lub szersze pojęcie – filtracja czy separacja olejowa poruszana jest i analizowana wielopłaszczyznowo. Te zagadnienia poruszane przez wielu zagranicznych i krajowych autorów podzielone są na grupy. Pierwszą grupę stanowią artykuły dotyczące zasadności stosowania separacji olejowej, ze zwróceniem uwagi na mechanizmy blokowania membran, czyszczenia membran, sposobu ich powlekania oraz zależności matematycznych niezbędnych w obliczeniach np. strumienia przenikania przez membranę czy oporu hydraulicznego. W drugiej grupie znajdują się artykuły dotyczące technik filtracji. Obecnie, rzadko w zależności od przeznaczenia filtracji stosuje się jedną technikę jak np. mikrofiltrację, ze względu na trudność w separacji mieszanin prowadzi się separację hybrydową łączącą różne techniki filtracji jak np. mikrofiltrację z ultrafiltracją czy mikrofiltrację z oczyszczaniem biologicznym. Trzecią grupę stanowią artykuły dotyczące rodzaju membran i ich zastosowania oraz badania tych membran w aspekcie skuteczności i dokładności filtracji. Wielu badaczy porównuje jedne membrany względem innych określając zalety i wady filtracji z użyciem membrany np. polimerowej lub ceramicznej. Ze względu na cenę oraz łatwość wykonania i modyfikacji membrany polimerowe są najczęściej stosowane jednak posiadają kilka ograniczeń jak np. szybkość zatykania porów i trudność w późniejszym ich czyszczeniu. Czwarta grupa artykułów to prace nad przykładami zastosowań membranowej separacji olejowej gdzie najczęściej poruszane jest zagadnienie w oczyszczaniu i neutralizacji ścieków zaolejonych, oczyszczania ropy naftowej i gazu z łubków czy zastosowań filtracji w przemyśle spożywczym. W tym zakresie badacze prezentują wyniki z badań skuteczności mikrofiltracji prowadzonej szeregowo destylacją membranową czy odwróconą osmozą. W przemyśle spożywczym czy chemicznym również przeprowadza się membranową separację w rozumieniu odwrotnym tj. w celowym pozyskiwaniu cennych składników jak np. proces pozyskiwania mikroalgi tj. samożywnych mikroorganizmów ze słodkiej wody.

W przypadku oleju hydraulicznego mającego zastosowanie w maszynach budowlanych, drogowych czy przemysłowych są publikowane nieliczne prace w zakresie stanu oleju hydraulicznego i zmiany jego właściwości po określonym czasie użytkowania. W Polsce zagadnienie mikrofiltracji jest nowym i jeszcze nie powszechnym zagadnieniem wśród podmiotów zajmujących się utrzymaniem maszyn czy pojazdów zasilanych olejem hydraulicznym. Podejście do okresowej wymiany oleju zgodnie z dokumentacją techniczną maszyny lub pojazdu jest jeszcze stosowane. Nieliczne zakłady produkcyjne w celu utrzymania najwyższego wskaźnika gotowości swoich maszyn, a tym samym najkrótszego czasu przestoju, wykonują okresową kontrolę lepkości oleju, zawartości zanieczyszczeń i wody w układzie hydraulicznym. Prace autorów nad zasadnością mikrofiltracji oleju niezależnie od jego wymian, co w pewnym sensie oprócz prezentacji swoich wyników, próbą uświadomienia użytkowników maszyn czy zakładów naprawczych to również reklama możliwości świadczenia usługi mikrofiltracji oleju na przenośnych maszynach filtracyjnych. Należy jednak podkreślić, że ocena stanu oleju nie jest wykonywana poprzez użycie przenośnych analizatorów stanu oleju na klasę czystości według *ISO*, *SAE* czy *NAS* oraz zawartość wody, stan ten oceniany jest na podstawie wzrokowej oceny zabrudzenia wkładu filtracyjnego i ilości metalicznych zanieczyszczeń na filtrze magnetycznym. Dalsze prace w tym zakresie pozwolą na prognozowanie czasu użytkowania oleju hydraulicznego do pierwszej wymiany kiedy olej całkowicie utraci swoje właściwości smarne, lepkość i inne parametry.

Przegląd literaturowy prac z tematyki membranowej separacji olejowej wykazał brak prac nad zużyciem układu hydraulicznego w ujęciu ilościowym przy zastosowaniu np. mikrofiltracji, brak informacji odnośnie wydłużenia żywotności oleju po zastosowaniu filtracji w granicach tolerancji lepkości kinematycznej oleju. Ponadto brakuje prac określających korzyści w ujęciu środowiskowym stosowania mikrofiltracji, w szczególności ilości generowania odpadów olejowych, kiedy filtracja nie jest stosowana. Prace dotyczące kwestii środowiskowych dotyczą takich zagadnień jak neutralizacja wycieków olejów lub paliw (ropy naftowej) do oceanu w wyniku awarii statków lub katastrof w transporcie morskim. W tych pracach przedstawiane są wyniki nad ograniczeniem rozprzestrzeniania się oleju, mechanicznego zbierania, zastosowania sorbentów czy chemicznego rozpraszania przez użycie dyspergatorów i biologicznej biodegradacji. Jednym z etapów tego złożonego procesu jest również zastosowanie mikrofiltracji do wstępnego rozdzielania oleju od zebranej mieszaniny.

Prowadzenie badań nad olejami przemysłowymi wpłynęłoby również na poprawę bezpieczeństwa i wyeliminowałoby przypadki ewentualnego uszkodzenia prowadzącego do uszkodzenia maszyny (pojazdu) lub wypadku z udziałem ludzi.



Rys. 3.1 Widok elementów trymera statecznika poziomego samolotu McDonnell Douglas MD-83, a), b) widok śruby z fragmentem statecznika po wciągnięciu na statek ratunkowy, c) widok śruby poprawnie smarowanej z czujnikiem zegarowym do kontroli luzu osiowego, d) widok nakrętki trapezowej [5]

Przykładem takim była katastrofa samolotu pasażerskiego linii lotniczej Alaska Airlines, lot 261 w dniu 31 stycznia 2000 r., w której zginęło 88 osób. Samolot McDonnell Douglas MD-83, który leciał z Puerto Vallarta (Meksyk) do Seattle w USA rozbił się około 2,7 mili morskiej na północ od wyspy Anacapa, u wybrzeży Kalifornii, nad Pacyfikiem. Raport amerykańskiej komisji badania wypadków lotniczych *NTSB* [5] wykazał, że katastrofa była wynikiem utraty kontroli nad pochYLENIEM samolotu w osi podłużnej. Bezpośrednią przyczyną było uszkodzenie mechanizmu trymera statecznika poziomego. Główny element tego mechanizmu, czyli nakrętka uległa całkowitemu zużyciu, zniszczony został również gwint na śrubie trapezowej (rys. 3.1). W efekcie statecznik poziomy przestał być mechanicznie kontrolowany. Próba odblokowania mechanizmu spowodowała gwałtowne przestawienie statecznika i przejście samolotu w stromy lot nurkowy. Badania komisji *NTSB* dowiodły, że mechanizm trymera był niewystarczająco smarowany, śledztwo w tej sprawie wykazało, że linie lotnicze wydłużyły okresy między smarowaniami w ramach własnego programu obsługowego. Zmiany te zostały zatwierdzone przez urząd nadzoru lotniczego. Brak odpowiedniego smarowania przyspieszył zużycie gwintu nakrętki. Dodatkowo wydłużono interwały kontroli luzu osiowego tego mechanizmu. Przyspieszone zużycie pozwoliłoby obsłudze samolotu na szybsze zdiagnozowanie stanu gwintu. Ponadto

konstrukcja samolotu nie posiadała mechanizmu dodatkowego do sterowania statecznikami samolotu. Ten przypadek dowodzi o wielu zaniedbaniach ze strony linii lotniczych i niewiedzy o zagadnieniach smarowania i kontroli stanu środków smarujących. Ze względów oszczędnościowych, wydłużono okres kontroli środka smarującego trymer statecznika poziomego oraz wydłużono kontrolę luzu osiowego podnośnika śrubowego. W efekcie utracono możliwość diagnozowania stanu gwintu podnośnika i tak już w wydłużonym okresie smarowania tego mechanizmu.

Kwestie związane z poprawą bezpieczeństwa w maszynach czy środkach transportu są zawsze poruszane na pierwszym miejscu [77]. Natomiast niniejsza praca doktorska również uwzględnia kwestię środowiskową w rozumieniu generowanych odpadów olejowych po okresowej wymianie oleju. Uwzględniając inne zagadnienia techniczne, organizacyjne i ekonomiczne, temat pracy również podyktowany jest przez:

1. Długi okres naprawy maszyn lub pojazdów z układami hydraulicznymi w wyniku zużycia ściernego. Ze względu na wielkość i czasami brak możliwości przywiezienia maszyny lub pojazdu do zakładu naprawczego (prace w górnictwie lub na żwirowniach) konieczny jest przyjazd pojazdu serwisowego do miejsca stacjonowania i pracy maszyny.
2. Trudność prawidłowego zdiagnozowania przyczyny awarii przez operatora maszyny lub pojazdu, co w przypadku przyjazdu pojazdu serwisowego i wykonania częściowego demontażu stwierdzona jest inna przyczyna uszkodzenia i ponowny wyjazd po nowy lub sprawny zespół.
3. Długi okres regeneracji elementów układu hydraulicznego w przypadku naprawy, a nie wymiany całego zespołu. Zakłady naprawcze po demontażu i weryfikacji stanu technicznego wysyłają zużyte części do innych podmiotów zajmujących się szlifowaniem, nakładaniem powłok galwanicznych (np. chromu technicznego) i innych operacji jak obróbka cieplno-chemiczna. Jest to powszechne po ponownym wykonaniu danego elementu w przypadku braku możliwości zakupu nowego lub zamiennika.
4. Maksymalne wykorzystanie takich zespołów układu hydraulicznego, których nie można już nabyć ze względu na krótkie serie produkcyjne maszyn lub pojazdów, w którym były zainstalowane.
5. Maksymalne skrócenie czasu wyłączenia maszyny lub pojazdu z użytkowania związanego z ich naprawą. Wieloletnie doświadczenie wielu firm wykazało, że profilaktyczne częste badanie i mikrofiltracje oleju hydraulicznego wydłużają czas bezawaryjnej pracy.
6. Złożoność układów hydraulicznych ze sterowaniem poprzez serwozawory czy zawory proporcjonalne wymaga wysokiej świadomości osób obsługujących takie maszyny lub pojazdy oraz wymaga spełnienia rygorystycznych wymagań, co do jakości oleju hydraulicznego, którego czystość w rozumieniu klasy czystości musi być niższa od samego układu roboczego.
7. Wysokie koszty naprawy układu hydraulicznego, zakupu oleju po jego wymianie oraz dodatkowe koszty środowiskowe z tytułu utylizacji.

3.2. Teza i cel pracy

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy z zakresu membranowej separacji olejowej, zanieczyszczeń olejów, badań olejów przemysłowych oraz zużycia elementów i zespołów układu hydraulicznego, uzyskano przesłanki pozwalające określić własną problematykę badawczą oraz sformułować następującą tezę rozprawy doktorskiej:

Możliwe jest opracowanie wytycznych techniczno-konstrukcyjnych do budowy dodatkowych układów do mikrofiltracji oleju hydraulicznego w instalacjach hydraulicznych maszyn i pojazdów budowlanych odzwierciedlonych regresyjnymi modelami stanu oleju hydraulicznego.

W pracy doktorskiej planuje się przedstawienie koncepcji rozbudowy przenośnych układów do mikrofiltracji oleju hydraulicznego do pracy w sposób ciągły dla maksymalnego wydłużenia czasu użytkowania oleju przy zachowaniu jego podstawowych właściwości smarujących.

W ramach realizacji pracy doktorskiej wyznaczono cele naukowe i użyteczne. Cele naukowe to:

- 1. Wyznaczenie charakterystyk porównawczych zużycia wybranych części układu hydraulicznego pracującego z olejem hydraulicznym z mikrofiltracją i bez niej.**
- 2. Opracowanie modeli do oceny stanu oleju hydraulicznego poddanego mikrofiltracji jak i bez mikrofiltracji.**

Cele użyteczne to:

- 1. Opracowanie założeń konstrukcyjno-technicznych do budowy instalacji hydraulicznej maszyny lub pojazdu dodatkowym układem do mikrofiltracji,**
- 2. Zbudowanie indywidualnego, zasilanego bezpośrednio z silnika maszyny lub pojazdu układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego w sposób ciągły, bez planowanych przestojów i dłuższego wyłączenia, z ciągłą kontrolą stanu oleju hydraulicznego,**
- 3. Zbudowanie algorytmów obsługowych dla wybranych maszyn budowlanych poddanych ciągłej filtracji oleju hydraulicznego**

Realizacja postawionych celów naukowych i użytecznych wymaga:

1. Wyznaczenia zależności klasą czystości oleju zgodnie z *ISO*, *NAS* czy *SAE* w zależności od czasu użytkowania oleju pracującego w układzie bez oraz z dodatkową mikrofiltracją.
2. Wyznaczenie zależności wilgotnością względną oleju hydraulicznego w funkcji czasu dla dwóch instalacji hydraulicznych (klasycznej i z dodatkową mikrofiltracją).
3. Wyznaczenia zależności lepkości kinematycznej olejów hydraulicznych pochodzących z dwóch typów instalacji w funkcji czasu pracy.
4. Wyznaczenia zależności zużycia wybranego zespołu hydraulicznego w wyniku oddziaływania zanieczyszczeń dla typowej instalacji hydraulicznej bez mikrofiltracji oraz dla układu z dodatkową mikrofiltracją w funkcji czasu.
5. Zastosowanie regresyjnych modeli zmiany klasy czystości oleju i wilgotności względnej w funkcji czasu.
6. Prognozowanie czasu osiągnięcia granicznej klasy czystości i wilgotności oleju, po którym należy przeprowadzić czyszczenie oleju.
7. Opracowanie modelu zmiany lepkości oleju zastosowanego w układzie klasycznym i z dodatkową mikrofiltracją.
8. Prognozowanie czasu użytkowania oleju do granicy dolnej i górnej lepkości kinematycznej w przypadku układu klasycznego i z dodatkową mikrofiltracją.
9. Opracowanie modelu zużycia wybranego zespołu układu hydraulicznego w funkcji czasu przy niezmiennych warunkach pracy układu hydraulicznego bez i z dodatkową mikrofiltracją.
10. Określenie dłuższego czasu użytkowania oleju w rozumieniu liczby wymian oleju wynikającej z klasycznego podejścia zapisanego w dokumentacji techniczno-ruchowej maszyny lub pojazdu i w odniesieniu do oleju pracującego na ciągłej mikrofiltracji.
11. Wyznaczenie kosztów środowiskowych związanych z utylizacją odpadów olejowych pochodzących z maszyny przy klasycznym podejściu do wymian zgodnie z *DTR* oraz przy zastosowaniu okresowej lub ciągłej mikrofiltracji.

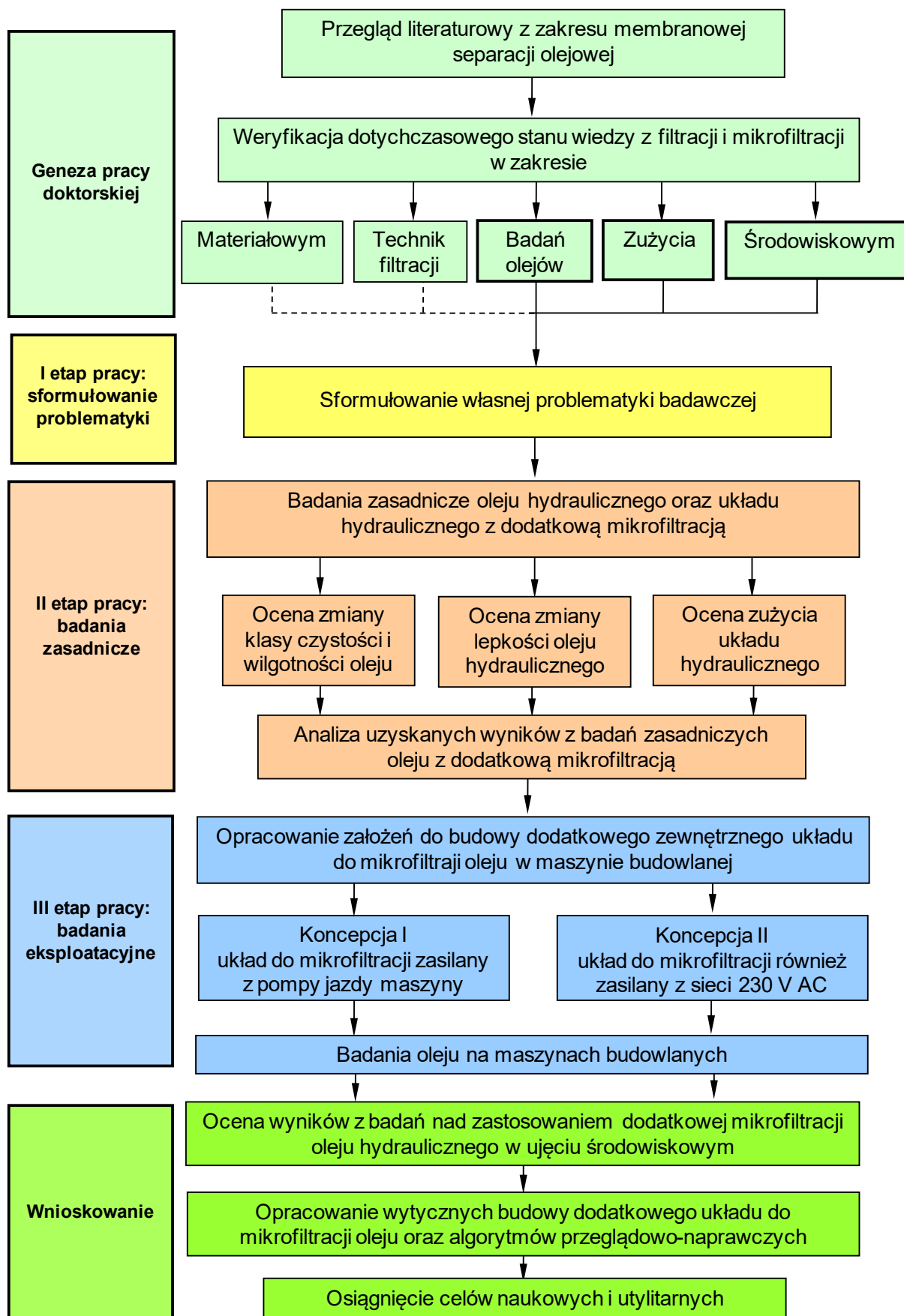
3.3. Zadania niezbędne do osiągnięcia celu pracy

Do realizacji postawionych celów pracy doktorskiej konieczne jest przeprowadzenie trzech badań zasadniczych. Pierwsze dotyczyć będą badań w zakresie klasy czystości i wilgotności oleju. Drugie badania zasadnicze to wyznaczenie lepkości kinematycznej olejów przy zdefiniowanych warunkach brzegowych. Trzecie badania zasadnicze dotyczyć będą stopnia zużycia elementów układu hydraulicznego, w którym olej poddawany jest mikrofiltracji w odniesieniu do układu klasycznego z podstawowymi filtrami hydraulicznymi. Każde z badań zasadniczych wymagać będzie użycia specjalistycznej aparatury zakupionej ze środków Programu Doktorat Wdrożeniowy, edycja 2022 na rozbudowę infrastruktury badawczej. Oprócz zakupionej aparatury wykonane zostało stanowisko badawcze, szczegółowo opisane w kolejnym rozdziale.

Poszczególne etapy badań i wyznaczone zadania, pozwalające na osiągnięcie celów naukowych i użytecznych niniejszej pracy doktorskiej, dodatkowo zostały przedstawione graficznie na rys. 4.2.

Realizacja postawionych celów naukowych i użytecznych zgodnie z wymienionymi etapami prac wpłynie na szereg korzyści gospodarczych jak i w głównej mierze na korzyści ekologicznych, do których można zaliczyć:

1. Zmniejszenie ilości zużytego oleju hydraulicznego przekazywanego następnie do procesu unieszkodliwiania tj. utylizacji.
2. Wydłużenie czasu pracy olejów hydraulicznych ponad zawarte w dokumentacjach techniczno-ruchowych cykle wymian.
3. Zwiększenie wydajności, w szczególności maszyn w procesach produkcyjnych bez wyłączenia na planowaną wymianę oleju.
4. Podwyższenia wskaźnika gotowości technicznej maszyn i pojazdów budowlanych czy drogowych.
5. Redukcje kosztów związanych z naprawą instalacji hydraulicznej, spowodowanej przez zanieczyszczenia występujące w oleju.
6. Zmniejszenie liczby przypadków błędnie wykonanych napraw w instalacji hydraulicznej, poprzez diagnostykę stanu oleju na posiadaną klasę czystości, wilgotność oraz lepkość oleju.



Rys. 4.1 Plan realizacji pracy doktorskiej

4. BADANIA NOWEGO OLEJU NA KLASĘ CZYSTOŚCI I WILGOTNOŚĆ

4.1. Cel badań olejowych

Celem badań olejowych jest określenie klasy czystości nowego oleju hydraulicznego i wilgotności względnej zgodnie z wymaganiami norm *ISO 4406:99* i *NAS 1638*. W przypadku normy *ISO* zanieczyszczenia stałe w oleju podzielone są na grupy w zależności od średnicy i są to zanieczyszczenia powyżej 4 μm , 6 μm , 14 μm i 21 μm . Natomiast do oceny stanu wybiera się pierwsze trzy klasy odnoszące się do średnicy zanieczyszczeń powyżej 4, 6 i 14 μm , jakie znajdują się w 100 ml badanego oleju. Mimo, że norma *NAS 1638* została wycofana w 2001 roku, niektóre przenośne laboratoria do badań olejowych na klasę czystości jeszcze dokonują przeliczenia klasy czystości względem wszystkich norm. Należy podkreślić, że mimo zastąpienia normy *NAS* inną normą *SAE AS4059*, która również jak norma *ISO* dzieli zanieczyszczenia na 4 klasy w zakresie średnic zanieczyszczeń, to ze względów praktycznych, norma *NAS* jest stosowana. Zaletą tej normy jest podanie jednej klasy czystości oleju od 0 do 12 klasy. W literaturze związanej z mikrofiltracją i badaniami czystości oleju podawane są tabele przeliczenia klasy czystości wg *ISO 4406* na klasę *NAS*.

4.2. Obiekt badań na klasę czystości i wilgotności oleju

Obiektem badań były olej hydrauliczny typu *HV 46* do układów hydrostatycznych, którego parametry przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Podstawowe parametry oleju *HV 46* [97]

Lp.	Nazwa	Wartość	Jednostka
1	Klasa lepkości ISO	ISO VG 46	–
2	Lepkość kinematyczna w 40°C	47,4	mm ² /s
3	Zakres lepkości kinematycznej w 40°C	41,4-50,6	mm ² /s
4	Zakres lepkości kinematycznej w 100°C	7-8,5	mm ² /s
5	Wskaźnik lepkości	140-155	–
6	Gęstość w 15°C	0,86–0,88	g/cm ³
7	Temperatura płynięcia	od -30 do -45	°C
8	Temperatura zapłonu	180-230	°C
9	Wydzielanie powietrza w temperaturze 50°C	8	min

Analizując dane zawarte w tabeli 4.1 można zauważyć, że olej hydrauliczny *HV 46* ma podaną lepkość kinematyczną w 40°C wynoszącą 47,4 cSt. Należy podkreślić, że jest to wartość umowna (uśredniona) gdyż według standardu *ISO VG* nominalna lepkość oleju powinna wynieść 46, zaś wielu producentów i dostawców [31] podaje lepkość kinematyczną w zakresie 45,0–47,0 cSt, a jeszcze inni podają wartość zawyżoną tak jak podano w tabeli 4.1 tj. 47,4 mm²/s. Odnosząc się ponownie do normy *ISO VG* dopuszczalna jest zmiana lepkości kinematycznej w przedziale od 41,4 do 50,6 mm²/s w temperaturze 40°C. W rozdziale 5 niniejszej pracy doktorskiej odniesiono się w sposób badawczy do rzeczywistej lepkości kinematycznej analizowanego oleju. Różnice w wartości lepkości kinematycznej mogą wynikać ze stosowania bazy olejowej z różnymi dodatkami uszlachetniającymi.

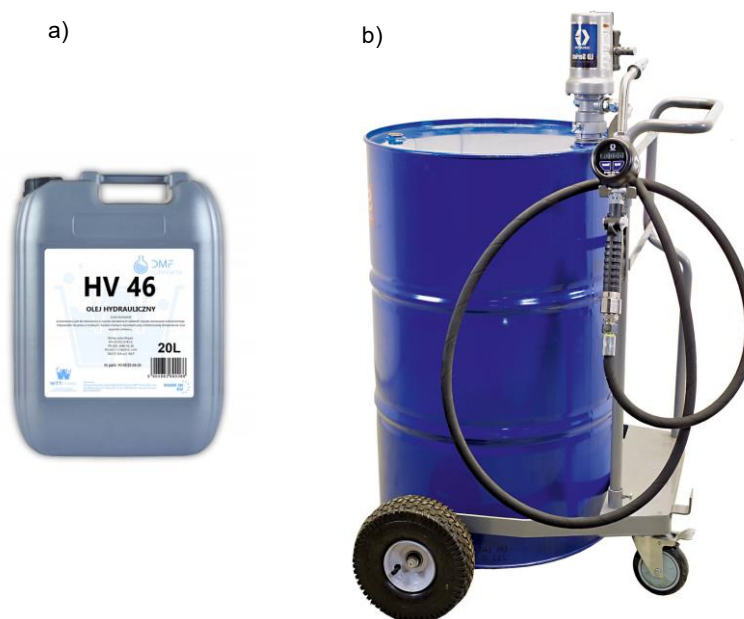
Olej hydrauliczny w zastosowaniach przemysłowych można nabyć w różnych formach opakowań, dostosowanych do potrzeb użytkownika, co przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Widok opakowań stosowanych do przechowywania oleju hydraulicznego: a) kanister 20 litrów [111], b) beczka 200 litrów [112], c) zbiornik IBC 1000 litrów [113]

Olej hydrauliczny *HV 46* najczęściej dostępny jest w beczkach stalowych o pojemności 200 litrów. Tego typu opakowanie wybierają głównie firmy przemysłowe oraz warsztaty naprawcze do maszyn budowlanych i drogowych. Oprócz metalowych beczek, olej *HV 46* dostępny jest również w dużych zbiornikach IBC w tzw. mauzerach o pojemności około 1000 litrów. To rozwiązanie stosuje się w zakładach przemysłowych o dużym zużyciu oleju. Alternatywą do wcześniej wymienionych opakowań oleju hydraulicznego są kanistry z tworzywa sztucznego o mniejszych pojemnościach, na przykład 5, 10 lub 20 litrów. Kanistry są wygodne dla użytkowników indywidualnych oraz małych firm. Są również stosowane przez warsztaty naprawcze świadczące usługi serwisu mobilnego podczas uzupełniania oleju w maszynach budowlanych. Można je łatwo transportować i przechowywać.

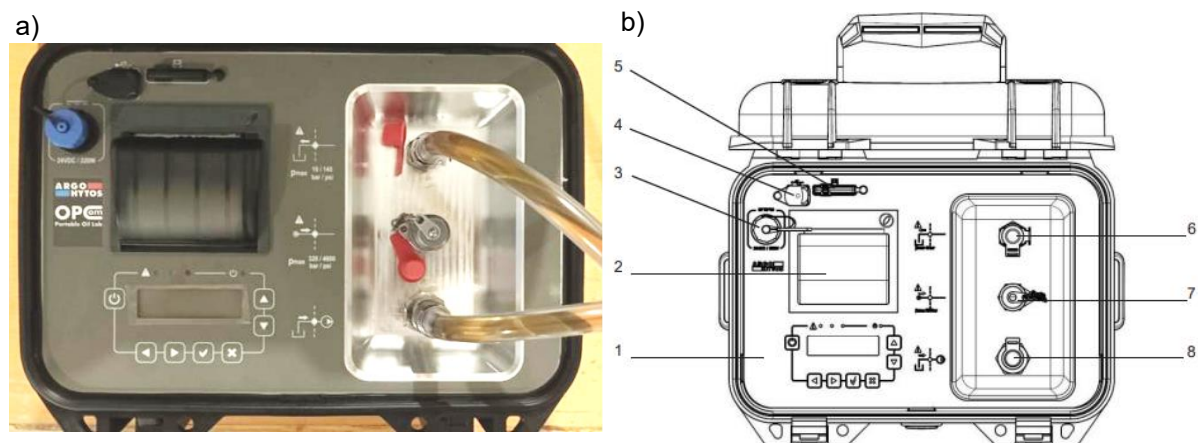
W badaniach na klasę czystości oleju i wilgotność względną wybrano nowy olej hydrauliczny *HV 46* znajdujący się w plastikowym kanistrze o pojemności 20 litrów oraz w stalowej beczce z zamocowaną pompą pneumatyczną, co przedstawiono na rysunku 4.2. Nie rozważano badania oleju w zbiorniku IBC 1000 litrów gdyż pobieranie oleju odbywa się w taki sam sposób jak przy beczce 200 litrowej za pośrednictwem zewnętrznej pompy.



Rys. 4.2. Widok oleju hydraulicznego do badań wg *ISO 4406* i *NAS 1638* znajdującego się w: a) kanistrze 20 litrów, b) beczce 200 litrów z pompką pneumatyczną [114]

4.3. Metodyka badań olejowych

Badania stanu oleju hydraulicznego przeprowadzono na przenośnym analizatorze OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos. Ogólną budowę analizatora oraz jego widok przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Widok: a) przenośnego analizatora stanu oleju OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos w czasie badań [fot. S. Kołodziejcki], b) ogólna budowa analizatora stanu oleju: 1- Control panel, 2- Drukarka, 3- Port ładowarki, 4- Złącze USB-B, 5- Gniazdo karty SD, 6- Złącze olej na zewnątrz, 7- Przewód ciśnieniowy Minimess M16x2, 8- wewnętrzny przewód ssący [8]

Zasada pracy analizatora polega na prześwietlaniu wiązką lasera przepływającego oleju przez monitor cząstek stałych. Zanieczyszczenia, które znajdują się w oleju blokują promień światła padający ze źródła na detektor. Następnie generowany jest sygnał proporcjonalnie do wielkości cząstek znajdujących się w oleju. Układ elektroniczny sygnał w celu przypisania wielkości cząstki w μm jak i ilości cząstek znajdujących się w oleju. W tabeli 4.2 przedstawiono mierzone parametry i wartości przez analizator oleju.

Tab. 4.2. Mierzone parametry i wartości urządzenia OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 [8]

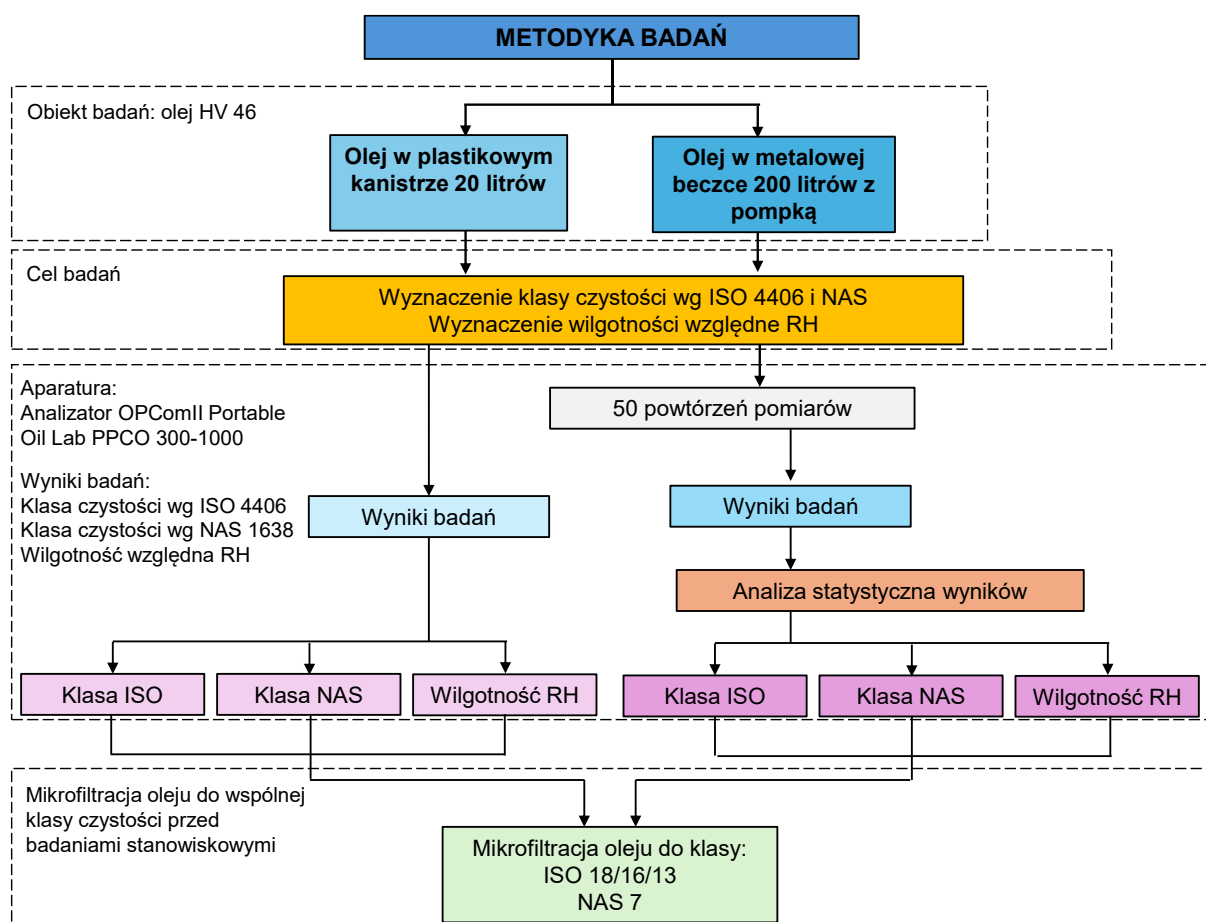
Lp.	Parametr	Symbol	Jednostka
1	Temperatura	T	$^{\circ}\text{C} / ^{\circ}\text{F}$
2	Względna przenikalność elektryczna	P	-
3	Przewodność	C	pS/m
4	Względna wilgotność oleju	RH	%
5	Poziom czystości zgodny z ISO	ISO	-
6	Poziom czystości według SAE	SAE	-
7	Poziom czystości według NAS	NAS	-
8	Poziom czystości według GOST	GOST	-
9	Koncentracja	Conc	p/ml
10	Wskaźnik przepływu objętościowego	Findex	ml/min

Ze względu na zastosowanie analizatora stanu oleju firmy ArgoHytos w badaniach olejowych w szeroko rozumianej inżynierii mechanicznej (układy hydrauliczne maszyn budowlanych, drogowych i przemysłowych) wybrano takie parametry jak poziom czystości wg *ISO* i *NAS*, wilgotność względną i temperaturę badanego oleju. W przypadku badań olejów w zastosowaniach elektrotechnicznych jak np. oleje transformatorowe, dodatkowo należy sprawdzić względną przenikalność elektryczną i przewodność (konduktywność) oleju. Podstawowe parametry techniczne urządzenia ArgoHytos przedstawiono w tabeli 4.3.

Tab. 4.3. Podstawowe parametry techniczne urządzenia OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 [8]

Lp.	Parametr	Zakres	Jednostka
1	Zakres ciśnień roboczych urządzenia	2,5-350	Bar
		35-5000	psi
2	Zakres lepkości roboczych	1-300	cSt
3	Temperatura pracy urządzenia	-30 do +80	°C
4	Temperatura pracy dla oleju	od +5 do +80	°C
5	Temperatura pracy dla paliwa	-20 do +70	°C
6	Wilgotność względna w zakresie	od 0 do 100	%

W badaniach na klasę czystości i wilgotność oleju przygotowano metodykę badań przedstawioną w sposób graficzny na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Schemat blokowy metodyki badań olejowych nowego oleju na klasę czystości i wilgotność względną, przed badaniami zasadniczymi

W badaniach tego samego typu nowego oleju hydraulicznego (HV 46) przechowywanego w dwóch rodzajach pojemników (zbiornik plastikowy i metalowy) przeprowadzono badania na klasę czystości i wilgotność względną. Wykonano 50 powtórzeń pomiarów dla oleju pochodzącego z metalowej beczki w celu określenia minimalnej liczby pomiarów w kolejnych badaniach olejowych. Założono, że ze względu na materiał beczki, warunki przechowywania (wewnątrz jak i na zewnątrz magazynu) i wpływ temperatury zewnętrznej, może dochodzić do parowania i skraplania wody wewnątrz beczki. Było to już opisywane w pracy autorów [57]. W podrozdziale 4.3.1 przedstawiono wyniki badań poprzedzone analizą

statystyczną. Dopiero po badaniach na oleju pochodzącego z metalowej beczki określoną liczbę powtórzeń dla oleju znajdującego się w plastikowym kanistrze.

4.3.1. Wyznaczenie minimalnej liczby pomiarów do oceny statystycznej

Przed zasadniczymi stanowiskowymi badaniami olejowymi (na czystość i lepkość oleju) przedstawionymi w rozdziale 5, wykonano serię 50 pomiarów oleju pobranego z metalowej beczki na klasę czystości i wilgotność względną do oceny statystycznej. Badanie miało na celu wyznaczenie minimalnej liczby powtórzeń, zapewniających otrzymanie wyników w zadowalającym przedziale ufności, wynoszącym 95%, przy przyjętym poziomie istotności, $\alpha=0,05$, przy którym obserwuje się najmniejszy współczynnik zmienności. Analizie statystycznej poddano liczbę zanieczyszczeń w jednym mililitrze oleju dla zanieczyszczeń powyżej 4, 6 i 14 μm , odpowiadającą im klasę czystości wg *ISO 4406* i wilgotność względną. Badania przeprowadzono w zamkniętym pomieszczeniu w temperaturze około 12°C starając się odzwierciedlić warunki, jakie występują w magazynach, w których przechowywane są produkty olejowe. Ze względu na brak formalnych zapisów, temperatury w zależności od pory roku czy dnia wahają się w przedziale 10-25°C mimo, że mogą być nawet niższe do 5°C i wyższe (ponad 30°C). Badania wykonywano jeden za drugim. Po zakończeniu pierwszego badania uruchamiano pompę na urządzeniu ArgoHytos do zasysania kolejnej porcji oleju do analizy.

W celu wyznaczenie minimalnej liczby powtórzeń, wykorzystano zależności na następujące wzory statystyczne [32, 48]:

1. Wartość średnia:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

gdzie: x_i – i-ta wartość zmiennej, $i=1, 2, \dots, n$,
 n – liczba powtórzeń ($n=50$).

2. Odchylenie standardowe:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

3. Przedział ufności:

$$\frac{1}{2} L_{1-\alpha} = t_{(n-1; 1-\alpha)} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

gdzie: t – współczynnik testu t-studenta,
 S – odchylenie standardowe,

4. Górna i dolna granica przedziału ufności:

$$\begin{aligned} x^{(+)} &= \bar{x} + \frac{1}{2} L_{1-\alpha} \\ x^{(-)} &= \bar{x} - \frac{1}{2} L_{1-\alpha} \end{aligned} \quad (4.4)$$

gdzie: $\frac{1}{2} L_{1-\alpha}$ – przedział ufności dla $\alpha=0,05$,

5. Współczynnik zmienności:

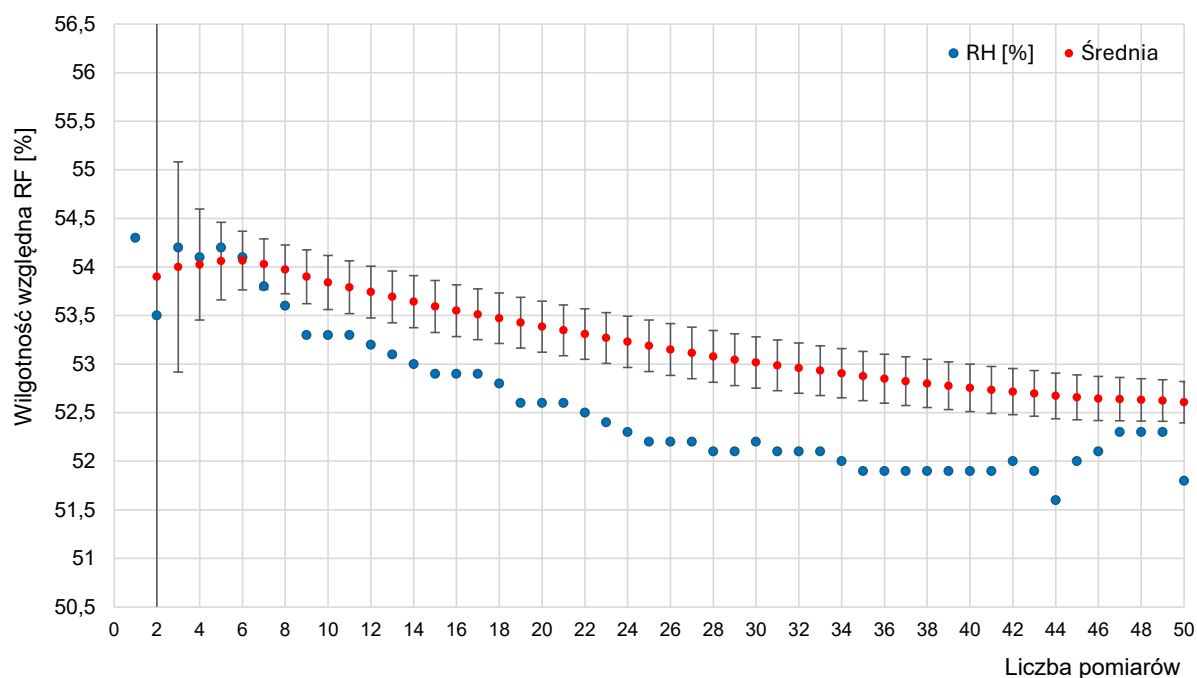
$$W = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Tab. 4.5. Wyniki obliczeń statystycznych wartości wilgotności względnej RH

Liczba pomiarów n	Średnia – $\bar{x}$	Odchylenie standardowe S	Poziom istotności α	Przedział ufności $\frac{1}{2} L_{1-\alpha}$	Górna granica przedziału ufności $x^{(+)}$	Dolna granica przedziału ufności $x^{(-)}$	Współczynnik zmienności $W[\%]$
1							
2	53,90	0,566	0,05	5,082	58,982	48,818	1,050
3	54,00	0,436	0,05	1,083	55,083	52,917	0,807
4	54,03	0,359	0,05	0,572	54,597	53,453	0,665
5	54,06	0,321	0,05	0,398	54,458	53,662	0,594
6	54,07	0,288	0,05	0,302	54,368	53,765	0,532
7	54,03	0,281	0,05	0,260	54,289	53,769	0,520
8	53,98	0,301	0,05	0,252	54,227	53,723	0,558
9	53,90	0,361	0,05	0,277	54,177	53,623	0,669
10	53,84	0,389	0,05	0,278	54,118	53,562	0,723
11	53,79	0,404	0,05	0,271	54,062	53,520	0,750
12	53,74	0,421	0,05	0,267	54,009	53,474	0,783
13	53,69	0,441	0,05	0,266	53,959	53,426	0,821
14	53,64	0,462	0,05	0,267	53,910	53,376	0,861
15	53,59	0,485	0,05	0,268	53,862	53,325	0,904
16	53,55	0,499	0,05	0,266	53,816	53,284	0,932
17	53,51	0,509	0,05	0,261	53,773	53,250	0,950
18	53,47	0,521	0,05	0,259	53,731	53,213	0,975
19	53,43	0,545	0,05	0,262	53,689	53,164	1,019
20	53,39	0,561	0,05	0,263	53,648	53,122	1,051
21	53,35	0,573	0,05	0,261	53,609	53,087	1,075
22	53,31	0,588	0,05	0,261	53,570	53,048	1,103
23	53,27	0,605	0,05	0,262	53,531	53,008	1,135
24	53,23	0,624	0,05	0,263	53,493	52,966	1,172
25	53,19	0,644	0,05	0,266	53,454	52,922	1,212
26	53,15	0,660	0,05	0,267	53,417	52,883	1,243
27	53,11	0,673	0,05	0,266	53,381	52,849	1,267
28	53,08	0,688	0,05	0,267	53,345	52,812	1,296
29	53,04	0,699	0,05	0,266	53,311	52,779	1,318
30	53,02	0,704	0,05	0,263	53,280	52,754	1,328
31	52,99	0,712	0,05	0,261	53,248	52,726	1,343
32	52,96	0,717	0,05	0,259	53,218	52,701	1,355
33	52,93	0,722	0,05	0,256	53,189	52,677	1,364
34	52,91	0,729	0,05	0,254	53,160	52,652	1,377
35	52,88	0,738	0,05	0,253	53,131	52,624	1,395
36	52,85	0,745	0,05	0,252	53,102	52,598	1,410
37	52,82	0,751	0,05	0,250	53,075	52,574	1,422
38	52,80	0,756	0,05	0,248	53,048	52,552	1,432
39	52,78	0,760	0,05	0,246	53,023	52,531	1,439
40	52,76	0,763	0,05	0,244	52,999	52,511	1,445
41	52,73	0,765	0,05	0,241	52,976	52,493	1,450
42	52,72	0,764	0,05	0,238	52,955	52,479	1,449
43	52,70	0,765	0,05	0,235	52,933	52,462	1,451
44	52,67	0,774	0,05	0,235	52,908	52,437	1,469
45	52,66	0,772	0,05	0,232	52,890	52,426	1,465
46	52,65	0,767	0,05	0,228	52,874	52,418	1,457
47	52,64	0,761	0,05	0,223	52,862	52,415	1,445
48	52,63	0,754	0,05	0,219	52,850	52,412	1,433
49	52,62	0,748	0,05	0,215	52,839	52,410	1,421
50	52,61	0,749	0,05	0,213	52,821	52,395	1,424

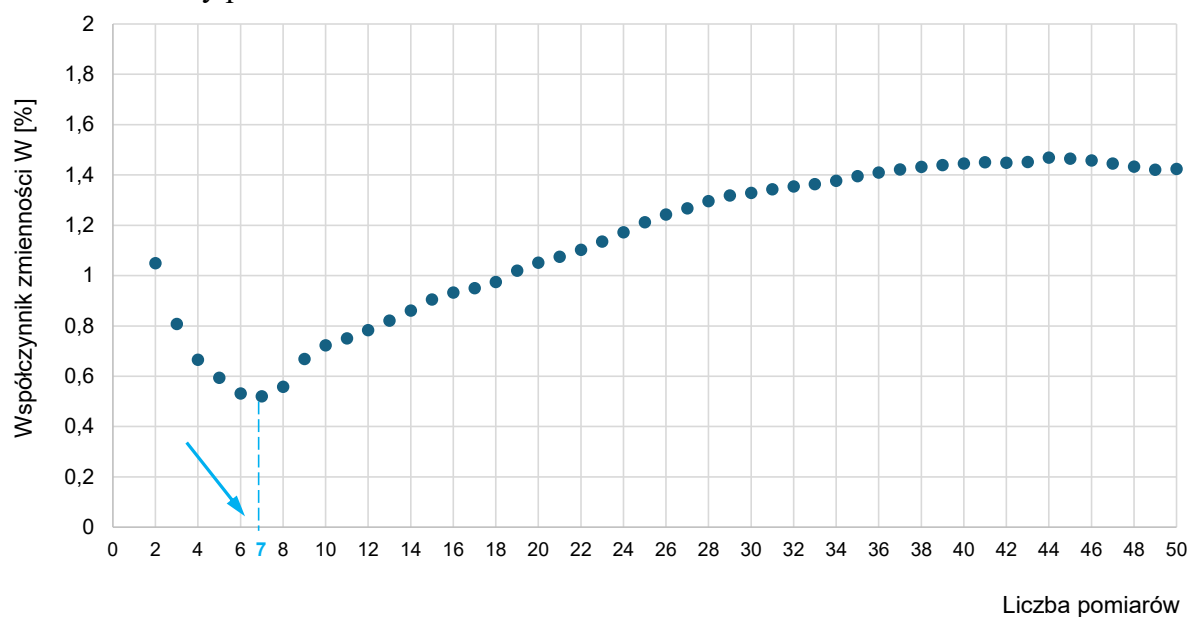
Po zastosowaniu zależności (4.1-4.5), otrzymano wyniki z obliczeń statystycznych z pomiaru liczby zanieczyszczeń powyżej 4, 6 i 14 μm , wyznaczonej klasy czystości wg ISO 4406 i wilgotności względnej. W tabeli 4.5 przedstawiono wyniki dla wilgotności względnej.

Na rysunku 4.5 przedstawiono zmiany wilgotności względnej oraz wartość średnią z 50 pomiarów z uwzględnieniem górnej i dolnej granicy przedziału ufności przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$.



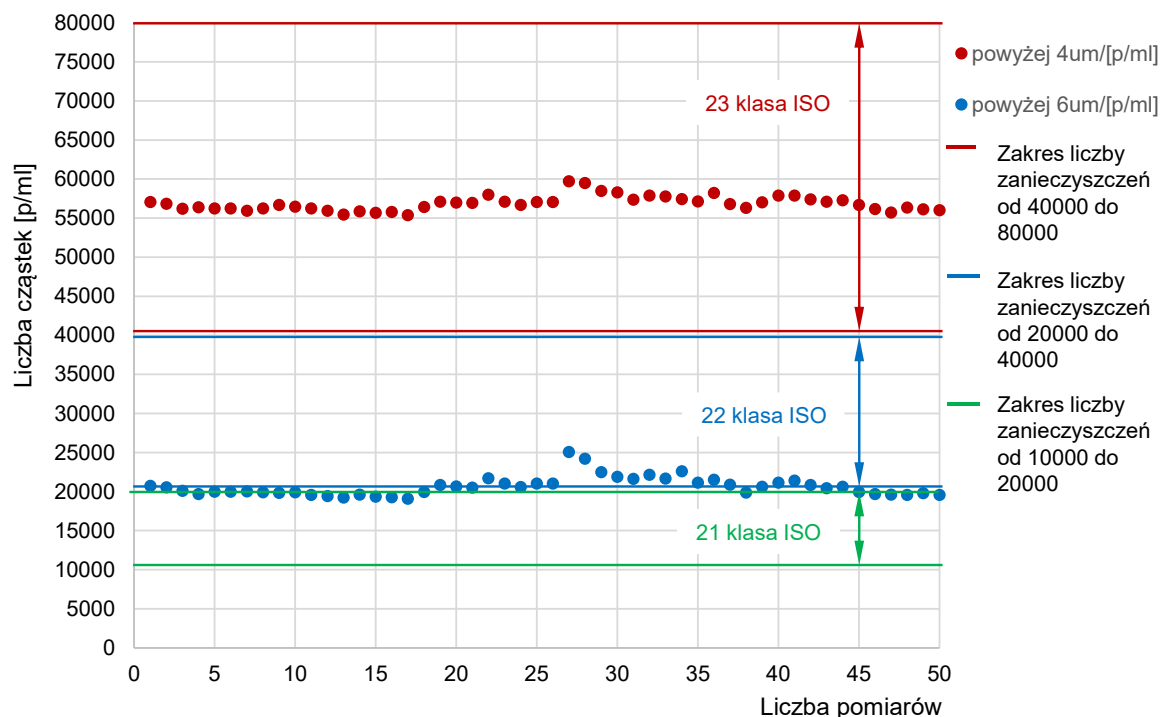
Rys. 4.5 Przebieg wartości wilgotności względnej RH oraz średnia jego wartość z 50 pomiarów wraz z dolną i górną granicą przedziału ufności

Na rysunku 4.6 jest przedstawiony procentowy przebieg współczynnika zmienności W wyznaczonego z pomiaru wilgotności względnej RH , na podstawie którego możliwe było określenie liczby pomiarów.

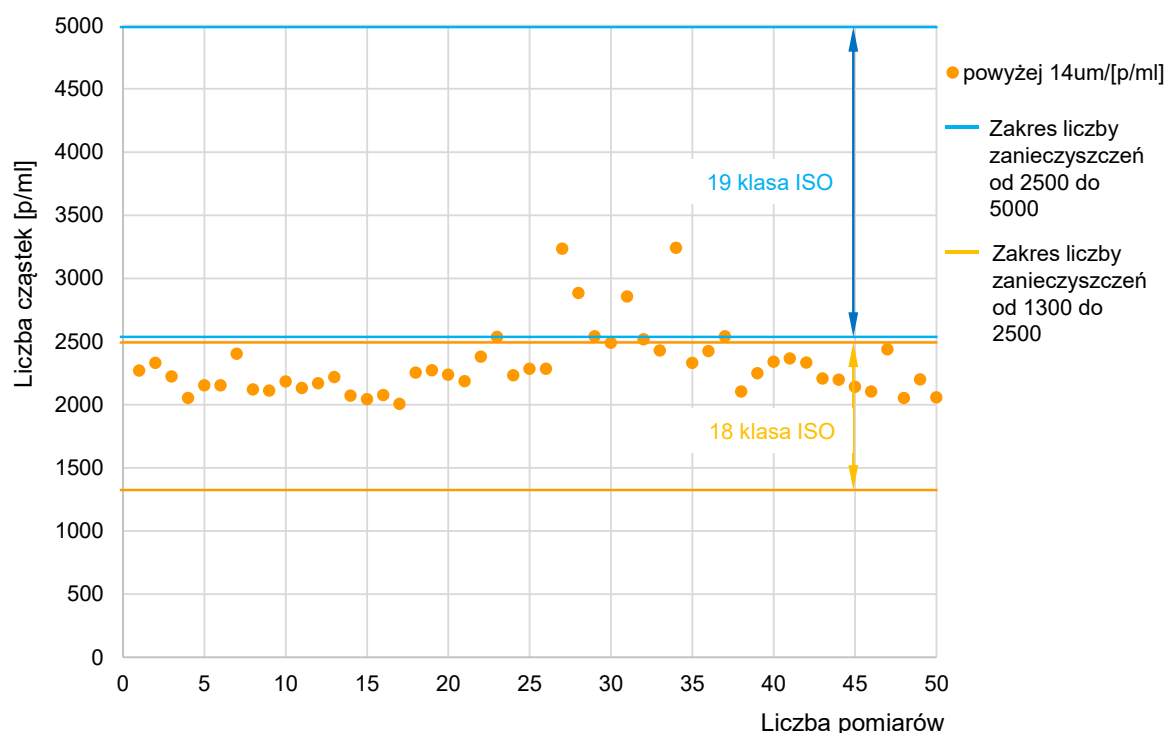


Rys. 4.6 Przebieg współczynnika zmienności W dla 50 pomiarów wilgotności względnej

Na podstawie rysunku 4.6, po wykonaniu 50 pomiarów wilgotności względnej stwierdzono, że minimalna liczba powtórzeń, zapewniających otrzymanie wyników RH w oczekiwanym przedziale ufności, przy przyjętym poziomie istotności $\alpha=0,05$, wynosi 7 pomiarów. Jednak zważywszy na wartość współczynnika zmienności W zawierającego się w przedziel od 0,5 do 1,4, stwierdza się bardzo dobrą powtarzalność pomiarów. Zgodnie z pracami [32, 61] w badaniach naukowych wartości współczynnika zmienności poniżej 10% świadczą o bardzo małej zmienności, podobnie jak w badaniach laboratoryjnych wartości poniżej 5%.



Rys. 4.7 Zależność liczby cząstek powyżej 4 μm i 6 μm w 1 ml badanego oleju HV 46 w kolejnych pomiarach

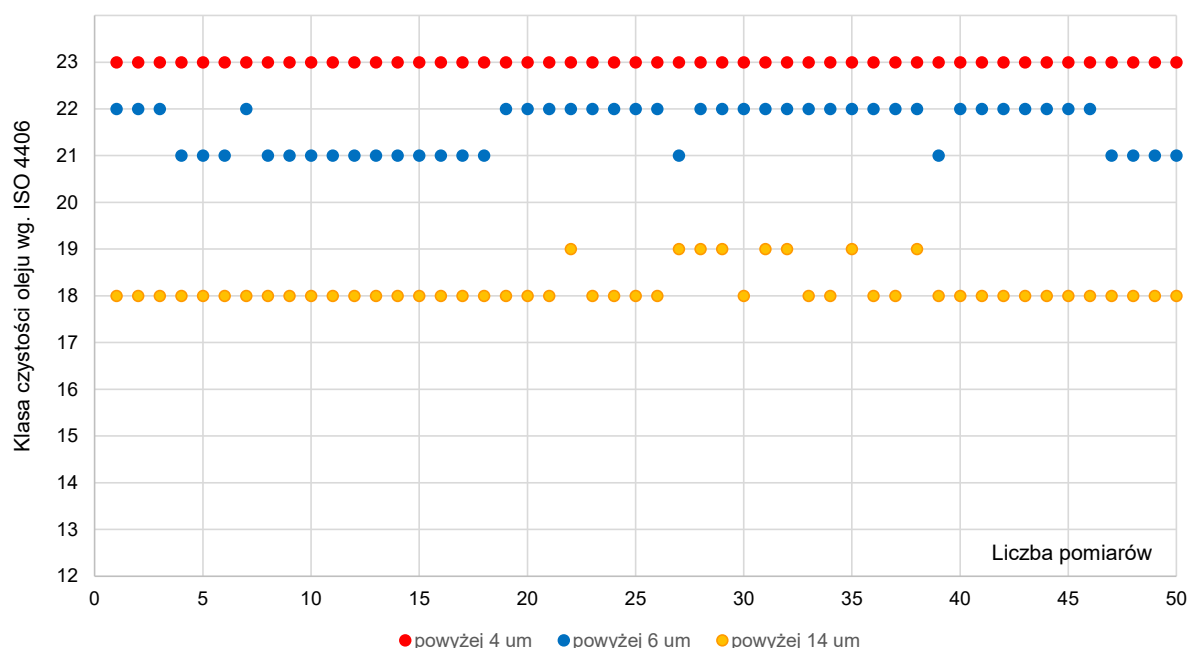


Rys. 4.8 Zależność liczby cząstek powyżej 14 μm w 1 ml badanego oleju HV 46 w kolejnych pomiarach

Na rysunkach 4.7 i 4.8 przedstawiono wyniki z pomiaru liczby zanieczyszczeń powyżej 4, 6 i 14 μm w 1 ml badanego nowego oleju *HV 46* pochodzącego z metalowej beczki w przenośnym laboratorium Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos w kolejnych pomiarach przy stałych warunkach brzegowych. Na wykresach zgodnie z normą *ISO 4406* przedstawiono zakresy zanieczyszczeń na podstawie których określa się klasę czystości dla danego zakresu wymiarowego cząstek stałych. Dodatkowo w tabeli 4.6 przedstawiono wyniki wartości średniej i odchylenie standardowe dla pomiaru liczby zanieczyszczeń dla cząstek powyżej 4, 6 i 14 μm . Analizując dane zawarte w tabeli 4.6 stwierdzono, że największy rozrzut wyników rozumiany wartością odchylenia standardowego od wartości średniej posiadały cząstki stałe o średnicy powyżej 6 μm , a najmniejszy cząstki największe o średnicy powyżej 14 μm . Odejmując od siebie liczby cząstek z zakresów równych i powyżej 4, 6 i 14 μm otrzymano liczby cząstek w przedziałach wymiarowych, które wyniosły 38571 cząstek o średnicy do 6 μm , 18324 w zakresie średnic (6; 14 μm) i 2314 cząstek równych i powyżej 14 μm . Natomiast na rysunku 4.9 przedstawiono zależność przypisanej klasy czystości *ISO* po badaniu z użyciem przenośnego analizator stanu oleju w kolejnych pomiarach.

Tab. 4.6. Wyniki obliczeń statystycznych dla pomiaru liczby cząstek zanieczyszczeń w oleju *HV 46*

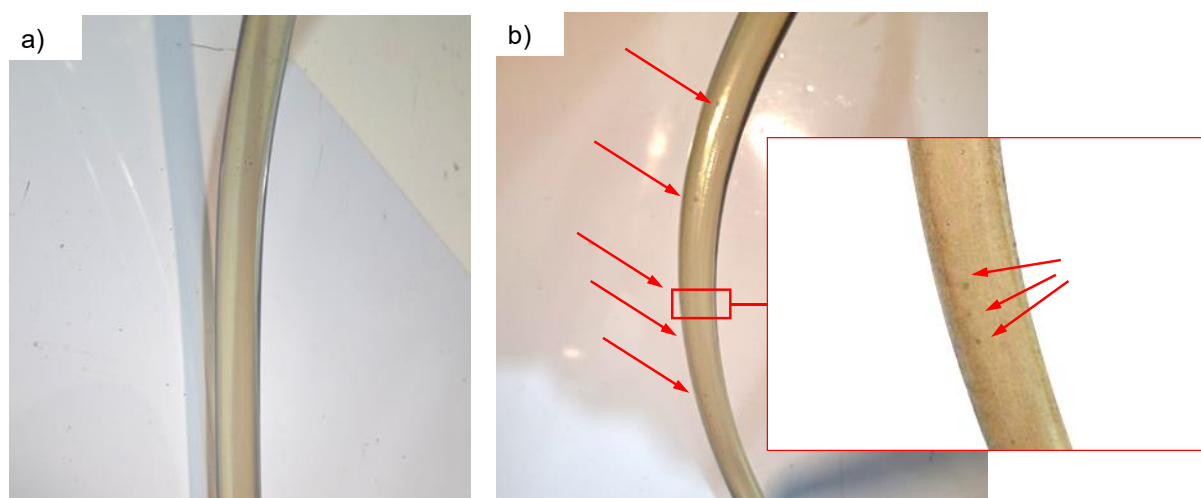
	Liczba cząstek stałych w 1 ml oleju		
	$\geq 4 \mu\text{m}$	$\geq 6 \mu\text{m}$	$\geq 14 \mu\text{m}$
Wartość średnia	56 895	20 638	2 314
Odchylenie standardowe	847,3	1 050,8	250,4
Klasa ISO wg 4406	23	22	18



Rys. 4.9 Zależność klasy czystości wg *ISO 4406* w kolejnych pomiarach oleju *HV 46*

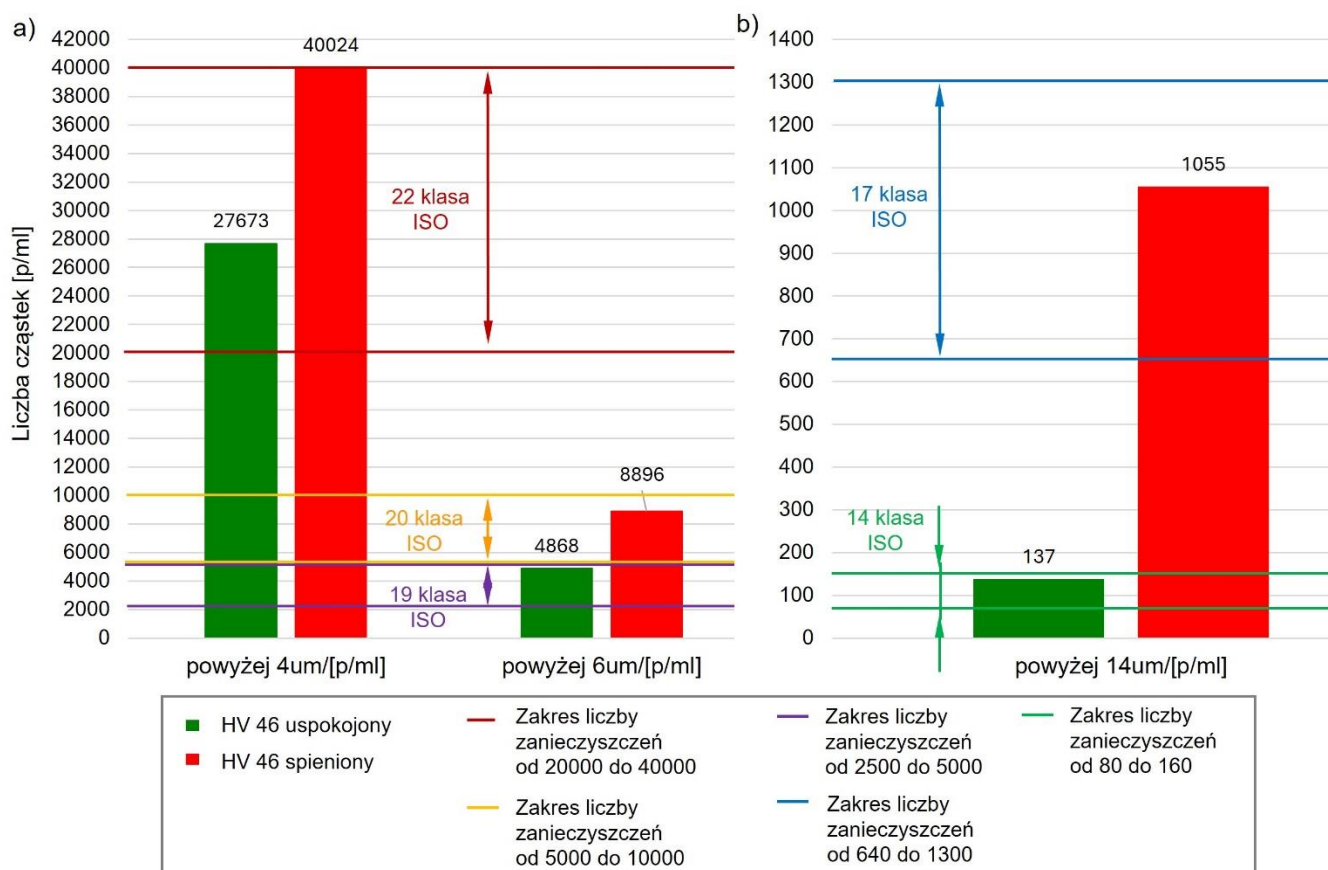
Analizując wyniki przypisanej klasy czystości na podstawie zmierzonej liczby zanieczyszczeń stałych, co przedstawiono na rysunku 4.9 stwierdza się, że klasa czystości wg *ISO 4406* nie zmienia się w kolejnych pomiarach lub zmienia się o jedną klasę. W przypadku zanieczyszczeń równych i powyżej 4 μm gdzie zakres jest największy od 40000 do 80000, wszystkie wyniki liczby zanieczyszczeń w 1 ml badanego oleju *HV 46* zmieściły się, co

w efekcie przypisało 23 klasę czystości *ISO*. W pozostałych przypadkach zanieczyszczeń większych i równych 6 i 14 μm wynik badania przypadł na zakres przejścia z 22 klasy czystości *ISO* na 21 oraz z 19 klasy *ISO* na 18 (dla zanieczyszczeń równych i powyżej 14 μm) spowodowało, że przypisywana klasa może zmieniać się o jedną wartość. Dla pomiarów zarówno liczby zanieczyszczeń w 1 ml badanego oleju jak i wyników przypisanej klasy na tej podstawie *ISO* czy *NAS* nie jest wskazane prowadzenie analizy statystycznej w celu wyznaczenia liczby powtórzeń pomiarów. W przypadku pomiaru liczby zanieczyszczeń z plastikowego kanistra 20 litrów czy metalowej beczki, osoba badająca olej nie ma informacji o stopniu wymieszania zanieczyszczeń w całej objętości kanistra czy beczki, a w czasie pomiaru przewód do zasysania oleju do analizatora jest umieszczany losowo na różnej głębokości zbiornika z olejem. Przewód wprowadzany jest do wnętrza przez korek wlewowy, przez co osoba nie widzi końca przewodu ssącego. Ponadto zważywszy, że przedziały liczby zanieczyszczeń posiadają szerokie zakresy zgodnie z normą *ISO 4406* oraz, że wynik z przypisanej klasy czystości *ISO* nie zmienia się w kolejnych pomiarach lub co najwyżej zmienia się o jedną wartość w przypadku wyniku rzeczywistego znajdującego się na przejściu między zakresami kolejnych klas czystości stwierdzono, że interpretację wyników można przeprowadzić bez wcześniejszej analizy statystycznej. Natomiast nie jest zalecane w ocenie klasy czystości bazowanie na tylko jednym pomiarze pobranej próbki oleju. W analizatorze stanu oleju badającym olej, znajduje się część oleju z poprzedniego pomiaru, który w czasie pierwszego pomiaru wymiesza się z nowym olejem. Nie pozwoli to na uzyskanie wiarygodnego i rzeczywistego wyniku podczas pierwszego pomiaru. Dlatego do analizy uzyskanych wyników z badań oleju nie należy uwzględniać pierwszego pomiaru. Obserwując wartości wyników na klasę czystości i wilgotność względną w kolejnych pomiarach oraz uwzględniając fakt, że wartość ta istotnie nie zmienia się w przypadku wilgotności względnej oraz nie zmienia się lub zmienia się o jedną wartość klasy przy wyznaczeniu klasy czystości *ISO* stwierdzono, że do dalszych pomiarów można przyjąć trzy powtórzenia bez pierwszego pomiaru. Na podstawie doświadczenia zdobytego w czasie badań oleju na klasę czystości oleju i wilgotność względną zauważono, że wynik pomiaru w przypadku przypisanej klasy czystości po badaniu może zmienić się na niekorzyść (wyższa klasa czystości) jeżeli olej będzie spieniony lub przewód ssący zostanie na chwilę uniesiony. Wówczas zassany będzie olej z pęcherzykami powietrza. Taka sytuacja występuje przy powrocie oleju z układu do zbiornika lub podczas dolewania oleju do zbiornika. Wówczas aparatura pomiarowa składająca się z układu laserowego do prześwietlania zassanego oleju, pęcherzyk powietrza zidentyfikuje, jako zanieczyszczenie stałe.



Rys. 4.10 Widok przewodu ssącego do analizatora: a) poprawnie zanurzonego w zbiorniku oleju, b) niepoprawnie zanurzonego w zbiorniku z widocznymi pęcherzykami zassanego powietrza

Na rysunku 4.10 przedstawiono widok przewodu ssącego z badania tego samego oleju *HV 46* z poprawnie zanurzonym przewodem w kanistrze z olejem i widok przewodu ssącego po potrząśnięciu kanistra z olejem. W czasie badania oleju w sposób poprawny uzyskano klasę czystości *ISO 22/19/14*, co odpowiadało 11 klasie *NAS*, natomiast kilkukrotne potrząśnięcie zbiornika w celu spienienia oleju spowodowało, że otrzymano klasę *ISO 22/20/17*, co było równoważne z 12 klasą *NAS* i olej według tego badania był już olejem pozaklasowym wymuszającym przeprowadzenie mikrofiltracji. Na rysunku 4.11 oraz w tabeli 4.7 przedstawiono wyniki z pomiaru liczby zanieczyszczeń powyżej 4, 6 i 14 μm w 1 ml badanego nowego oleju *HV 46* uspokojonego i spienionego symulującego wlewanie oleju z układu przez przewód powrotny do zbiornika hydraulicznego.



Rys. 4.11 Zależność liczby cząstek powyżej a) 4 μm i 6 μm w 1 ml, b) 14 μm w 1 ml badanego oleju *HV 46* (uspokojonego i spienionego)

Tab. 4.7. Wyniki liczby zanieczyszczeń oraz klasa czystości wg *ISO 4406* dla oleju *HV 46* przy badaniu oleju uspokojonego i spienionego z pęcherzykami powietrza

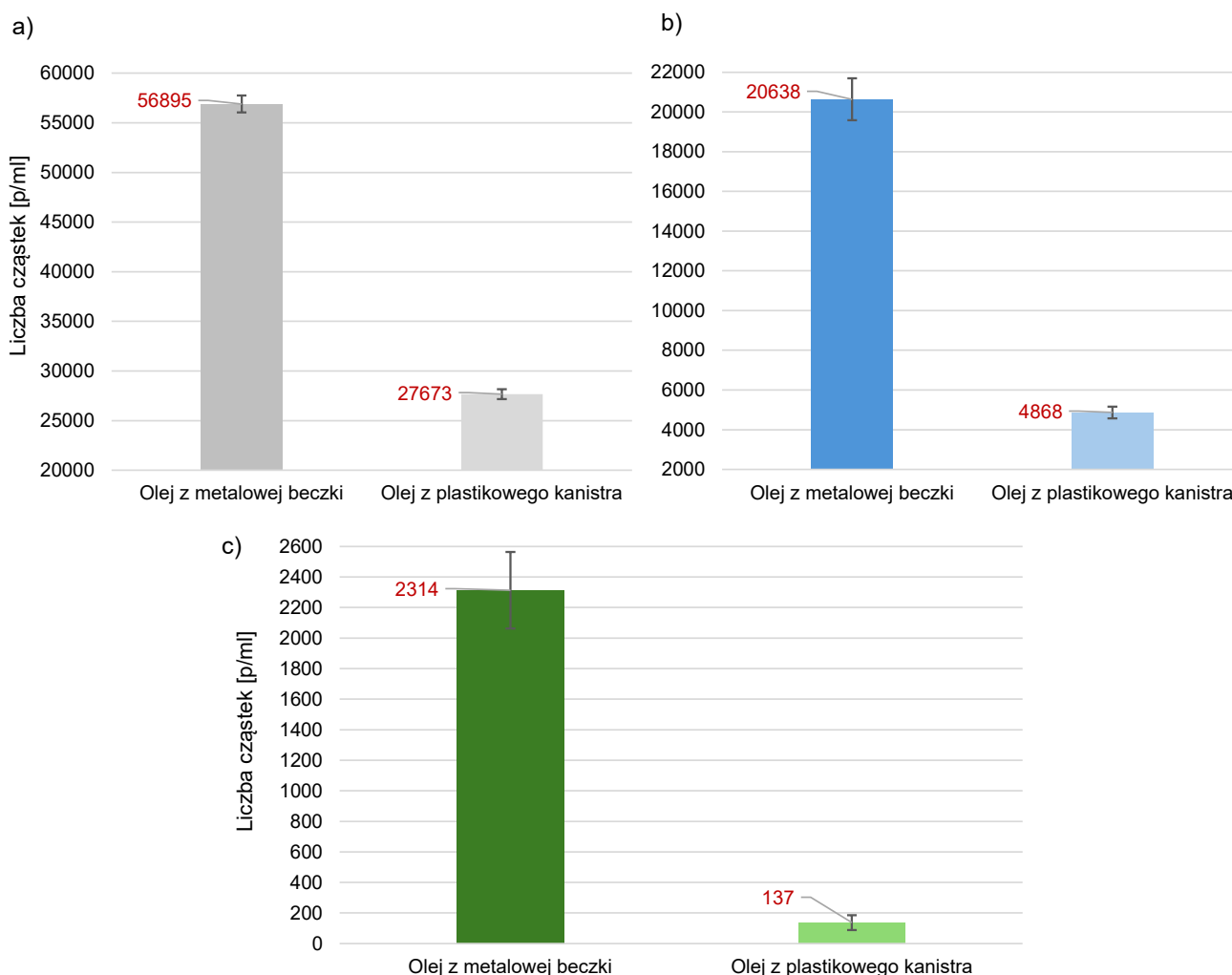
Średnica zanieczyszczeń	Olej uspokojony	Olej spieniony	Przyrost zanieczyszczeń [%]
$\geq 4 \mu\text{m}$	27673	40024	144,6
$\geq 6 \mu\text{m}$	4868	8896	182,7
$\geq 14 \mu\text{m}$	137	1055	770,1
Klasa czystości	22/19/14	22/20/17	

Analizując wartości liczby zanieczyszczeń podanych na wykresie 5.10 i w tabeli 4.7 dla nowego oleju *HV 46* pochodzącego z plastikowego kanistra o pojemności 20 litrów stwierdzono, że chwilowe spienienie oleju przez potrząśnięcie kanistra zmieniło wartości poszczególnych klas czystości oleju. W przypadku zanieczyszczeń o średnicy powyżej 4 μm liczba zanieczyszczeń wzrosła o 1,5 razy z 27673 na 40024, w przypadku zanieczyszczeń

o średnicy powyżej 6 μm liczba zanieczyszczeń wzrosła prawie dwukrotnie (1,8 razy), a w zakresie zanieczyszczeń powyżej 14 μm , liczba zanieczyszczeń wzrosła ponad 7 razy (7,7), co podniosło klasę czystości ISO z 14 na 17.

4.3.2. Wyniki badań olejowych na klasę czystości

Na rysunku 4.12 oraz w tabeli 4.8 przedstawiono zależność liczby zanieczyszczeń powyżej 4, 6 i 14 μm w 1 ml badanego nowego oleju *HV 46* pobranego z dwóch źródeł tj. z metalowej beczki o pojemności 200 litrów i z plastikowego kanistra o pojemności 20 litrów. Na wykresach jak i w tabeli przedstawiono wartości średnie wraz z odchyleniem standardowym z 50 pomiarów na urządzeniu ArgoHytos.



Rys. 4.12 Zależność liczby cząstek powyżej a) 4 μm , b) 6 μm , c) 14 μm w 1 ml badanego nowego oleju *HV 46* pobranego z metalowej beczki i z plastikowego kanistra

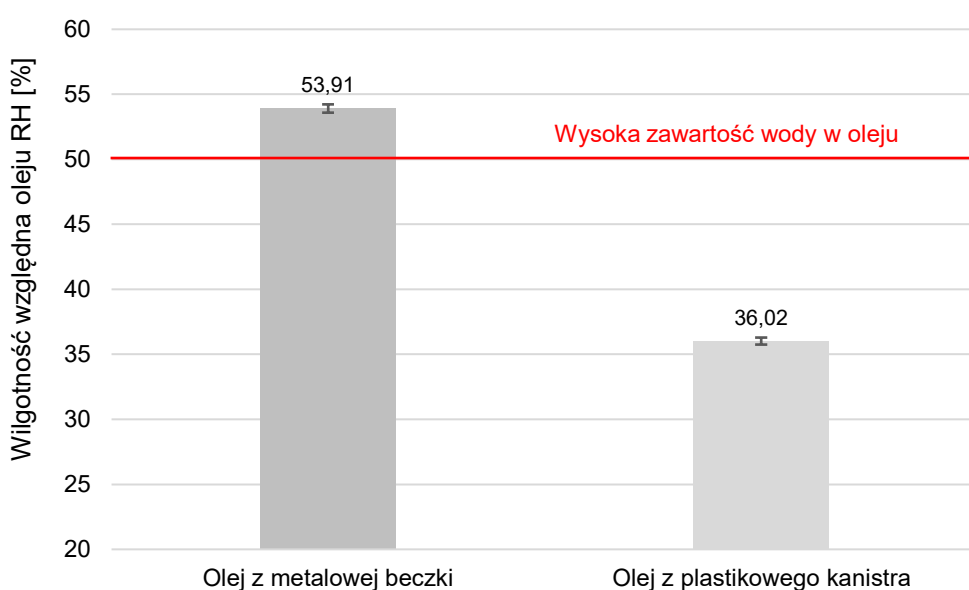
Tab. 4.8. Wyniki liczby zanieczyszczeń oraz klasa czystości wg *ISO 4406* dla oleju *HV 46* przy badaniu nowego oleju pobranego z metalowej beczki i plastikowego kanistra

Średnica zanieczyszczeń	Olej z plastikowego kanistra 20 litrów		Olej z metalowej beczki 200 litrów		Przyrost zanieczyszczeń [%]
	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	
$\geq 4 \mu\text{m}$	27673	497,5	56895	847,3	205,6
$\geq 6 \mu\text{m}$	4868	297,9	20638	1058,8	423,9
$\geq 14 \mu\text{m}$	137	48,6	2314	250,4	1685,7
Klasa czystości ISO	22/19/14		23/22/18		
Klasa czystości NAS	11		12		

Analizując wartości liczby zanieczyszczeń nowego oleju *HV 46* zaobserwowano wyraźny ich wzrost w przypadku przechowywania go w metalowej beczce względem plastikowego kanistra. Zanieczyszczeń o średnicy powyżej 4 μm było dwukrotnie więcej, zanieczyszczeń o średnicy powyżej 6 μm było czterokrotnie więcej, a zanieczyszczeń większych od 14 μm było aż szesnastokrotnie więcej. Ponadto odchylenia standardowe od wartości średniej była znacznie większe w przypadku oleju pochodzącego z metalowej beczki tj. dwukrotnie większe dla zanieczyszczeń powyżej 4 μm , trzykrotnie większe dla zanieczyszczeń powyżej 6 μm i pięciokrotnie większe dla zanieczyszczeń od 14 μm względem plastikowego kanistra. Duża wartość odchylenia standardowego w przypadku oleju pobranego z metalowej beczki świadczy o nierównomiernym rozkładzie zanieczyszczeń w całej objętości zbiornika z olejem tj. w beczce 200 litrów. Podczas pomiaru na przenośnym laboratorium do badania oleju na klasę czystości po wprowadzeniu przewodu do beczki, nie ma możliwości utrzymania stałej wysokości oraz wyeliminowania poprzecznych przemieszczeń przewodu ssącego. Analizując otrzymane klasy czystości *ISO* oraz *NAS* (11 dla oleju z plastikowego kanistra i 12 dla oleju z metalowej beczki), oba oleje należy zakwalifikować jako oleju pozaklasowe wymagające pierwszej mikrofiltracji przed wlaniem do układu hydraulicznego. W pracy [56] przedstawiono również wyniki badań innych nowych olejów (silnikowego *20W-50* i przekładniowego) pobranych z plastikowych kanistrów o pojemności 5 litrów gdzie uzyskano klasy *ISO* 18/17/14 (olej silnikowy) i 22/19/14 (olej przekładniowy), co odpowiadało klasie 10 i 11 *NAS*. Również dla tych olejów zalecana była mikrofiltracja, aby obniżyć klasę *NAS* do 9.

4.3.3. Wyniki wilgotności względnej oleju hydraulicznego

Na rysunku 4.13 oraz w tabeli 4.9 przedstawiono wyniki wyznaczonej wilgotności względnej nowego oleju hydraulicznego *HV 46* pobranego do badań z metalowej beczki oraz z plastikowego kanistra. W tabeli podano wartości średnie oraz odchylenie standardowe z 7 pomiarów. Prezentację jak i ocenę wyników przeprowadzono celowo na mniejszej populacji ze względu na wcześniej wyznaczoną liczbę powtórzeń pomiarów na podstawie współczynnika zmienności opisanego zależnością (4.5) oraz ze względu na wpływ temperatury oleju na wynik pomiaru, co opisano w dalszej części.

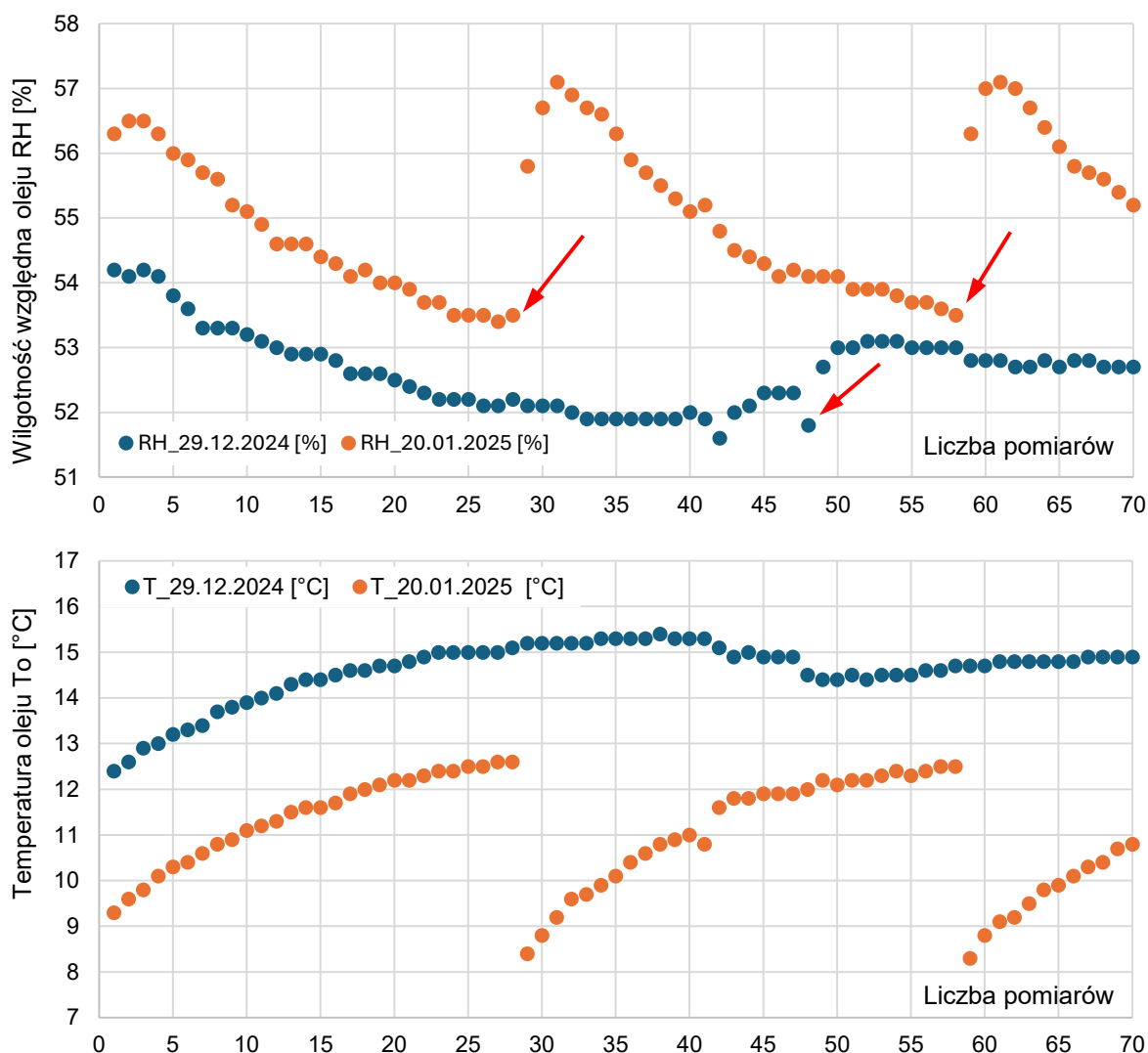


Rys. 4.13 Wilgotność względna nowego oleju hydraulicznego *HV 46* w zależności o rodzaju warunków przechowywania (metalowa beczka, plastikowy kanister)

Tab. 4.9. Wyniki wilgotności względnej RH oleju $HV 46$ przy badaniu nowego oleju pobranego z metalowej beczki i plastikowego kanistra

Średnica zanieczyszczeń	Olej HV 46 z metalowej beczki	Olej HV 46 z plastikowego kanistra
Wartość średnia	53,91*	36,02
Odchylenie standardowe	0,32	0,28
* Woda całkowicie rozpuszczona, przekroczona dopuszczalna zawartość wody w oleju $RH > 50\%$		

Analizując wyniki zawarte na rysunku 4.13 oraz w tabeli 4.9 stwierdzono, że w nowym oleju $HV 46$ ze względu na warunki przechowywania w metalowej beczce stwierdzono przekroczoną wartość wilgotności względnej wynoszącej 54% przy dopuszczalnej (akceptowalnej do 50% przy wodzie całkowicie rozpuszczonej). W przypadku oleju pobranego z plastikowego kanistra wilgotność względna wyniosła 36%. Zgodnie z [7, 49] przy wilgotności względnej powyżej 50% zalecane jest przeprowadzenie mikrofiltracji, a w przypadku RH powyżej 70% woda występuje w formie wydzielonej i bezwzględnie jest przeprowadzenie mikrofiltracji oleju hydraulicznego. Wadą przenośnych analizatorów do badania klasy czystości oleju jest pośrednia metoda oceny ilości wody w oleju podawana w procentach i odnoszona do temperatury oleju. W celu dokładnego określenia ilości wody w ppm należałoby pobrane próbki przebadać laboratoryjnie metodą Karla Fischera.



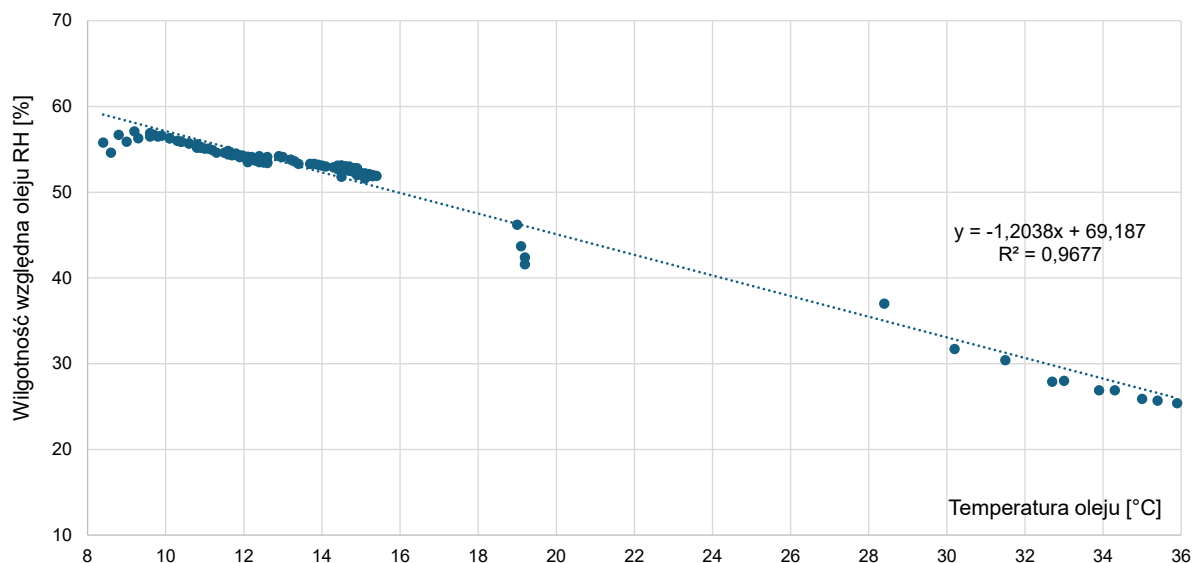
Rys. 4.14 Zależność a) wilgotności względnej, b) temperatury nowego oleju hydraulicznego $HV 46$ w kolejnych pomiarach w dniu 29.12.2024 r. i 20.01.2025 r.

W badaniach nad wilgotnością oleju hydraulicznego przeprowadzono pomiary RH nowego oleju $HV 46$ pobranego z metalowej beczki. Wykonano 70 pomiarów wilgotności względnej jeden za drugim z jednoczesnym pomiarem temperatury oleju przez przenośny analizator Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos. W pierwszej serii po 48 pomiarze zrobiono dłuższą kilkudziesięciominutową przerwę, drugą serię przeprowadzono po 21 dniach miała trzy w ciągu dnia. Na rysunku 4.14 przedstawiono zależność zmiany RH w kolejnych pomiarach wraz ze zmianą temperatury oleju hydraulicznego. Wspomniane przerwy w pomiarach wilgotności względnej zostały zaznaczone czerwonymi strzałkami na wykresie. Dodatkowe badania miały wykazać, czy otwarta beczka z nowym olejem w warunkach magazynowych wpływa na zmiany wilgotności względnej oleju hydraulicznego.

Analizując dane zawarte na wykresach stwierdzono, że podczas badania oleju na klasę czystości wraz z wilgotnością względną, wykonując pomiar jeden za drugim analizator z wbudowaną pompą do zasysania i odprowadzenia oleju powoduje podgrzewanie oleju w kolejnych pomiarach. Przyrost temperatury jest nieznaczny i wynosi 0,1 lub 0,2°C w zależności jak szybko wykonywany jest kolejny pomiar. Przy bardzo szybkim wykonaniu pomiaru wzrost o 0,1°C wystąpi w trzecim kolejnym pomiarze. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem temperatury badanego oleju obniża się wartość wilgotności względnej oleju o około 0,2%. W przypadku badania oleju na klasę czystości wg *ISO*, *SAE* czy *NAS*, wzrost temperatury oleju nie wpływa na wynik przypisanej klasy czystości po badaniu. Odnosząc się do postawionego celu tj. wpływu czasu na zmiany wilgotności względnej nowego oleju znajdującego się w metalowej i otwartej beczce, kiedy olej ma kontakt z powietrzem, nie stwierdzono zmian RH po 22 dniach (wykonując serię 70 kolejnych pomiarów). Mimo różnic wartości RH na wykresie 4.14a), odnosząc wartość temperatury oleju do wartości RH uzyskuje się te same lub zbliżone wartości wilgotności oleju w obu badaniach tj. w dniu 29.12.2024 r. i 20.01.2025 r., kiedy pomiar wykonano w niższej temperaturze oleju tj. średnio 11°C kiedy w czasie pierwszych pomiarów średnia temperatura oleju wyniosła 14,6°C. Zgodnie z pracą autora w [58] istotny wzrost wilgotności względnej oleju może mieć miejsce już po kilku dniach pracy maszyny (np. wtryskarki do tworzyw sztucznych zasilanej hydraulicznie) kiedy olej podgrzany jest do maksymalnej dopuszczalnej wartości około 50°C i następnie wystudzony do temperatury otoczenia około 10°C w nieogrzewanej hali produkcyjnej.

Badania nad wilgotnością względną oleju wykazały silne uzależnienie wyniku RH od temperatury oleju. W ramach realizacji pracy doktorskiej nowej olej hydrauliczny typu $HV 46$ z plastikowego kanistra był wielokrotnie badany w różnych temperaturach (temperaturze oleju). Zważywszy, że przenośny analizator stanu oleju OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos wszystkie wyniki zapisuje w pliku tekstowym stwierdzono, że dla wspomnianego oleju wykonano 144 pomiaru na klasę czystości i wilgotność względną. Pomiary wykonane były przy różnych wartościach temperatury oleju. W przypadku badania na klasę czystości wg *ISO 4406* i *NAS 1638*, temperatura otoczenia jak i temperatura oleju nie wpływa na wynik badania i przypisanej klasy czystości. Dla tak dużej liczby pomiarów wilgotności względnej wyznaczono charakterystykę zmiany RH od temperatury oleju. Na rysunku 4.15 przedstawiono zależność $RH=f(T_o)$ dla wszystkich wyników. Analizując charakter ułożenia wartości wilgotności względnej na osi czasu stwierdzono, że możliwe jest modelowanie zmian RH regresyjną funkcją liniową zależnością (4.6)

$$RH = -1,2038 \cdot T_o + 69,18; \quad R^2=0,968 \quad (4.6)$$



Rys. 4.15 Zależność wilgotności względnej od temperatury nowego oleju hydraulicznego HV 46 w czasie badań na przenośnym laboratorium stanu oleju OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos

Na podstawie funkcji aproksymującej dla zmiany wilgotności względnej nowego oleju od jego temperatury stwierdzono, że dla zakresu od 0 do 40° wilgotność względna RH spada od wartości 69 do 21%. W literaturze podawana jest najczęściej zalecana wartość RH do 50%, przy której woda całkowicie rozpuszczona nie ma negatywnego wpływu na stan układu hydraulicznego. Również w analizatorze oleju OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos generowany jest komunikat „Wysoka zawartość wody” (High water cont.) od 48% wilgotności względnej, a od 65% komunikat „Ekstremalnie wysoka zawartość wody” (Extr. Water cont.). Natomiast konkurencyjne urządzenie firmy Parker Oil Sampler (IOS) akceptowalny poziom wilgotności względnej podaje do 70%.

4.4. Podsumowanie wyników badań na klasę czystości i wilgotność

Na podstawie przeprowadzonych badań nowego oleju hydraulicznego na klasę czystości i wilgotność względną na przenośnym laboratorium Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos stwierdzono:

- 1) Minimalna liczba powtórzeń zapewniających otrzymanie wyników wilgotności względnej RH w oczekiwanym przedziale ufności wynosi 7 pomiarów. Współczynnik zmienności W zawiera się w przedziale 0,5-1,4%. Zważywszy na bardzo niską wartość współczynnika zmienności poniżej 5% w badaniach laboratoryjnych możliwe jest zmniejszenie liczby powtórzeń do 3 pomiarów.
- 2) Pomiar wilgotności względnej RH na przenośnym laboratorium w kolejnych pomiarach wykonanych w tych samych warunkach podgrzewa próbkę oleju hydraulicznego o około 0,1-0,2°C, co przekłada się na spadek wartości RH o około 0,2% w kolejnych pomiarach.
- 3) Badanie oleju na klasę czystości wg ISO 4406, SAE AS 4059 i NAS 1638 nie zmienia klasy w kolejnych pomiarach. Zaleca się, aby analizę wyników przeprowadzić po drugim i trzecim pomiarze. Podczas pierwszego pomiaru w urządzeniu pomiarowym znajdują się śladowe ilości z poprzedniego pomiaru, przez co badany olej wymiesza się ze starym olejem, a otrzymany wynik nie będzie odzwierciedlał rzeczywistej klasy czystości. Ze względu na szerokie zakresy klas ISO liczby zanieczyszczeń, w kolejnych pomiarach klasa czystości nie zmienia się. Jedynie widoczną zmianę

- obserwuje się kiedy rzeczywista liczba zanieczyszczeń jest między przedziałami klas czystości *ISO*.
- 4) Sposób przechowywania nowego oleju hydraulicznego wpływa na zawartość zanieczyszczeń i wilgotność względną. Porównując stan oleju znajdującego się w metalowej beczce, a w plastikowym kanistrze stwierdzono, że liczba zanieczyszczeń o średnicy powyżej 4 μm była dwukrotnie większa w metalowej beczce niż w oleju znajdującym się w plastikowym kanistrze. Zanieczyszczeń powyżej 6 μm było czterokrotnie więcej, z zanieczyszczeń powyżej 14 μm było szesnastokrotnie więcej w oleju w metalowej beczce względem plastikowego kanistra.
 - 5) Nowe oleje hydrauliczne *HV 46* niezależnie od sposobu przechowywania były olejami pozaklasowymi wymagającymi przeprowadzenia mikrofiltracji przed zalaniem układu hydraulicznego. Olej w metalowej beczce posiadał klasę czystości *ISO 23/22/18* (12 *NAS*), a olej w plastikowym była to klasa *ISO 22/19/14* (11 *NAS*). Minimalna dopuszczalna klasa czystości dla prostych układów hydraulicznych to 20/18/15 (*ISO*) i 9 *NAS*.
 - 6) Wilgotność względną oleju hydraulicznego w przypadku nowego oleju *HV 46* pobranego z metalowej beczki przekroczyła dopuszczalny poziom 50% (dokładnie wyniosła 54%), a w oleju pochodzącego z plastikowego kanistra *RH* wyniosła 36%. Powyżej 50% wilgotności względnej woda w oleju jeszcze jest w postaci całkowicie rozpuszczonej i jeszcze nie występuje w postaci wydzielonej.
 - 7) Wilgotność względną oleju jest ściśle uzależniona od wartości temperatury oleju. Zmiany *RH* możliwe są do zamodelowania regresyjnym modelem liniowym.
 - 8) Badanie oleju przenośnymi analizatorami do wyznaczenia klasy czystości oleju i wilgotności względnej należy bezwzględnie przeprowadzić na uspokojonym oleju bez pęcherzyków powietrza, które powstają przy powrocie oleju do zbiornika hydraulicznego z pracującego układu hydraulicznego. Analizatory stanu oleju wykorzystują układ laserowego prześwietlania przepływającej strugi oleju w celu identyfikacji zanieczyszczeń o różnych średnicach. Pęcherzyk powietrza wynikający ze spienienia oleju będzie rozpoznawany, jako zanieczyszczenie stałe. Olej nieuspokojony podczas pomiaru pozornie zwiększy klasę zanieczyszczeń o jedną wartość z *ISO 19* na 20 w przypadku zanieczyszczeń o średnicy powyżej 6 μm i zwiększy o 3 klasy z *ISO 14* na 17 w przypadku zanieczyszczeń powyżej 14 μm . Wówczas olej uspokojony z klasą czystości *ISO 22/19/14* po jego spienieniu uzyska klasę 22/20/17 (wzrost z 11 do 12 klasy *NAS*). Liczba zanieczyszczeń powyżej 4 μm była większa o 1,5 razy względem oleju uspokojonego jednak nie wpłynęło to na wzrost klasy *ISO*, zanieczyszczeń powyżej 6 μm było więcej o ponad 1,8 razy, a zanieczyszczeń powyżej 14 μm było więcej o 7,7 razy w oleju nieuspokojonym.
 - 9) Spienienie oleju hydraulicznego nie wpływa na wartość wilgotności względnej oleju hydraulicznego, w obu przypadku pomiarów uzyskano te same wartości *RH* wynoszące 36,1%.
 - 10) Przebadane oleje (silnikowe, przekładniowe i hydrauliczne) w każdym przypadku były olejami pozaklasowymi wymagającymi mikrofiltracji przed wlaniem do układu olejowego. Na opakowaniach od olejów przemysłowych producenci nie podają klasy czystości *ISO 4406*, a podają informacje o klasie lepkościowej np. dla olejów silnikowych *SAE 5W/30* czy *ISO VG 32, 46* czy *68* w przypadku oleju hydraulicznego. Producenci olejów przemysłowych również podają czasami informację o klasie jakościowej jak *ACEA*, *API* czy *DIN*. Brak zapisu o klasie czystości może wynikać, ze świadomości producentów oleju, że w czasie transportu i magazynowania nastąpi wzrost klasy czystości poza wartość dopuszczalną.

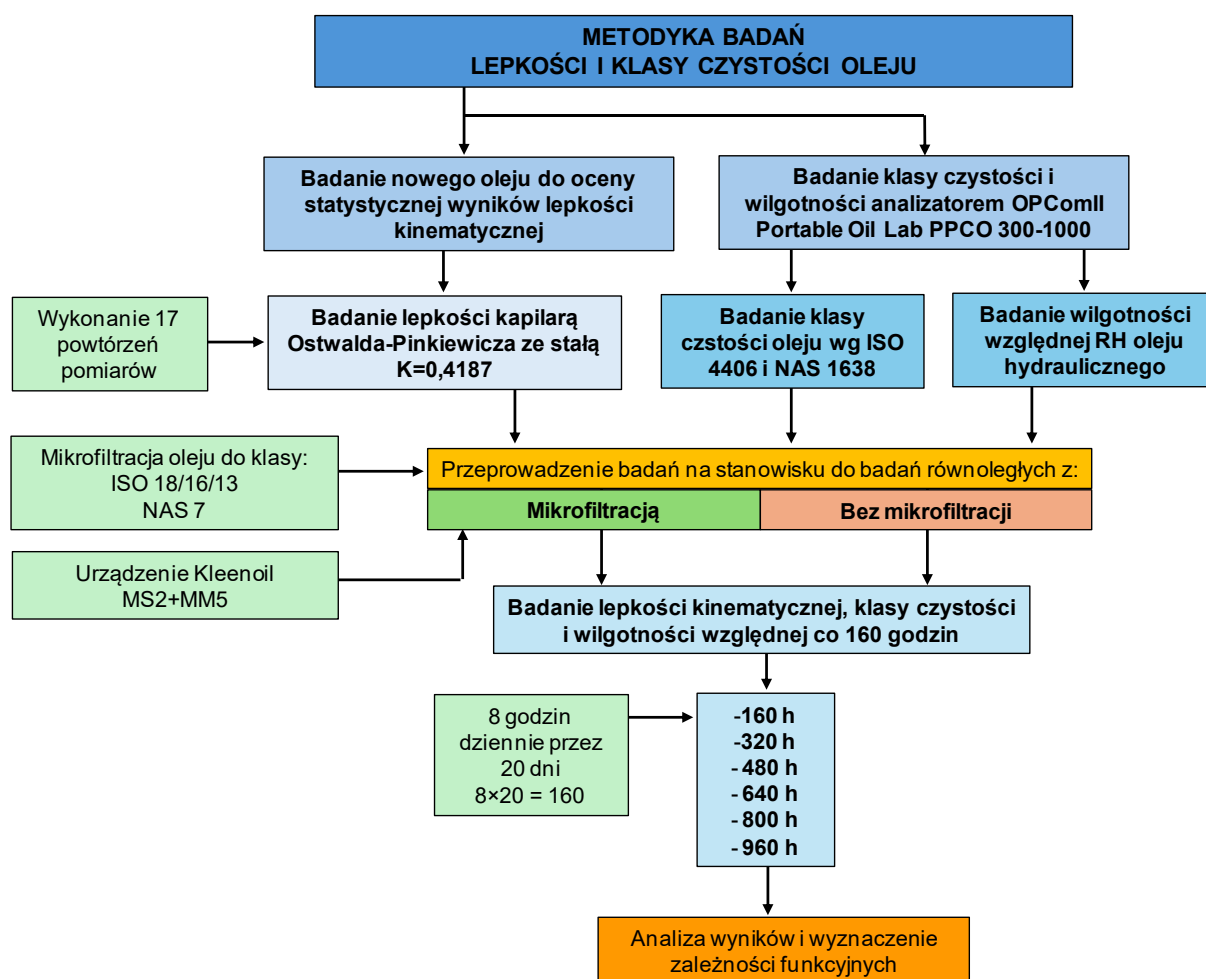
5. BADANIA LEPKOŚCI I CZYSTOŚCI OLEJU HYDRAULICZNEGO

5.1. Cel badań lepkościowych

Celem badań lepkościowych było wyznaczenie zmian lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego typu *HV 46* w funkcji czasu pracy układu hydraulicznego. Badania były przeprowadzone równolegle na dwóch typach instalacji hydraulicznych szczegółowo opisanych w metodyce badań w rozdziale 5.2 oraz podrozdziale 5.2.1. Badania poprzedzone zostały mikrofiltracją oleju na przenośnym stanowisku Kleenoil *MS2+MM5* przedstawionym na rysunku 2.8b) do klasy czystości *ISO 18/16/16* (7 klasa *NAS*). Olej hydrauliczny po badaniach lepkościowych ponownie badany był na klasę czystości i wilgotność względną na przenośnym stanowisku (analyzerze) *OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000* firmy *ArgoHytos* przedstawionym na rysunku 4.3 i szczegółowo opisanego w podrozdziale 4.3.

5.2. Metodyka badań lepkości oleju

Badania lepkości oleju hydraulicznego przeprowadzone zostały zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 5.1. Wspomniane badania wykonane były razem z badaniami na klasę czystości i wilgotność względną.

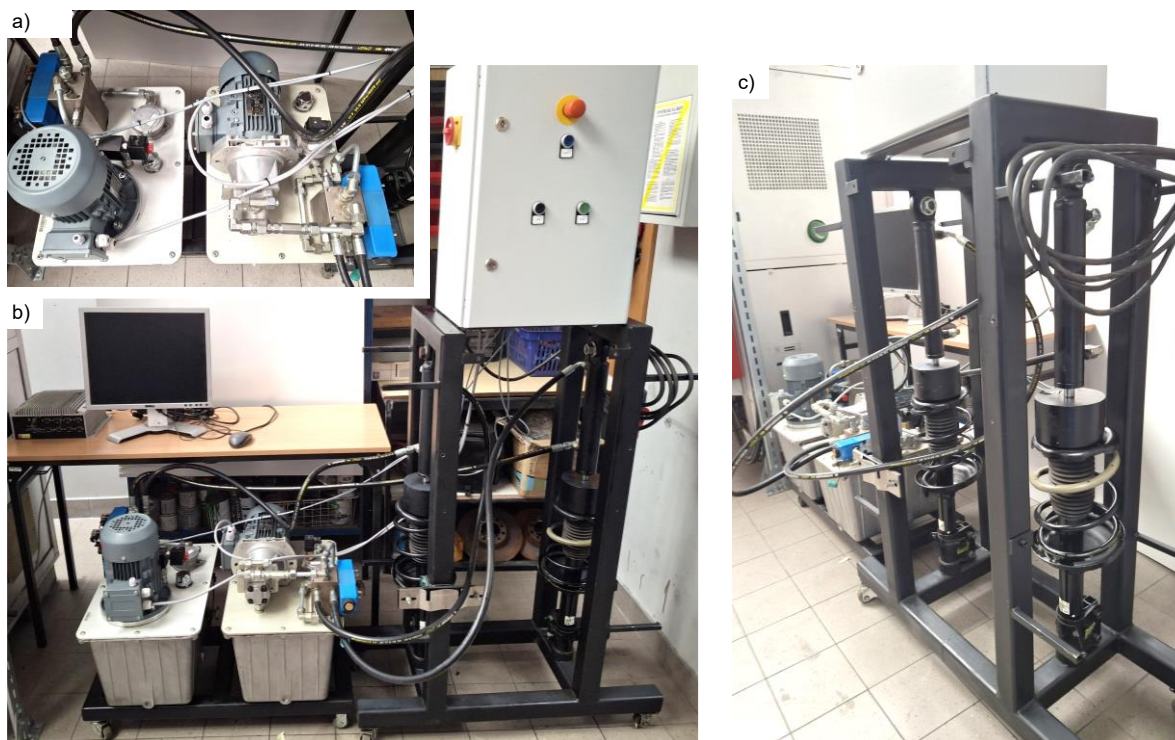


Rys. 5.1. Schemat blokowy metodyki badań olejowych lepkości kinematycznej i klasy czystości z wilgotnością względną na stanowisku do badań równoległych w badaniach zasadniczych

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 5.1 na stanowisku badawczym uruchomione były jednocześnie dwie instalacje hydrauliczne. Pierwsza bez mikrofiltracji (klasyczna instalacja z podstawowymi filtrami) i druga z dodatkowym układem do urządzenia filtrującego Kleenoil *MS2+MM5*. W odstępach czasowych co 160 godzin pracy pobierano próbki do badania na klasę czystości i wilgotność względną (1 próbkę z układu bez mikrofiltracji i 1 próbkę z układu z mikrofiltracją) i 2 próbki do badania lepkości kinematycznej, analogicznie jak wcześniej tj. 1 próbkę z układu bez i 1 próbkę z instalacji z mikrofiltracją. Badania prowadzono do 960 godzin pracy stanowiska, co odpowiada najczęściej występującym zapisom w dokumentacji technicznych *DTR* maszyn budowlanych lub drogowych o wymianie oleju na nowy po 1000 godzinach pracy lub po roku czasu, w zależności od tego, który parametr będzie szybciej osiągnięty.

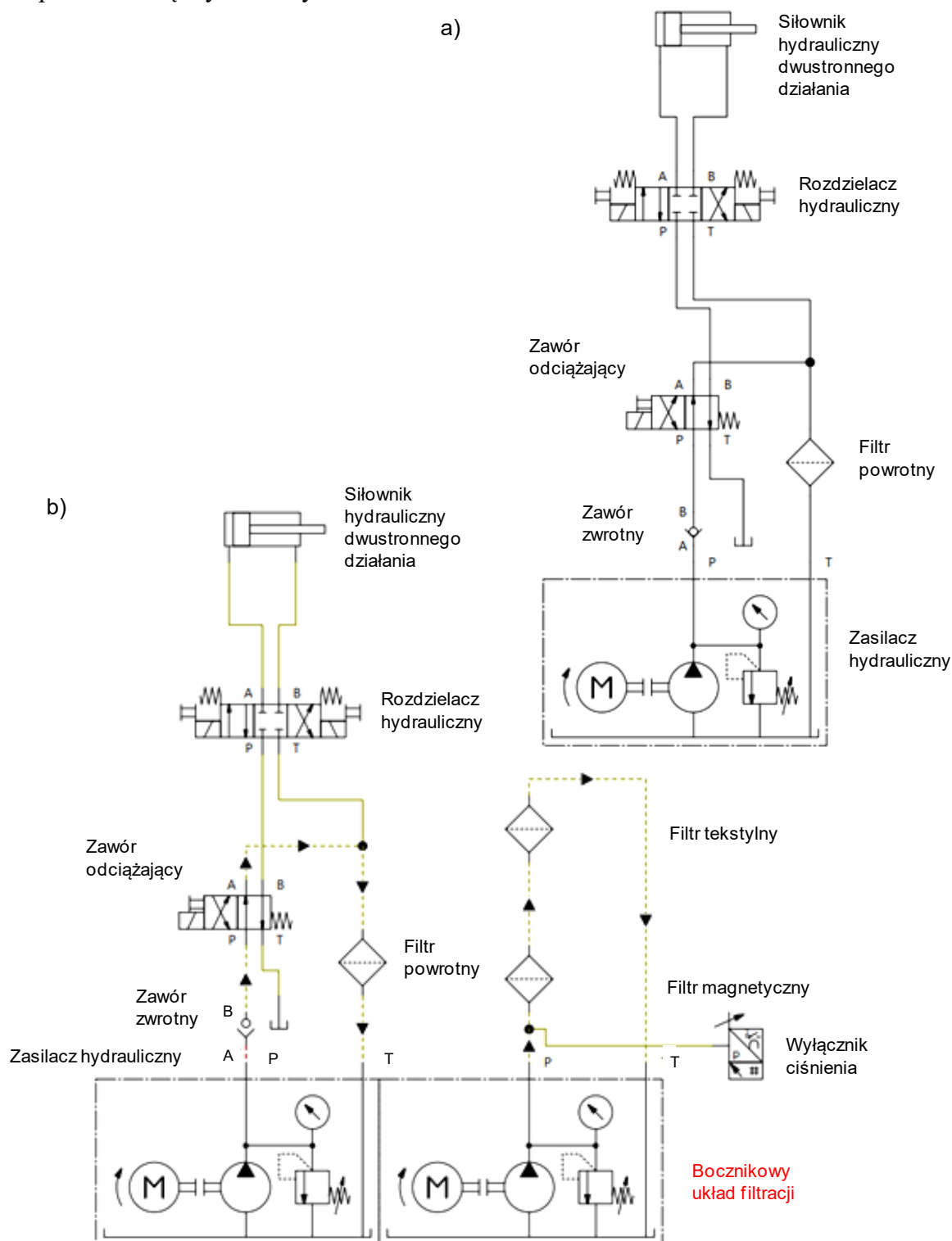
5.2.1. Stanowisko do badań równoległych

Stanowisko do badań zasadniczych zostało zbudowane w celu realizacji metodyki badań opracowanej i przedstawionej na rysunku 5.1. Głównym założeniem przy projektowaniu stanowiska była możliwość jednoczesnej pracy dwóch instalacji hydraulicznych do późniejszych badań oleju i stanu wybranych zespołów układu hydraulicznego. Takie założenie (koncepcja stanowiska) z jednej strony zwiększyła koszt budowy stanowiska, jednak z drugiej strony w ujęciu czasowym przyspieszyła uzyskanie wyników z badań. Pierwszy układ hydrauliczny stanowiska wyposażony jest w klasyczną instalację hydrauliczną z podstawowymi zespołami jak pompa hydrauliczna zasilana z silnika elektrycznego, rozdzielacz hydrauliczny i siłownik hydrauliczny. Drugi bliźniaczy układ dodatkowo rozbudowany jest o możliwość podłączenia zewnętrznego układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego Kleenoil *MS2+MM5*. Na rysunku 5.2 przedstawiono widok stanowiska do badań zasadniczych.



Rys. 5.2. Widok stanowiska badawczego do oceny zużycia elementów układu hydraulicznego: a) widok na układ zasilaczy hydraulicznych, b) widok z przodu z widoczną szafą sterowniczą, c) widok z prawej strony stanowiska z widocznymi siłownikami hydraulicznymi

Na rysunku 5.3 przedstawiono widok schematów instalacji hydraulicznej stanowiska bez jak i z dodatkową mikrofiltracją. Schematy opracowane zostały w programie *FLUIDSIM-6-HYD* zakupionego ze środków programu Doktorat Wdrożeniowy. Wykaz elementów i zespołów niezbędnych do wykonania stanowiska zawarto w tabeli 5.1.



Rys. 5.3. Schemat instalacji hydraulicznej zaprojektowanej w programie *D:FLUIDSIM-6-HYD*: a) bez mikrofiltracji, b) z mikrofiltracją stanowiska badawczego

Stanowisko do badań równoległych pozwala na realizację eksperymentu czynnego. Celowo ustalone i zmieniane były warunki brzegowe (początkowe) przed rozpoczęciem

badan i rejestrowane były wyniki, jako odpowiedź układu hydraulicznego na podstawie zadanych parametrów wejściowych. Parametrami wejściowymi był czas pracy dwóch instalacji hydraulicznych ustalony na 160 godzin przy założeniu 8 godzin pracy dziennie przez 20 dni, a parametrami wyjściowymi były próbki oleju pobrane z dwóch układów (bez i z mikrofiltracją) do badania oleju na klasę czystości, wilgotność względną, lepkość kinematyczną i badanie zużycia wybranego zespołu hydraulicznego. W przyszłości w ramach dalszych kierunków pracy przewiduje się również uwzględnienie parametrów układu hydraulicznego jak prędkość obrotowa i wydajność pompy oraz ciśnienie oleju, jako zmienne wielkości wejściowe.

Tab. 5.3. Wykaz elementów i zespołów niezbędnych do wykonania stanowiska do badań zasadniczych stanu oleju i zużycia elementów układu hydraulicznego

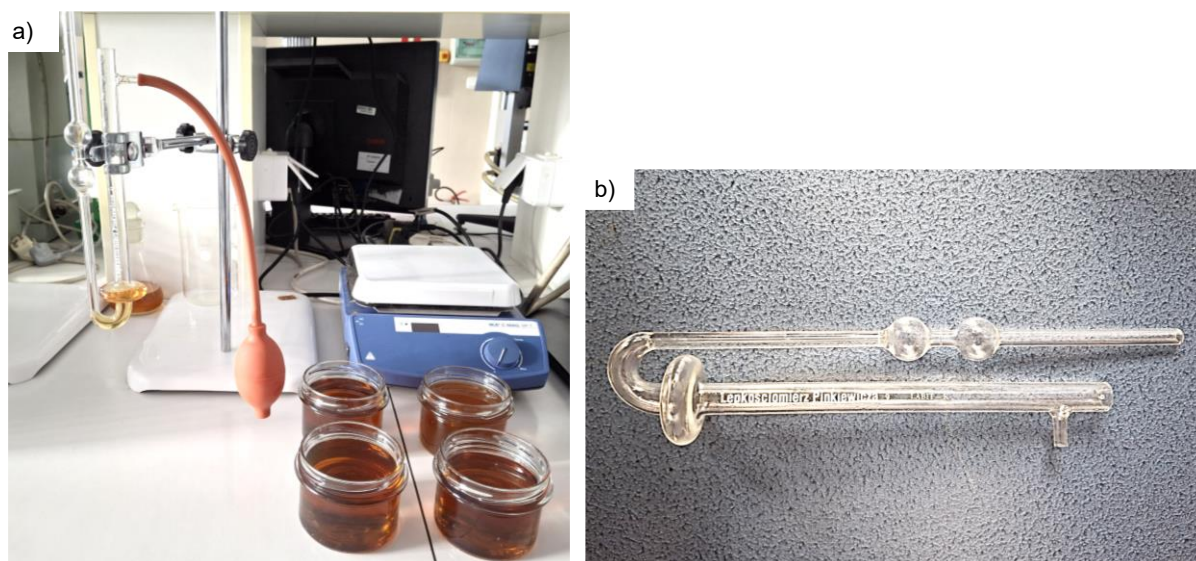
Lp.	Parametr	Oznaczenie handlowe	Wartość/Jednostka
1	Wskaźnik poziomu	TL-E-127-B-3-B-0-A-1-0-S	–
2	Zbiornik aluminiowy	AMAB-004	20 l
3	Zawór zwrotny 3/8"	BSP	50 l/min. 400 bar grzybek 4 bar
4	Pompa hydrauliczna zębata	HPPZ1-3,7-E-1-P-44-CC-N	–
5	Filtr powrotny	HP-OMTF091-NA	–
6	Silnik elektryczny	OMT4-801-4	0,55 kW 1380 obr/min
7	Blok zaworowy NG6 ES 3B 12Z	(A,B z boku P,T z dołu 1/2"; gniazda M+RV)	–
8	Zawór przelewowy	BM35 "X" (10-90) 803096	–
9	Rozdzielacz hydrauliczny	DG4V32CMUH760	–
10	Rozdzielacz hydrauliczny	DG4V32AMUH760	–
11	Korek wlewowy	TA46B10A001	–
12	Zestaw sprzęgieł z korpusem pośrednim	AKA04FS100Z4S	0,53kW-0,75kW B3-B5
13	Maszyna Kleenoil do mikrofiltracji	MS2+MM5	600 l/h
14	Siłownik hydrauliczny	SH40-220LP	Ø40, skok 220
15	Sprężyna powrotna	Macperson	Ø180-220, skok 85
16	Przewód hydrauliczny	DN10 2SCAA16×1,5 L1100	L=1m

Zbiorniki dwóch instalacji hydraulicznych zalane zostały olejem hydraulicznym typu *HV 46*, którego podstawowe parametry techniczne przedstawiono w tabeli 4.1 w podrozdziale 4.2 (obiekt badań na klasę czystości i wilgotności oleju). Do obu aluminiowych zbiorników wiano po 20 litrów nowego oleju, po mikrofiltracji do klasy *ISO 18/16/13*, co odpowiadało klasie 7 *NAS*. Takie działanie, mimo że nowy olej jest olejem pozaklasowym było niezbędne, aby uzyskać jednakowe początkowe warunki brzegowe do dalszych analiz stanu oleju po określonym czasie pracy dwóch układów hydraulicznych. Temperatura powietrza w pomieszczeniu w czasie pracy stanowiska oscylowała w zakresie 20-22°C.

5.2.2. Aparatura do badań lepkości kinematycznej

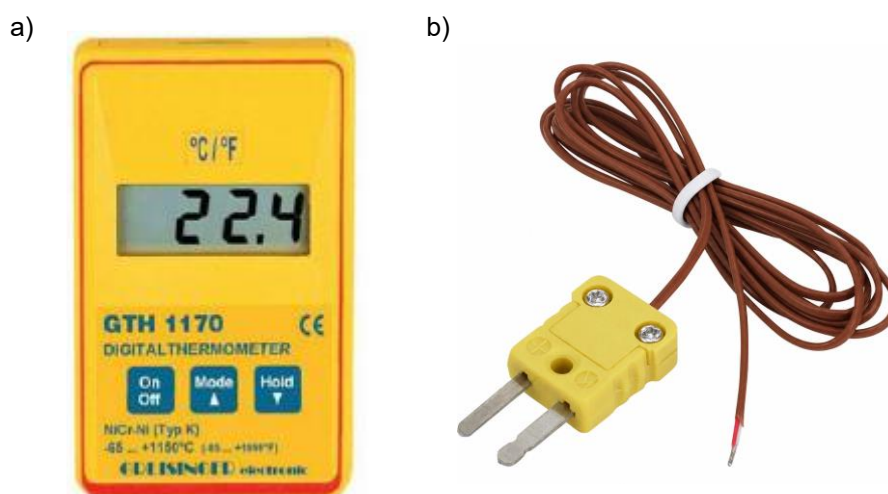
Badanie lepkości kinematycznej przeprowadzono z wykorzystaniem kapilary Ostwalda-Pinkiewicza ze stałą kapilary $k=0,4187$. Badanie wykonano zgodnie z wymaganiami zapisanymi w normie *PN-EN ISO 3103* pt. Oznaczenie lepkości kinematycznej przez pomiar czasu przepływu cieczy przez kapilarę grawitacyjną. W tym celu, aby spełnić wymagania normatywne kapilarę z badanym olejem umieszczono w szklanym naczyniu z wodą

o temperaturze 40°C. W celu utrzymania stałej temperatury naczynie znajdowało się na urządzeniu podgrzewającym z regulacją temperatury. Na rysunku 5.4 przedstawiono widok przygotowania stanowiska do badania lepkości (kapilara zamocowana do statywu z pompką).



Rys. 5.4 a) Widok stanowiska do badania lepkości kinematycznej (kapilara na statywie z pompką) wraz z urządzeniem grzewczym i próbkami oleju, b) widok kapilary Ostwalda-Pinkiewicza [fot. S. Kołodziejcki]

W celu kontroli temperatury wody w naczyniu z kapilarą, zastosowano cyfrowy termometr (rejestrator temperatury) Greisinger *GTH 1170* wraz z termoparą (sondą zanurzeniową) typu *K*, co przedstawia rysunek 5.5. W tabeli 5.4 podane parametry techniczne urządzeń.



Rys. 5.5 Widok: a) cyfrowego termometru Greisinger *GTH 1170*, b) czujnika temperatury typu *K TP-202* [35]

Tab. 5.4. Parametry techniczne układu do pomiaru temperatury wody podczas badania lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego

Cyfrowy termometr Greisinger <i>GTH 1170</i>		Czujnik temperatury typu <i>K TP-202</i>	
Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy	-65,0 +199,9°C i -65 +1150°C	Zakres pomiarowy	-40°C +260°C
Rozdzielczość	0,1°C lub 1°C	Czułość	41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Dokładność	$\pm 0,05\%$	Dokładność	$\pm 0,75\%$
Typ czujnika	Termopara typu <i>K</i> (NiCr-Ni)	Klasa 2	PN-EN 60584
Częstotliwość	3 pomiary/s	Długość przewodu	1 m
Temperatura pracy	-25 ... +50°C	Typ złącza	MT (mini-K)
Zasilanie	Bateria 9V IEC 6F22	Oznaczenie handlowe	IEC 60584
Wymiary	106×67×30	Materiał osłony	Inconel

W pierwszej kolejności dla nowego oleju hydraulicznego typu *HV 46* wykonano serię 17 powtórzeń badań lepkości kinematycznej w temperaturze 40°C w celu obserwacji zmian ν w kolejnych pomiarach przy stałych warunkach brzegowych. W tabeli 5.5 przedstawiono wyniki pomiaru czasu przepływu oleju przez kapilarę ustalonej objętości oleju oraz wartość lepkości kinematycznej wyznaczonej z zależności (5.1).

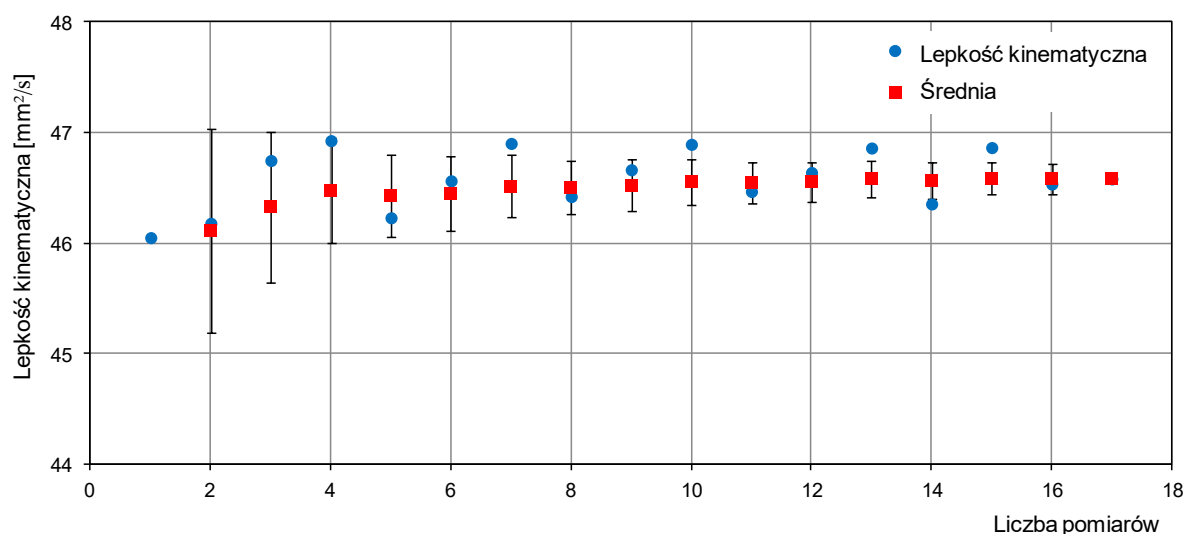
$$\nu = k \cdot t \quad (5.1)$$

gdzie: k – stała kapilary Ostwalda-Pinkiewicza, $k=0,4187$,
 t – czas przepływu przez kapilarę w [s].

Tab. 5.5. Wyniki czasu spływu oleju przez kapilarę Ostwalda-Pinkiewicza oraz lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego typu *HV 46*

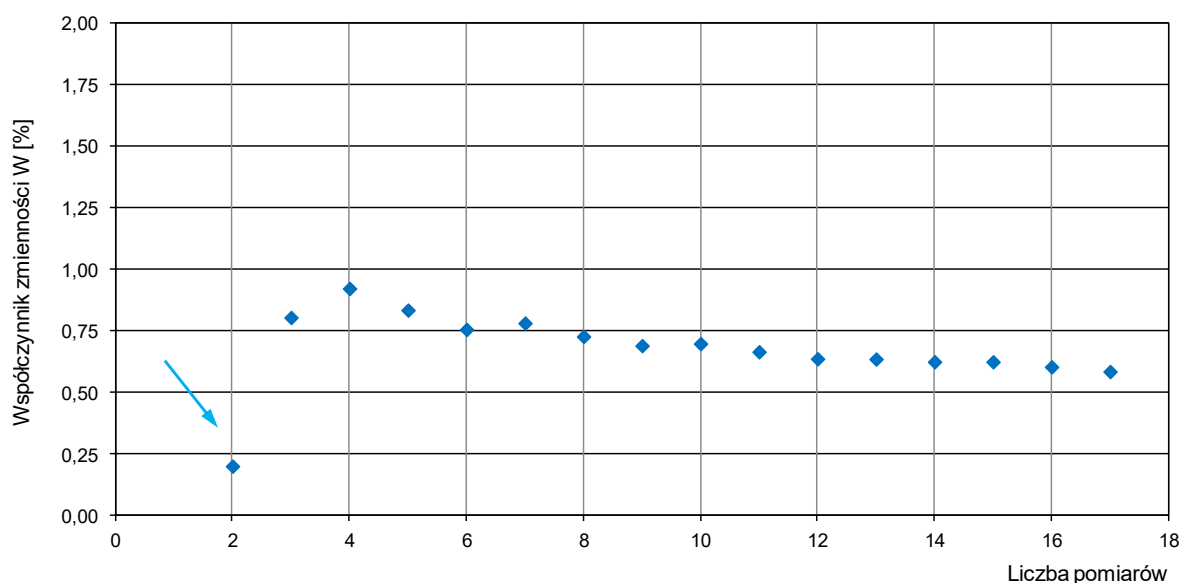
Pomiar	Czas spływu oleju [s]	Temperatura oleju [°C]	Lepkość kinematyczna [mm ² /s]
1	109,98	40,8	46,05
2	110,29	40,6	46,18
3	111,65	40,5	46,75
4	112,08	40,2	46,93
5	110,41	40,5	46,23
6	111,21	40,3	46,56
7	112,02	40,1	46,90
8	110,87	40,4	46,42
9	111,45	40,2	46,66
10	112,00	40,0	46,89
11	110,98	40,4	46,47
12	111,39	40,2	46,64
13	111,92	40,1	46,86
14	110,71	40,4	46,35
15	111,93	40,0	46,87
16	111,14	40,3	46,53
17	111,25	40,3	46,58

Na rysunku 5.6 przedstawiono zmiany lepkości kinematycznej oraz wartość średnią z 17 pomiarów z uwzględnieniem górnej i dolnej granicy przedziału ufności przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$.



Rys. 5.6 Przebieg wartości lepkości kinematycznej oraz średnia jego wartość z 17 pomiarów wraz z dolną i górną granicą przedziału ufności

Na rysunku 5.7 jest przedstawiony procentowy przebieg współczynnika zmienności W (zależność (4.5)) wyznaczonego z badania lepkości kinematycznej, na podstawie którego możliwe było określenie liczby pomiarów.



Rys. 5.7 Przebieg współczynnika zmienności W dla 17 pomiarów lepkości kinematycznej nowego oleju HV 46

Na podstawie rysunku 5.7, po wykonaniu 17 pomiarów lepkości kinematycznej oleju w tych samych warunkach temperaturowych ($40 \pm 0,1^\circ\text{C}$) stwierdzono, że minimalna liczba powtórzeń, zapewniających otrzymanie wyników ν w oczekiwanym przedziale ufności, przy przyjętym poziomie istotności $\alpha=0,05$, to 2 pomiary czasu spływu oleju przez kapilarę Ostwalda-Pinkiewicza do obliczenia lepkości kinematycznej. Należy podkreślić, że dla wszystkich pomiarów nie przekroczono wartości 1% współczynnika zmienności W . Jego najniższa wartość (około 0,25%) uzyskana została po drugim pomiarze. Stwierdza się (podobnie jak w badaniach wilgotności względnej) bardzo dobrą powtarzalność pomiarów. W badaniach naukowych wartości współczynnika zmienności poniżej 10% świadczą o bardzo małej zmienności, a w przypadku badań laboratoryjnych jest to stwierdzane przy wartości współczynnika zmienności poniżej 5%.

Dla badania lepkości kinematycznej wyznaczono błąd pomiaru metodą różniczeki logarytmicznej [125], zgodnie z zależnością (5.2).

$$\begin{aligned} \ln \nu &= \ln K + \ln t \\ \frac{\Delta \nu}{\nu} &= \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta t}{t} \\ \frac{\Delta K}{K} &= 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Zważywszy, że na błąd pomiaru zgodnie z zależnością (5.2) ma bezpośredni wpływ dokładność pomiaru czasu spływu oleju t przez kapilarę, która dla temperatury $40,0^\circ\text{C}$ wyniosła 112 s (tabela 5.1) przy stałej wartości kapilary $k=0,4187$ (błąd kapilary $\Delta k/k=0$). W pomiarze czasu spływu oleju należy uwzględnić czas reakcji operatora na włączenie i wyłączenie stopera, który wynosi ok. 0,2 s dla przeciętnej reakcji [122], co pozwoli na wyznaczenie błędu pomiaru czasu $\Delta t/t$. Dla dokładnego określenia błędu lepkości kinematycznej zależność (5.2) rozbudowano o składnik związany z dokładnością pomiaru temperatury przez cyfrowy termometr Greisinger *GTH 1170* i sondę pomiarową typu *K*. Ostateczną postać na różniczkę logarytmiczną przedstawia zależność (5.3).

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta T}{T}$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T_{GTH}}{T} + \frac{\Delta T_K}{T} \quad (5.3)$$

gdzie: ΔT_{GTH} – dokładność cyfrowego termometru Greisinger *GTH 1170*; $0,05\% \cdot 40^\circ\text{C}$,
 ΔT_K – dokładność sondy pomiarowej typu *K*; $0,75\% \cdot 40^\circ\text{C}$.

Przy założeniu czasu reakcji operatora $0,2$ s, po uwzględnieniu czasu na włączenie i wyłączenie stopera, błąd czasu spływu oleju przez kapilarę wyniósł $\Delta t/t = 0,4\text{s}/112\text{s} = 0,00357$ tj. $0,357\%$. Dla temperatury 40°C dokładność cyfrowego termometru wynosi $0,05\% \cdot 40 = 0,020^\circ\text{C}$, a dla termopary $0,75\% \cdot 40 = 0,300^\circ\text{C}$ zgodnie z danymi podanymi w tabeli 5.1. Łączny błąd temperatury wyniósł $\Delta T = 0,020 + 0,300 = 0,320^\circ\text{C}$, wówczas $\Delta T/T = 0,008$ tj. $0,8\%$. Całkowity błąd względny z uwzględnieniem czasu i temperatury wyniósł:

$$\frac{\Delta v}{v} = 0,00357 + 0,008 = 0,01157$$

$$\frac{\Delta v}{v} = 1,157\% \quad (5.4)$$

Ostateczne wyznaczenie błędu bezwzględnego lepkości kinematycznej wyniosło:

$$\Delta v = v \cdot 0,01157$$

$$\Delta v = 46,8944 \cdot 0,01157 \quad (5.5)$$

$$\Delta v = 0,54 \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right]$$

Dla pomiaru lepkości kinematycznej wynik końcowy wyniósł $v = (46,89 \pm 0,54) \text{mm}^2/\text{s}$, po zaokrągleniu $v = 46,9 \pm 0,5 \text{mm}^2/\text{s}$. Należy podkreślić, że pomiar temperatury nie występuje formalnie w zależności na obliczenie lepkości kinematycznej zgodnie z zależnością (5.1), jej wpływ jest potraktowany, jako dodatkowa składowa niepewności warunków pomiaru, co stwierdzono podczas badań lepkościowych. Bez uwzględniania dokładności pomiaru temperatury oleju błąd lepkości kinematycznej jest znacząco mniejszy (dwukrotnie niższy od wpływu pomiaru temperatury tj. $0,37$ cSt) i wynosi $0,17$ cSt zamiast $0,54$ cSt.

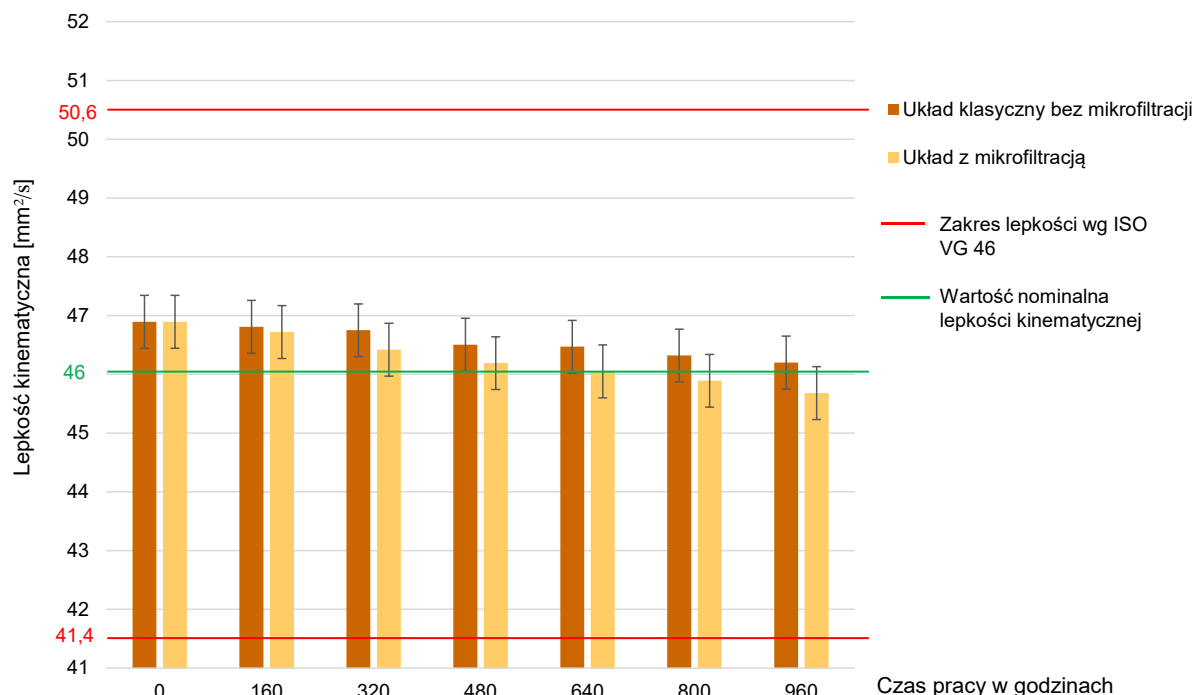
5.2.3. Wyniki badań lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego

Wyniki z pomiaru lepkości kinematycznej olejów hydraulicznych typu *HV 46* pochodzących z dwóch układów hydraulicznych stanowiska do badań równoległych przedstawiono w tabeli 5.6.

Tab. 5.6. Wyniki czasu spływu oleju przez kapilarę Ostwalda-Pinkiewicza oraz lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego typu *HV 46*

Czas pracy w godzinach	Bez mikrofiltracji		Z mikrofiltracją	
	Czas spływu oleju [s]	Lepkość kinematyczna [mm^2/s]	Czas spływu oleju [s]	Lepkość kinematyczna [mm^2/s]
0	112,00	46,89	112,00	46,89
160	111,80	46,81	111,58	46,72
320	111,66	46,75	110,87	46,42
480	111,07	46,51	110,32	46,19
640	110,99	46,47	109,98	46,05
800	110,63	46,32	109,60	45,89
960	110,34	46,20	109,10	45,68

Graficzne przedstawienie zbiorcze wyników lepkości kinematycznej wyznaczonej z zależności 5.1 dla układu klasycznego (bez mikrofiltracji) oraz z dodatkową zewnętrzną mikrofiltracją zaprezentowano na rysunku 5.8. Na wykresach słupkowych zawarto błąd bezwzględny lepkości kinematycznej obliczony z zależności (5.2)-(5.5). Na wykresie podano również zakres tolerancji lepkości kinematycznej (od 41,4 do 50,6 cSt) wynikający z klasy lepkości *ISO VG 46* według normy *ISO 3448*.



Rys. 5.8 Zależność zmiany lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego typu *HV 46* w zależności od typu układu (bez i z mikrofiltracją) oraz od czasu (w godzinach) pracy układów hydraulicznych

Analizując wyniki zmiany lepkości kinematycznej olejów hydraulicznych w funkcji czasu pracy układów hydraulicznych bez i z mikrofiltracją stwierdzono, że do 960 godzin pracy stanowiska nie zaobserwowano zmiany wartości poza granice tolerancji lepkości określonej w normie *ISO 3448* dla oleju o klasie lepkościowej 46. Natomiast zaobserwowano, że olej nie poddawany dodatkowej mikrofiltracji (układ klasyczny) w każdym przypadku wykazywał wyższą wartość lepkości od oleju dodatkowo filtrowanego maszyną Kleenoil *MS2+MM5*. W obu przypadkach układów hydraulicznych w kolejnych godzinach pracy lepkość kinematyczna obniżała się, jednak w układzie klasycznym, spadek lepkości był wolniejszy od układu z mikrofiltracją.

Tab. 5.7. Przyczyny zmiany lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego w oparciu o przegląd literaturowy

Wzrost lepkości kinematycznej oleju	Spadek lepkości kinematycznej oleju
Spadek temperatury oleju poniżej 40°C	Wzrost temperatury oleju powyżej 40°C
Utlenianie się oleju	Przegrzewanie układu hydraulicznego
Starzenie oleju	Ścinanie bazy oleju, niszczenie wiązań węglowodorów
Wzrost zanieczyszczeń stałych	Ścinanie dodatków poprawiających lepkość
Mieszanie się oleju z olejem o wyższej lepkości	Napowietrzanie oleju przez kawitację i nieszczelności
Odparowanie lekkich frakcji oleju	Mieszanie się oleju z olejem o niższej lepkości
Degradacja dodatków uszlachetniających	Mieszanie się oleju z paliwem
Zanieczyszczenie wodą, powstanie emulsji olej-woda	Mieszanie oleju z wodą przed powstaniem emulsji o/w

Zmiany wartości lepkości kinematycznej od wartości nominalnej nie można podawać jedną przyczyną. W literaturze związanej z badaniami i eksploatacją olejów hydraulicznych

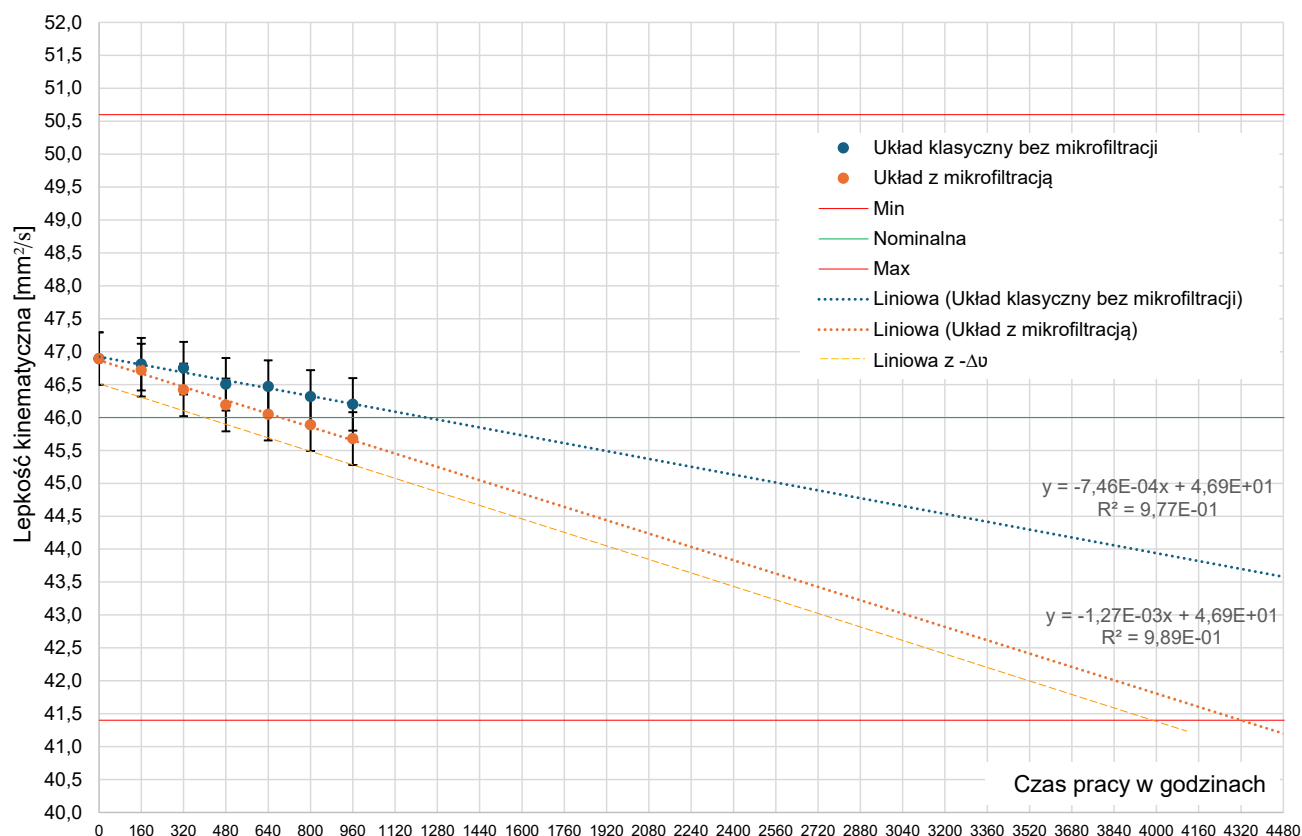
[37, 99, 123] zarówno dla spadku jak i wzrostu lepkości oleju podaje się różne czynniki, co zawarto w tabeli 5.7. W przypadku badań zasadniczych na stanowisku z instalacją bez i z mikrofiltracją spadek lepkości można tłumaczyć ścinaniem bazy olejowej oraz dodatków poprawiających lepkość. Stanowisko pracowało przy temperaturze oleju nieprzekraczającej 50°C, co nie wpływało na przegrzewanie się oleju, nie dochodziło do napowietrzenia oleju powietrzem ze względu na prostą instalację hydrauliczną, w której odbiornikiem był jeden siłownik hydrauliczny pracujący cyklicznie na wysunięcie i wsunięcie sterowany z rozdzielacza hydraulicznego. Nie dochodziło do mieszania się oleju z innymi substancjami.

W przypadku różnicy lepkości oleju między instalacją z mikrofiltracją *MF* i bez mikrofiltracji, wyższa wartość lepkości w przypadku układu bez *MF* tłumaczy się stale wzrastającą ilością zanieczyszczeń stałych pochodzących z produktów zużycia rozdzielacza i siłownika hydraulicznego. W układzie z *MF* zanieczyszczenia stałe są stale zatrzymywane na bocznikowym filtrze celulozowym. Wzrostu lepkości oleju w układzie bez mikrofiltracji względem układu z *MF* nie można wyjaśniać utlenianiem i starzeniem oleju ponieważ instalacja pracowała bez obciążenia i przegrzewania się oleju powyżej 50°C. Stanowisko pracowało przez 120 dni po 8 godzin dziennie, a pomiary lepkości i klasy czystości wykonywane były, co 160 godzin pracy, tj. po 20 dniach. Wzrostu lepkości również nie można wyjaśniać mieszaniem się oleju z innymi substancjami o wyższej lepkości ani odparowaniem lekkich frakcji oleju i niszczeniem dodatków uszlachetniających. W przyszłości planuje się przeprowadzić pełne analizy chemiczne próbek oleju w celu potwierdzenia wyeliminowanych przyczyn wzrostu i spadku lepkości oleju. Zasadniczym wnioskiem z przeprowadzonych badań na stanowisku z klasycznym układem hydraulicznym jest fakt, że badania na lepkość oleju należy przeprowadzić po jego filtracji, aby wykluczyć zanieczyszczenia powodujące wzrost lepkości kinematycznej oleju. W eksploatacji maszyn budowlanych i drogowych pobranie próbki oleju na sprawdzenie lepkości kinematycznej po określonym czasie pracy maszyny nie pozwoli na otrzymanie rzeczywistej wartości lepkości. Jej wzrost może nawet spowodować w ocenie osoby wykonującej pomiar bez szczegółowych badań laboratoryjnych decyzje o przedłużeniu czasu pracy maszyny budowlanej bez wymiany oleju, co wpłynie na przyspieszone zużycie ściernie elementów mechanicznych instalacji hydraulicznej ze względu na znaczną ilość zanieczyszczeń stałych.

Na podstawie przeprowadzonych badań i znajomości tolerancji lepkości kinematycznej dla oleju hydraulicznego *HV 46* (od 41,4 do 50,6 cSt) oszacowano regresyjnymi modelami liniowymi przebieg dla układu hydraulicznego do wymiany oleju przy granicznej lepkości kinematycznej oleju wynoszącej 41,4 cSt, co przedstawiono w tabeli 5.8 i na rysunku 5.9. W tabeli dodatkowo w modelach na lepkość kinematyczną uwzględniono błąd bezwzględny Δv .

Tab. 5.8. Zależność na lepkość kinematyczną oleju oraz oszacowana wartość przebiegu w godzinach pracy do wymiany oleju przy granicznej wartości lepkości kinematycznej

Lp.	Typ instalacji hydraulicznej	Model regresyjny	Oszacowany przebieg do wymiany oleju
1	Bez mikrofiltracji MF	$v_{bez_MF} = -7,46 \cdot 10^{-4} t_p + 4,69 \cdot 10^1$ (5.6)	7372 h
2	Z mikrofiltracją MF	$v_{z_MF} = -1,27 \cdot 10^{-3} t_p + 4,69 \cdot 10^1$ (5.7)	4330 h
3	Bez MF - Δv	$v_{bez_MF-\Delta v} = -7,46 \cdot 10^{-4} t_p + 4,64 \cdot 10^1$ (5.8)	6702 h
4	Z MF - Δv	$v_{z_MF} = -1,27 \cdot 10^{-3} t_p + 4,64 \cdot 10^1$ (5.9)	3937 h
Δv – błąd bezwzględny lepkości kinematycznej, $\Delta v=0,54$ [cSt] t_p – czas pracy układu hydraulicznego w godzinach			



Rys. 5.9 Zależność lepkości kinematycznej wyrażonej w mm²/s od czasu pracy przy modelowaniu godzin pracy do osiągnięcia granicznej lepkości wynoszącej 41,4 w mm²/s

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 5.9 na podstawie badań lepkościowych stwierdzono, że układ z mikrofiltracją nie wydłuża czasu użytkowania oleju do osiągnięcia minimalnej wartości lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego względem układu bez mikrofiltracji. Wykonując pomiar lepkości oleju bez jego wcześniejszego filtrowania uzyska się wyższą wartość lepkości v ze względu na obecność zanieczyszczeń w oleju. Natomiast układ z dodatkową mikrofiltracją oleju wpłynie na wydłużenie czasu użytkowania układu hydraulicznego ze względu na spowolnienie procesów zużyciowych (zużycia ściernego) i korozji wewnętrznej elementów metalowych z racji obecności wody w oleju hydraulicznym.

W tabeli 5.8 przedstawiono regresyjne modele liniowe zmiany lepkości kinematycznej w zależności od czasu pracy wyrażonego w godzinach dla układu klasycznego i z mikrofiltracją (zależności (5.6) i (5.7)). Zważywszy, że pomiar lepkości obarczony jest błędem dokładności pomiaru temperatury oraz reakcji na włączenie i wyłączenie stopera przy pomiarze czasu spływu oleju przez kapilarę, zależności (5.8) i (5.9) uwzględniają obniżoną lepkość kinematyczną o błąd bezwzględny wynoszący 0,54 (dolna wartość słupka błędów). Zależności od (5.6) do (5.9) jako funkcje aproksymujące zostały wyznaczone w celu ich przekształcenia do wyznaczenia czasu t_p pracy układu hydraulicznego do osiągnięcia granicznej dolnej wartości lepkości kinematycznej oleju tj. 41,04. Jest to przecięcie dolnej poziomej asymptoty z funkcją regresyjną. Punkt przecięcia tych funkcji określa czas, w którym osiągnięto graniczną wartość lepkości kinematycznej. W tabeli 5.8 podano obliczone czasy do wymiany oleju w układzie hydraulicznym z mikrofiltracją i bez mikrofiltracji. Uwzględniając dodatkowo błąd lepkości kinematycznej czas do wymiany oleju hydraulicznego oszacowano na około 4000 h (bez błędów Δv na 4300 h). W przypadku badania oleju na lepkość kinematyczną bez wcześniejszej mikrofiltracji uzyska się zawyżoną jej wartość i błędnie oszacuje się czas pracy oleju do osiągnięcia granicznej wartości lepkości v . Wówczas

oszacuje się czas pracy oleju (dla układu klasycznego) na 6700 h, co jest wartością zawyżoną o 1,7 razy względem czasu pracy oleju po mikrofiltracji.

Na podstawie badań oraz przeglądu literaturowego sformułowano wniosek, że mimo zapisów w dokumentacji technicznej maszyny, czas na wymianę oleju hydraulicznego jest uzależniony od trzech czynników. Jest to spadek lepkości poniżej wartości krytycznej, podwyższona wartość liczby kwasowej oleju oraz stężenie zanieczyszczeń i zawartość wody w oleju. Zanieczyszczenia i woda usuwane są poprzez mikrofiltrację, podwyższona liczba kwasowa nie wpływa na agresywność korozyjną oleju ze względu na właściwości przeciwkorozyjne oleju, co podaje literatura [62]. Stwierdzono, że tylko spadek lepkości kinematycznej determinują chwilę czasową do wymiany oleju.

5.2.4. Wyniki badań klasy czystości oleju hydraulicznego

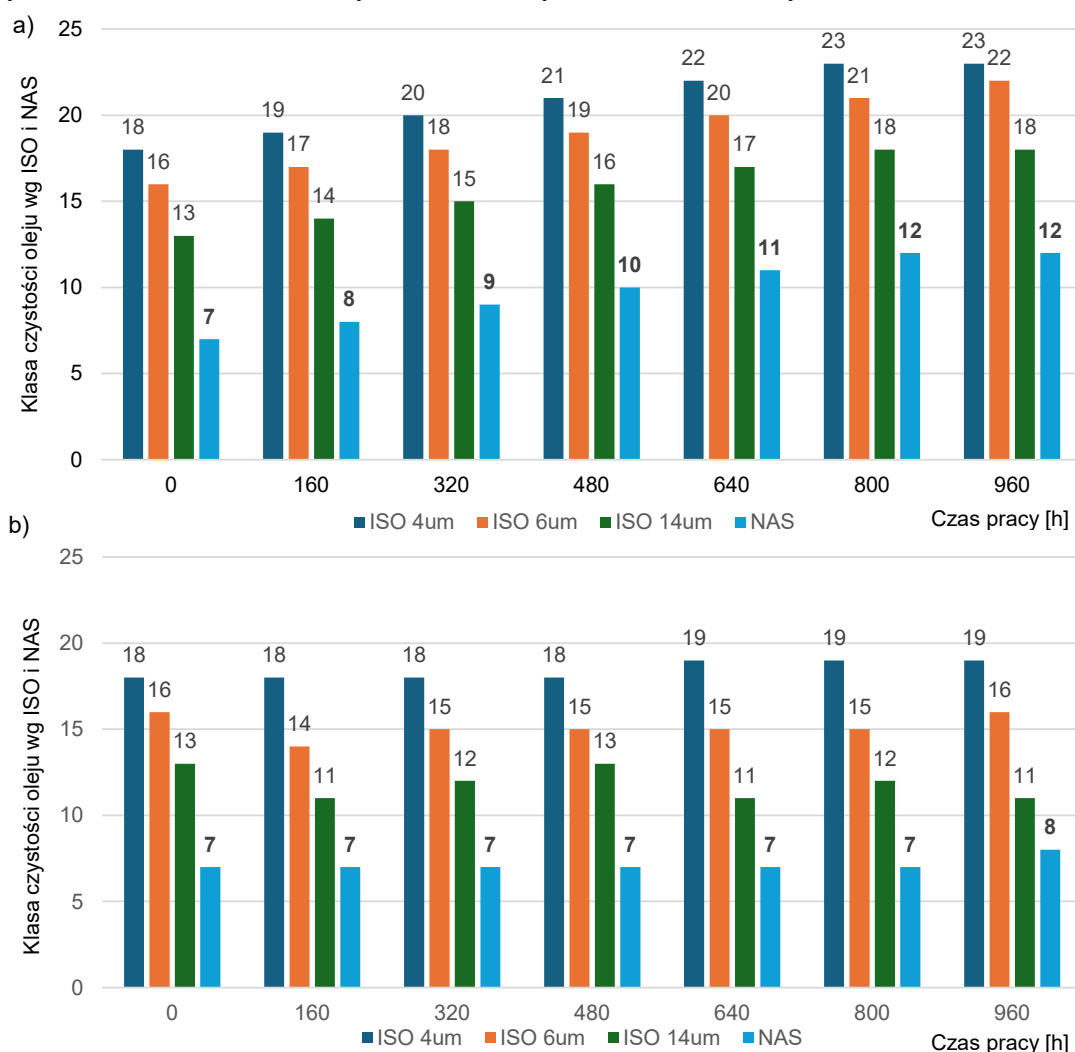
Następnym etapem prac, było dla zebranych próbek oleju pochodzącego z dwóch instalacji hydraulicznych (bez i z mikrofiltracją) po badaniach lepkościowych – wyznaczenie klasy czystości zgodnie z *ISO 4406:99* i *NAS 1638*. W tabeli 5.9 oraz na rysunku 5.10 przedstawiono wyniki z badań czystości oleju na przenośnym laboratorium stanu oleju firmy ArgoHytos. Badania lepkości kinematycznej oleju oraz klasy czystości poprzedzono badaniem nowego oleju i jego filtracją do uzyskania klasy *ISO 18/16/13*, która równoważna jest z 7 klasą *NAS*.

Tab. 5.9. Wyniki pomiaru klasy czystości oleju i wilgotności względnej *RH* na przenośnym laboratorium stanu oleju OPCoMII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos wg norm *ISO 4406* i *NAS 1638*

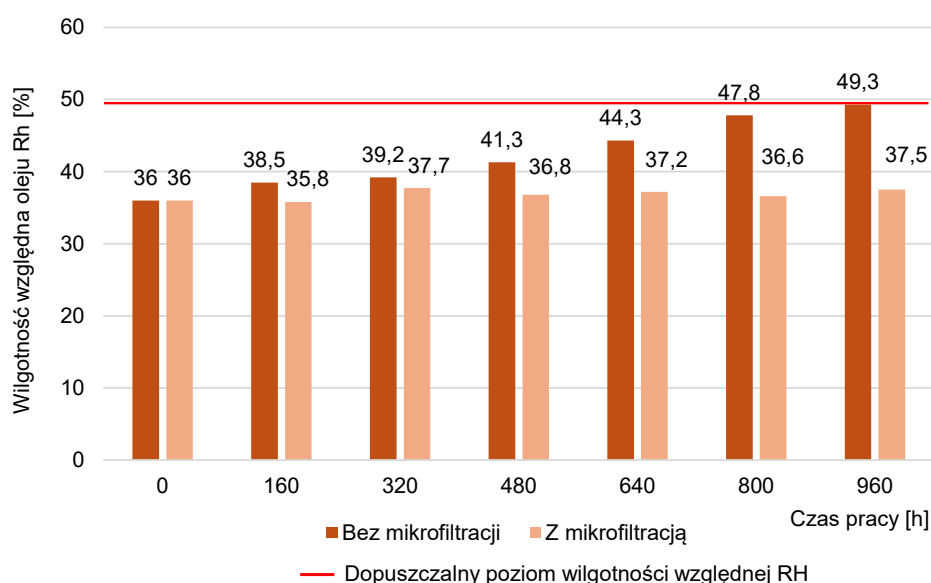
Czas pracy w godzinach	Bez mikrofiltracji				
	ISO 4 µm	ISO 6 µm	ISO 14 µm	NAS	RH* [%]
0	18	16	13	7	36,00
160	19	17	14	8	38,50
320	20	18	15	9	39,20
480	21	19	16	10	41,30
640	22	20	17	11	44,30
800	23	21	18	12	47,80
960	23	22	18	12	49,30
Czas pracy w godzinach	Z mikrofiltracji				
	ISO 4 µm	ISO 6 µm	ISO 14 µm	NAS	RH [%]
0	18	16	13	7	36,00
160	18	14	11	7	35,80
320	18	15	12	7	37,70
480	18	15	13	7	36,80
640	19	15	11	7	37,20
800	19	15	12	7	36,60
960	19	16	11	8	37,50
* do 50% -woda całkowicie rozpuszczona, bezpieczny i akceptowalna ilość wody w oleju, od 50 do 70% - woda całkowicie rozpuszczona, przyspieszone starzenie się oleju hydraulicznego.					

Podczas badania czystości oleju, urządzenie OPCoMII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 jednocześnie generuje wynik z badania wilgotności względnej w danej temperaturze oleju. Na rysunku 5.11 przedstawiono wyniki wilgotności *RH* oleju pochodzącego z dwóch typów instalacji hydraulicznych podczas pomiaru wykonywanego co 160 godzin pracy, aż do osiągnięcia 960 godzin pracy dwóch stanowisk (bez i z mikrofiltracją). Na wykresie linią czerwoną zaznaczono graniczny przedział dopuszczalnej wilgotności tj. do 50%. Przy tej wartości zgodnie z pracą [58] zawartość wody w oleju nie jest szkodliwa dla układu

hydraulicznego i nie przyspiesza jego zużycia ściernego na głównych zespołach jak pompy hydrauliczne, rozdzielacze hydrauliczne czy siłowniki i zawory.



Rys. 5.10 Wyniki klasy czystości oleju hydraulicznego wg normy *ISO 4406:99* i normy *NAS 1638* w zależności od czasu i typu układu hydraulicznego: a) bez mikrofiltracji, b) z mikrofiltracją



Rys. 5.11 Wyniki wilgotności względnej *RH* oleju hydraulicznego *HV 46* w zależności od czasu i typu układu hydraulicznego: a) bez mikrofiltracji, b) z mikrofiltracją

Analizując dane przedstawione w tabeli 5.9 oraz na rysunku 5.10 stwierdzono po badaniach, że dodatkowy boczny układ do mikrofiltracji zainstalowany do obwodu głównego stanowiska badawczego utrzymuje klasę czystości na poziomie 7 według *NAS* do 800 godzin pracy. Dalsze 160 godzin pracy spowodowało wzrost o jedną klasę *NAS* tj. do 8. Według normy *ISO 4406* zanieczyszczenia do 4 μm jak i do 6 μm utrzymywały się na tym samym poziomie (19-18) i (15-16). Natomiast zanieczyszczenia do 14 μm spadły z poziomu 12-13 na 11, co świadczy o wysokiej skuteczności w usuwaniu największych pod względem średnicy zanieczyszczeń. Należy podkreślić, że dodatkowy układ do mikrofiltracji po uruchomieniu stanowiska i pierwszych 160 godzin pracy obniżył klasę czystości oleju względem oleju jaki był wcześniej wlany do zbiornika i dofiltrowany do klasy 18/16/13. Po 160 h pracy układu klasa obniżyła się do *ISO* 18/14/11. Układ hydrauliczny bez dodatkowej mikrofiltracji w czasie pracy wykazał ciągły wzrost klasy czystości, a przepracowując 480 godzin spowodował, że olej stał się pozaklasowy do bezwzględnego oczyszczenia. W tym przypadku ilość zanieczyszczeń wpływa na wzrost zużycia elementów współpracujących w układzie hydraulicznym. Należy zaznaczyć, że stanowisko badawcze pracowało w warunkach pokojowych ze stałą temperaturą około 20-22°C, co spowolniło proces wzrostu klasy czystości oleju. Podejrzewa się, że gdyby stanowisko pracowało na zewnątrz, wpływ czynników atmosferycznych przyspieszyłby wzrost zanieczyszczenia oleju oraz przyrost wody i tym samym wzrost klasy czystości oleju.

Analizując wyniki wilgotności względnej olejów z dwóch układów hydraulicznych stwierdzono, że dodatkowa mikrofiltracja utrzymuje zbliżoną wartość wilgotności względnej na poziomie 36-37,5%. W przypadku układu bez mikrofiltracji przy każdym pomiarze co 160 godzin pracy układu obserwowano wzrost *RH* do wartości 49,3% z 36% po 960 godzinach pracy. Osiągając wartość ponad 49% zgodnie z [8] i opisem pod tabelą 5.9 zawartość wody w oleju przyspiesza korozję i zużycie układów mechanicznych w instalacji hydraulicznej.

5.3. Podsumowanie badań lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego

Na podstawie badań lepkości kinematycznej i klasy czystości oleju hydraulicznego typu *HV 46* na stanowisku do badań równoległych stwierdzono, że:

- 1) Zmiany wartości lepkości od poziomu nominalnego mogą wynikać z szeregu czynników, które towarzyszyły instalacji hydraulicznej w czasie pracy jak: praca w temperaturze oleju ponad 50°C, praca pod stałym wysokim obciążeniem powodująca niszczenie wiązań węglowodorowych bazy olejowej, wzrost zanieczyszczeń stałych, wzrost poziomu wody w oleju, starzenie i utlenianie się oleju w czasie pracy czy degradacja dodatków uszlachetniających olej w szczególności dodatku poprawiającego lepkość.
- 2) Czynniki, jakie towarzyszą w czasie pracy układu hydraulicznego z jednej strony mogą podnosić wartość lepkości kinematycznej, a z drugiej strony mogą go obniżać.
- 3) Uzyskanie jednej wartości lepkości kinematycznej oleju wykonanego w warunkach eksploatacyjnych nie będzie odzwierciedlać rzeczywistej wartości lepkości
- 4) Mikrofiltracja oleju hydraulicznego przed badaniem lepkościowym pozwala na wyeliminowanie dwóch czynników podwyższających lepkość jak obecność zanieczyszczeń stałych i woda, która w dużym stężeniu tworzy emulsje olejowo-wodną.
- 5) Olej po mikrofiltracji w badaniach lepkościowych uzyskuje niższą wartość o około 0,3-0,5 cSt względem oleju bez wcześniejszego filtrowania, w zależności od czasu pracy układu hydraulicznego.

- 6) Wyniki lepkości kinematycznej oleju bez mikrofiltracji względem oleju po mikrofiltracji są zawyżone o około 1,7 razy, co nie świadczy, że olej bez mikrofiltracji utrzymuje swoje właściwości lepkościowe zgodnie z uzyskaną wartością.
- 7) Trwałość oleju hydraulicznego w rozumieniu spełnienia dolnej granicy lepkości kinematycznej na podstawie badań stanowiskowych na dwóch układach (bez i z mikrofiltracją) można oszacować na 4000 godzin pracy uwzględniając jednocześnie błąd bezwzględny wykonania pomiaru lepkości $\Delta v = 0,54$ cSt.
- 8) Dodatkowa mikrofiltracja oleju hydraulicznego, jako układ *by-pass* utrzymuje klasę czystości i wilgotność względną *RH* na poziomie oleju wlanego do układu przez ponad 800 godzin pracy.
- 9) W zależności od wydajności układu do mikrofiltracji w pierwszych godzinach pracy można dofiltrować olej do jeszcze niższej klasy względem oleju wlanego do układu hydraulicznego.
- 10) Układ z mikrofiltracją utrzymuje zawartość wody w układzie jak w przypadku oleju wlanego, natomiast układ bez *MF* stale w kolejnych godzinach pracy zwiększa ilość wody w oleju osiągając poziom 50% po około 1000 godzin pracy.

6. BADANIA ZUŻYCIA ZESPOŁÓW UKŁADU HYDRAULICZNEGO

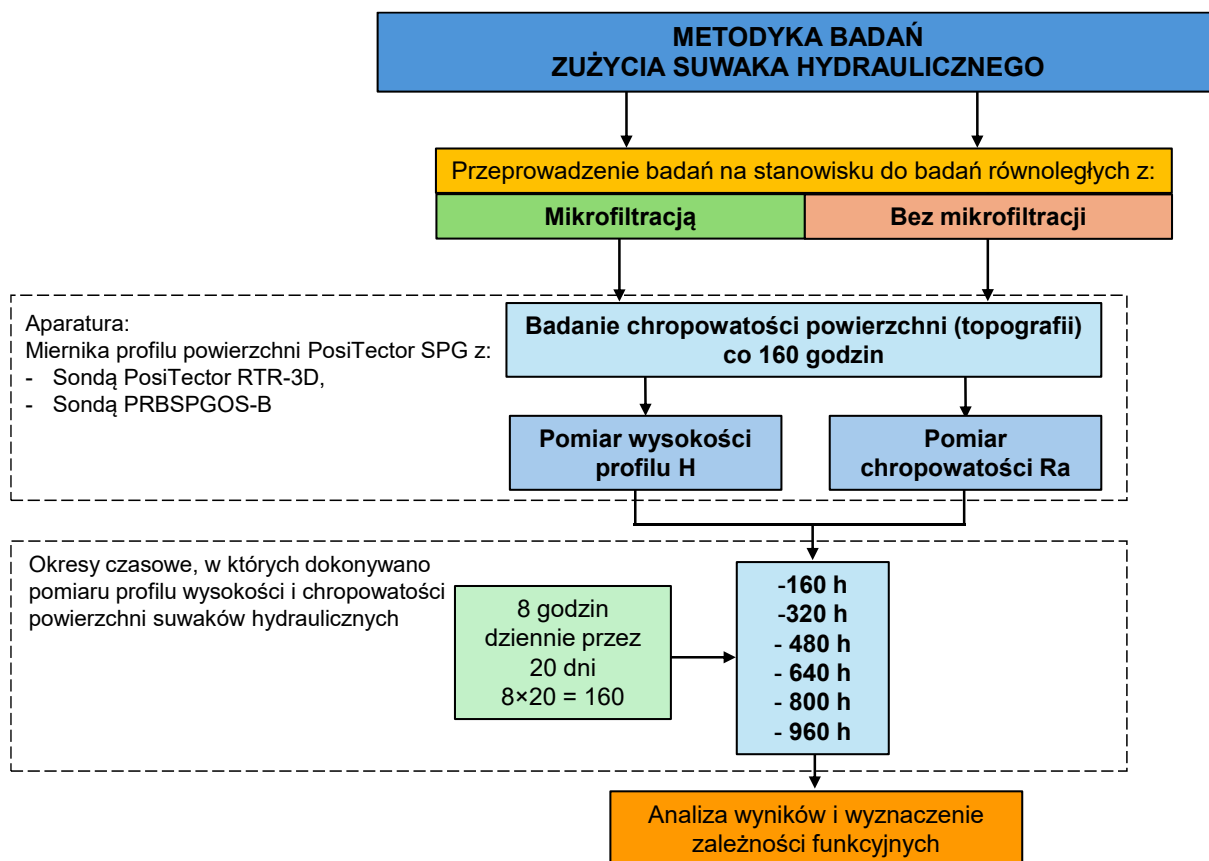
6.1. Cel badań zużycia wybranych zespołów układu hydraulicznego

Celem badań była ocena zużycia wybranego zespołu układu hydraulicznego pracującego w dwóch układach hydraulicznych tj. bez i z dodatkową mikrofiltracją. Wybrano zespół suwak-obudowa w rozdzielaczu hydraulicznym ze względu na możliwość obserwacji zużycia na suwakach hydraulicznych. Zważywszy, że w układach hydraulicznych nie można dokonać pomiaru wagowego zużycia wyrażonego w gramach ani liniowego w milimetrach, ze względu na wartość luzów, jakie występują w układzie wyrażonych w μm , zdecydowano o ocenie zużycia przez pomiar chropowatości powierzchni. W przypadku pomp hydraulicznych czy rozdzielaczy w zależności od średnicy, luz montażowy wynosi $0,05 \div 0,1\%$ średnicy tłoczka lub suwaka. Dla przykładu przy średnicy suwaka wynoszącej 10 mm, luz montażowy wyniesie maksymalnie 10 μm (rozdzielacze przemysłowe), jednak w przypadku precyzyjnych rozdzielaczy tzw. zawory serwohydrauliczne luz ten wynosi 1-3 μm [11]. Analizę luzów w układach hydraulicznych szczegółowo przedstawiono w rozdziale 2.4 niniejszej pracy.

Badania zużyciowe rozdzielaczy hydraulicznych poprzedzone zostały równolegle z badaniami lepkościowymi oraz na klasę czystości z wilgotność względną oleju hydraulicznego.

6.2. Metodyka badań zużycia rozdzielacza hydraulicznego

Badania zużycia suwaków hydraulicznych przeprowadzone zostały zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Schemat blokowy metodyki badań zużycia suwaków hydraulicznych w badaniach zasadniczych

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6.1 badania przeprowadzono zgodnie z założeniami eksperymentu czynnego. Na stanowisku badawczym, w którym uruchomione były dwie instalacje hydrauliczne (bez i z mikrofiltracją), co 160 godzin pracy po wcześniejszym wyłączeniu pomp hydraulicznych z rozdzielaczy hydraulicznych demontowano suwak do pomiaru topografii tj. chropowatości powierzchni. Przerywanie pracy stanowiska badawczego również wynikało z potrzeby pobrania próbek oleju do badania lepkościowego i klasy czystości oleju. Badania prowadzono do 960 godzin pracy stanowiska, co wynikało z potrzeby wymiany oleju na nowy po 1000 godzinach pracy, co jest zapisem w wielu maszynach budowlanych czy drogowych.

6.2.1. Aparatura do badań zużycia

Badania profilu powierzchni suwaków rozdzielaczy hydraulicznych przeprowadzono miernikiem profilu powierzchni PosiTector SPG z dwiema sondami do pomiaru z taśmy kontrolnej oraz do powierzchni cylindrycznych, co przedstawiono na rysunku 6.2. Miernik profilu PosiTector SPG zakupiono ze środków na zakup infrastruktury w programie Doktorat Wdrożeniowy.



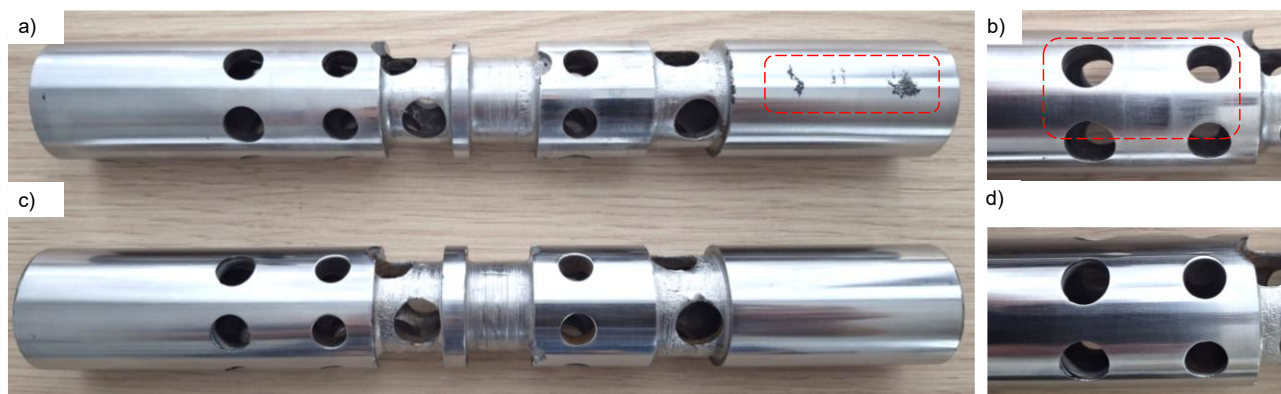
Rys. 6.2. Widok miernika profilu powierzchni PosiTector SPG wraz z wyposażeniem [fot. S. Kołodziejski]

Miernik PosiTector SPG jest urządzeniem do pomiaru chropowatości powierzchni po obróbce skrawaniem, strumieniowo-ściernej, powłok teksturowych i innych powierzchni jak drewno czy beton [120]. Urządzenie wyniki podaje w jednostkach μm i pozwala na wyznaczenie takich wielkości jak wysokość profilu H_L , gęstość szczytową powierzchni Spd , średnią chropowatość $3D S_a$ i średnią chropowatość $2D R_a$. Wybór przyrządu PosiTector SPG wynikał z faktu pomiaru nie na gotowych (wyciętych) próbkach lecz bezpośrednio na różnych powierzchniach w tym cylindrycznych w układzie hydraulicznym. Urządzenie pracuje w oparciu o metodę peak-to-valley tj. pomiar od najniższego punktu w dolinie do najwyższego punktu na wierzchołku. W tabeli 6.1 przedstawiono parametry techniczne miernika profilu powierzchni PosiTector SPG wraz sondą PRBRTR3D i kablową sondą PRBSPGOS-B typu V do powierzchni walcowych.

Tab. 6.1. Parametry techniczne miernika profilu powierzchni PosiTector SPG wraz sondami [120]

Urządzenie PosiTector SPG		Sonda PRBRTR3D		Sonda PRBSPGOS-B	
Parametr	Wartość	Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy	0-500 μm	Zakres pomiarowy H_L	20-115 μm	Zakres pomiarowy	0-500 μm
Dokładność	$\pm(5 \mu\text{m} + 5\%)$	Zakres R_t	10-115 μm	Dokładność	$\pm(5 \mu\text{m} + 5\%)$
Szybkość pomiaru	50 pomiarów/min	Dokładność pomiaru R_a	$\pm(0,25 \mu\text{m} + 5\%)$	Typ powierzchni	Wypukłe walcowe
Norma	ASTM D4417-B	Typ analizy	2D i 3D	Minimalna średnica	$\varnothing > 3 \text{ mm}$
Obudowa	IP65	Mierzone parametry	R_a, R_z, S_q, S_{pd}	Końcówka opcjonalna	30°
Zasilanie	Baterie AAA	Zapis danych	Plik SDF	Końcówka V	60°
Masa	140 g	Współpraca	z PosiTector	Normy	ASTM D4417-B AS3894.5-C
Wymiary	137×61×28	Odcisk z taśmy replikacyjnej typu	Testex	Konstrukcja	Sonda kablowa z rowkiem V

Na rysunku 6.3 przedstawiono widok dwóch suwaków rozdzielaczy hydraulicznych zainstalowanych w układzie bez jak i z dodatkową mikrofiltracją po 960 godzinach pracy. Natomiast na rysunku 6.4 przedstawiono widok naklejonych taśm replikacyjnych do odcisnięcia profilu powierzchni z badanych suwaków hydraulicznych oraz przedstawiono widok (rys. 6.4b)) z pomiaru powierzchni walcowej sondą PRBSPGOS-B podczas wyznaczenia wymiaru wysokości profilu H w μm . Analizując rysunek 6.3a) stwierdzono, że w układzie hydraulicznym bez mikrofiltracji po 960 godzinach pracy obserwuje się rysy i wżery, których nie zaobserwowano na suwaku rozdzielacza hydraulicznego pracującego w układzie z mikrofiltracją MF .

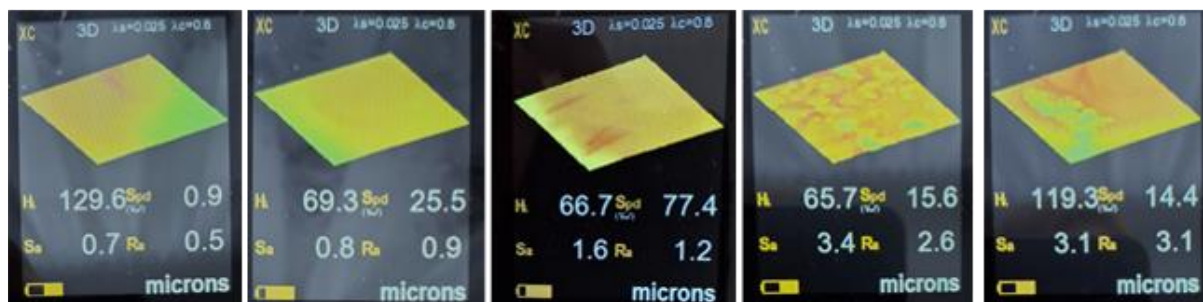


Rys. 6.3. Widok suwaków rozdzielaczy hydraulicznych po demontażu ze stanowiska badawczego: a), b) układ bez mikrofiltracji, c), d) układ z mikrofiltracją



Rys. 6.4. Widok a) suwaków rozdzielaczy hydraulicznych z naklejonymi taśmami replikacyjnymi RTXC Testex, b) sondy profilu cylindrycznego PRBSPGOS-B podczas pomiaru

Na każdym suwaku hydraulicznym naklejono po 8 taśm replikacyjnych do pomiaru sondą PRBRTR3D, a następnie wykonano po 10 pomiarów po obwodzie w miejscach po naklejonych taśmach – sondą PRBSPGOS-B. Na rysunku 6.5 przedstawiono widok przykładowych obrazów z miernika PosiTector SPG z wizualizacją 3D badanego fragmentu powierzchni z odcisniętej taśmy replikacyjnej z powierzchni suwaka.



Rys. 6.5. Widok ekranu i odczyt z urządzenia Positector z wizualizacją 3D i parametrami profilu powierzchni H_L , Spd , Sa i Ra w μm po podłączeniu sondy chropowatości RTR-3D (widoczny wzrost Ra)

Do dalszej oceny w zakresie zużycia powierzchni suwaków pochodzących z dwóch równolegle pracujących układów hydraulicznych wybrano parametr chropowatości Ra oraz wysokość profilu H wyrażonych w μm .

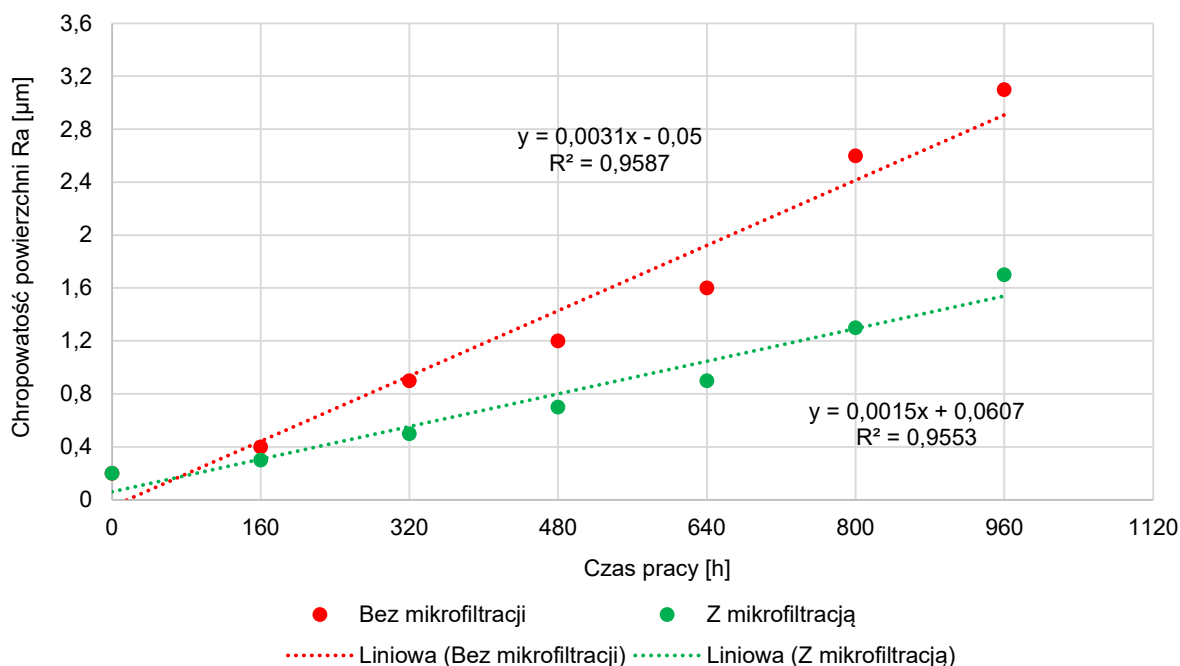
6.2.2. Wyniki badań zużycia rozdzielaczy hydraulicznych

W tabeli 6.2 oraz na rysunkach 6.6 i 6.7 przedstawiono widok zmiany parametry Ra i H w zależności czasu pracy układów hydraulicznych. Pierwszy pomiar chropowatości i profilu wykonany był dla nowych suwaków, następnie po każdych 160 godzinach pracy wykonywano kolejne pomiary.

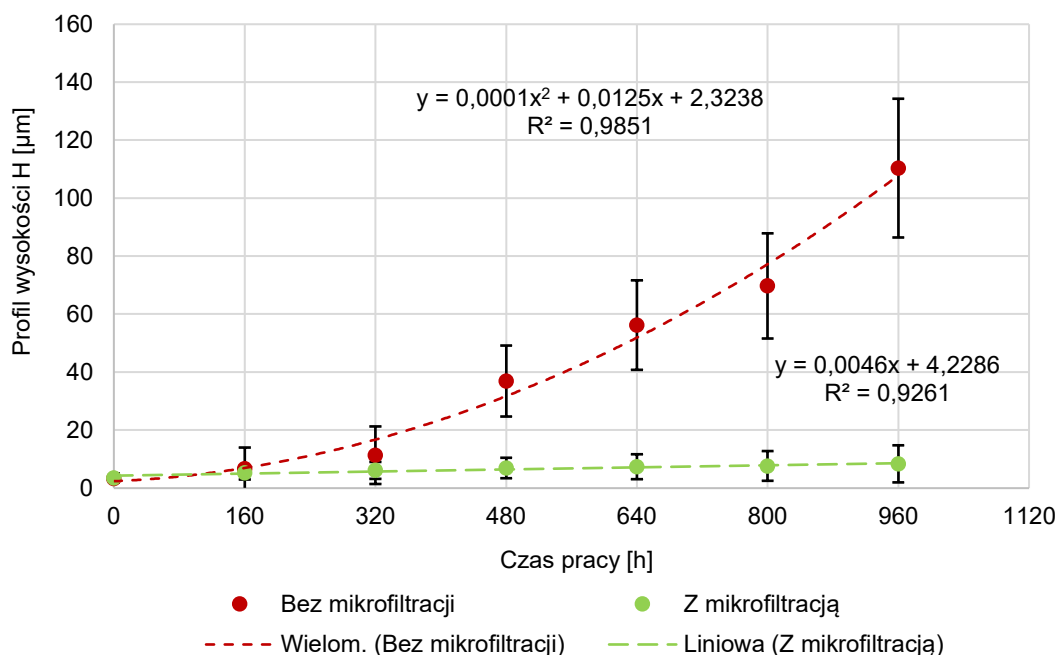
Tab. 6.2. Wyniki pomiaru parametru Ra i H z powierzchni suwaków hydraulicznych układu pracującego bez i z dodatkową mikrofiltracją

Czas pracy w godzinach	Bez mikrofiltracji			Z mikrofiltracją		
	R_a [μm]	H^* [μm]	$S_{H_B}^{**}$	R_a [μm]	H^* [μm]	$S_{H_Z}^{**}$
0	0,2	3,3	1,4	0,2	3,5	1,5
160	0,4	6,7	7,2	0,3	5,2	2,3
320	0,9	11,3	9,9	0,5	6,1	2,9
480	1,2	36,9	12,2	0,7	6,9	3,5
640	1,6	56,2	15,4	0,9	7,3	4,3
800	2,6	69,7	18,1	1,3	7,6	5,1
960	3,1	110,3	23,9	1,7	8,3	6,4
* – wartość średnia z 4 pomiarów profilu wysokości w [μm]						
** – odchylenie standardowe S_{H_B} i S_{H_Z} dla pomiaru profilu wysokości H w [μm]						

Po analizie wyników zużycia powierzchni suwaków rozdzielaczy hydraulicznych stwierdzono, że bazując na parametrze Ra , profil chropowatości zmieniał się liniowo zarówno w układzie bez jak i z mikrofiltracją. Natomiast bazując na pomiarze profilu wysokości, ze względu na wystąpienie głębokich wżerów i rys w układzie bez mikrofiltracji, parametr H zmienia się nieliniowo i możliwy jest do opisanie funkcją kwadratową.



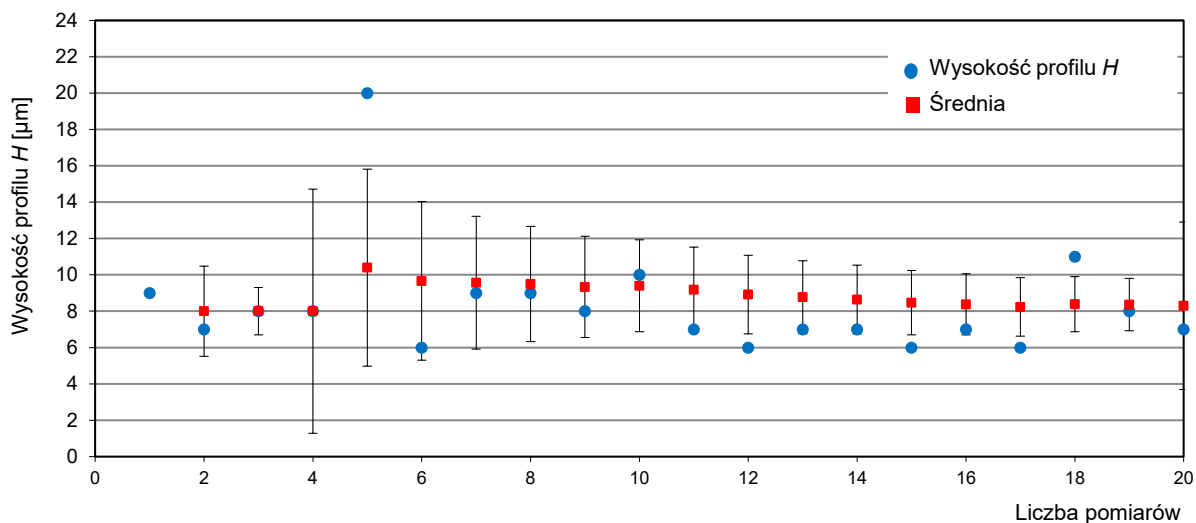
Rys. 6.6. Zależność parametru Ra chropowości powierzchni suwaka hydraulicznego pracującego w układzie bez jak i z mikrofiltracją od czasu pracy instalacji hydraulicznych stanowiska badawczego



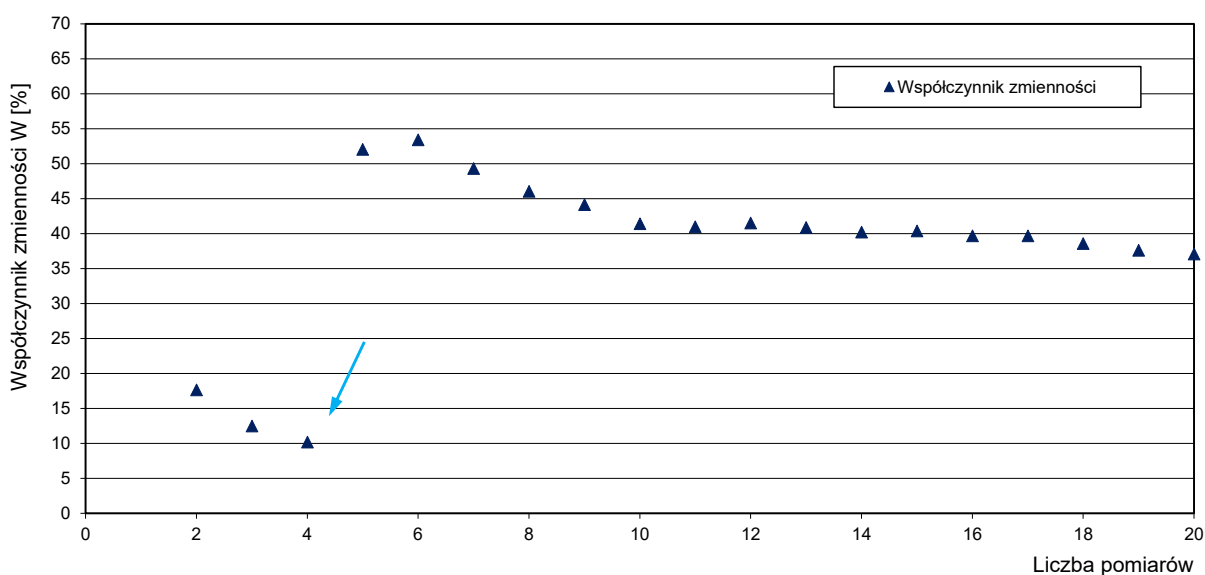
Rys. 6.7. Zależność parametru H profilu wysokości na powierzchni suwaka hydraulicznego pracującego w układzie bez jak i z mikrofiltracją od czasu pracy instalacji hydraulicznych stanowiska badawczego

W przypadku profilu wysokości sondą kablową PRBSPGOS-B typu V do powierzchni walcowych należy podkreślić, że ze względu na nierównomierny kształt dna wżerów trudno jest uzyskać zbliżone wartości kolejnych pomiarów wykonywanych w tych samym miejscu. Niewielki ruch sondy powodował, że kolejny pomiar tego samego wżeru istotnie różnił się od poprzedniego o czym świadczy wartość odchylenia standardowego (tabela 6.2) dla suwaków bez mikrofiltracji. W przypadku zarysowań, co stwierdzono na suwakach rozdzielacza pracującego z dodatkowym układem do mikrofiltracji, wartości odchylenia były trzykrotnie mniejsze od pomiarów na wżerach suwaków pracujących bez MF. Na tej podstawie

stwierdzono, że w zakresie pomiaru chropowatości powierzchni R_a z taśm replikacyjnych możliwe jest wykonanie jednego pomiaru (odcisku) z zarysowania fragmentu suwaka. Natomiast w przypadku pomiaru wysokości profilu H (głębokości) wżeru, zalecane jest wykonanie większej liczby pomiarów tj. 4 z obserwacją odchylenia standardowego. Na rysunku 6.8 oraz 6.9 przedstawiono zależność wartości profilu wysokości (wraz z wartością średnią) oraz współczynnik zmienności z kolejnych pomiarach na podstawie metodyki opisanej równaniami (4.1) – (4.5) w celu wyznaczenia minimalnej liczby pomiarów.



Rys. 6.8 Przebieg wartości wysokości profilu H oraz średnia jego wartość z 20 pomiarów wraz z dolną i górną granicą przedziału ufności

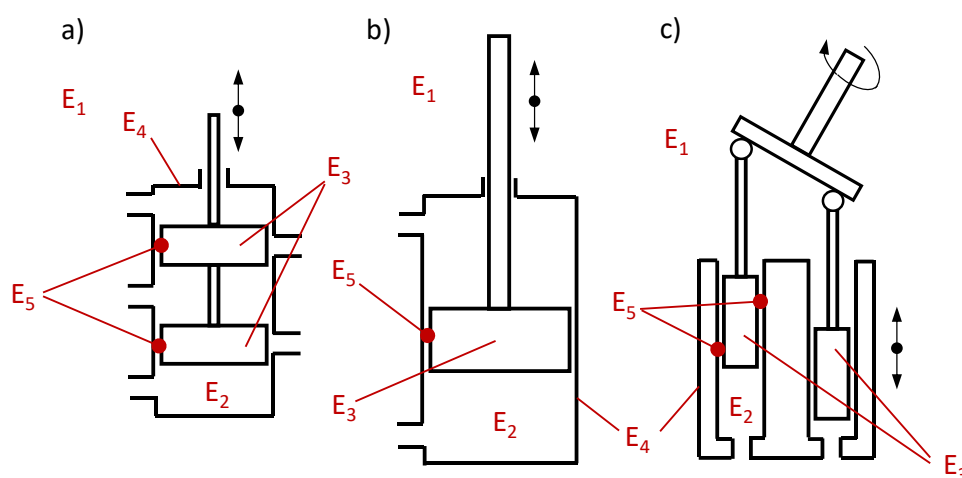


Rys. 6.9 Przebieg współczynnika zmienności W dla 20 pomiarów wysokości profilu H wykonanego sondą kablową PRBSPGOS-B typu V do powierzchni walcowych

Na podstawie zmian wartości współczynnika zmienności W w kolejnych pomiarach tego samego wżeru (wykonując badanie w różnych jego miejscach), przy czwartym pomiarze wysokości profilu uzyskano najniższą wartość W wynoszącą 10,2%, co świadczy o małym zróżnicowaniu. Wartości profilu wysokości w tej próbie nie różnią się istotnie między sobą (są blisko wartości średniej).

6.3. Modelowanie badanych parametrów układu hydraulicznego

Układ hydrauliczny należy rozpatrywać, jako system tribologiczny, co na przykładzie trzech podstawowych zespołów tj. rozdzielacza, siłownika i pompy przedstawiono na rysunku 6.10. System ten tworzą zgodnie z pracami [60, 101] trące o siebie elementy ruchome E_3 (stalowe lub inne) względem stałych E_4 . Między tymi elementami w wyniku mechanicznego i fizycznego oddziaływania występuje faza pośrednicząca tzw. ciało trzecie E_5 będące mieszaniną oleju E_2 z produktami zużycia ściernego w wyniku tarcia płynnego lub granicznego [15, 38]. Mieszanina oleju z produktami zużycia jest efektem wzajemnego przemieszczania się ruchomych elementów E_3 np. suwak rozdzielacza hydraulicznego o nieruchome elementy obudowy E_4 . Dla systemu tribologicznego układu hydraulicznego otoczenie stanowi olej hydrauliczny E_2 , w którym dochodzi do oddziaływania elementów stałych względem ruchomych zespołów hydraulicznych oraz powietrze na zewnątrz E_1 , przez które następuje niekorzystne oddziaływanie czynników atmosferycznych na układ, a w konsekwencji na olej hydrauliczny powodując jego zanieczyszczenie.



Rys. 6.10. Schemat skojarzenia ciernego takich zespołów hydraulicznych jak: a) rozdzielacza hydraulicznego, b) siłownika hydraulicznego, c) pompy wielotłoczkowej. E_1 -otoczenie (powietrze atmosferyczne), E_2 -olej hydrauliczny, E_3 -elementy ruchome, E_4 -elementy stałe, E_5 -mieszanina produktów zużycia z olejem hydraulicznym

Bazując na koncepcji H. Czichosa [101] zaproponowano system tribologiczny układu hydraulicznego jako zbiór S_H elementów (zespołów) układu hydraulicznego z otoczeniem, jako osobny zbiór E , właściwości W i relacji R zachodzących między elementami, a otoczeniem, co zostało opisane równaniem (6.1).

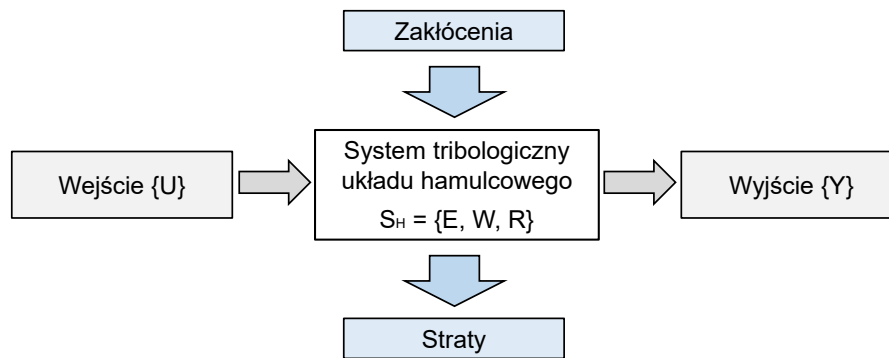
$$S_H = E, W, R$$

$$E = E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 \quad (6.1)$$

gdzie: E – zbiór elementów układu znajdujących się w otoczeniu zewnętrznym (powietrze) i wewnętrznym w kontakcie z olejem hydraulicznym,

E_1 – otoczenie zewnętrzne (powietrze atmosferyczne), E_2 – olej hydrauliczny (otoczenie wewnętrzne), E_3 – elementy ruchome układu, E_4 – elementy stałe układu, E_5 – mieszanina produktów zużycia z olejem hydraulicznym.

W ujęciu graficznym system tribologiczny S_H układu hydraulicznego przedstawiono na rysunku 6.11, który należy traktować, jako czarną skrzynkę z uwzględnieniem zakłóceń i strat.



Rys. 6.11. System tribologiczny układu hydraulicznego opracowany na podstawie koncepcji H. Czichosa [101]

Podczas pracy układu hydraulicznego maszyny budowlanej lub drogowej dochodzi do zmienności struktury w czasie, która prowadzi do strat w rozumieniu zużycia elementów współpracujących ze sobą (E_3 i E_4). Do strat należy również zaliczyć zmianę stanu oleju hydraulicznego E_2 przez jego zanieczyszczenia w wyniku mieszania się z produktami zużycia E_5 oraz w wyniku przedostawania się zanieczyszczeń z otoczenia E_1 , które zgodnie z rysunkiem 6.11 stanowią zakłócenia dla układu hydraulicznego. Wpływ poszczególnych źródeł zanieczyszczeń na zespoły układu hydraulicznego przedstawiono na rysunku 2.3 w podrozdziale 2.2 Zanieczyszczenie oleju z uwzględnieniem obiegu oleju hydraulicznego do odbiorników (siłownik lub silnik hydrauliczny) i powrót do zbiornika hydraulicznego.

W budowie maszyn jak czy eksploatacji maszyn jak i w pojazdach mechanicznych czy elektrycznych zgodnie z [26] bardzo często wykorzystuje się jednowymiarowe modele liniowe o jednym wejściu i jednym wyjściu na podstawie obserwacji systemu tribologicznego koła lub hamulca zgodnie z zależnością (6.2):

$$\hat{y}_n = a_0 + a_i \cdot x_i \quad (6.2)$$

lub wykorzystuje się modele jednowymiarowe nieliniowe (wykładnicze, potęgowe czy wielomianowe), co przedstawiają zależności (6.3 i 6.4):

$$\hat{y}_n = \beta \cdot a^{x_i} \quad (6.3)$$

$$\hat{y}_i = a \cdot x_i^y, \quad (6.4)$$

gdzie: a, β, y – parametry modelu regresyjnego

Wyboru regresyjnego modelu liniowego lub nieliniowego dokonuje się na podstawie wartości współczynnika determinacji R^2 . W drugim etapie wybrane regresyjne modele podlegają weryfikacji statystycznej pod względem istotności współczynników modelu. Zależności (6.5) – (6.8) prezentują regresyjne modele zmiany chropowatości powierzchni suwaka hydraulicznego w układzie bez R_{a_0} oraz z mikrofiltracją R_{a_MF} oraz głębokości wżerów na suwaku wyrażonego wysokością profilu H_{Bez} w układzie bez mikrofiltracji i z mikrofiltracją oleju H_{MF} .

$$R_{a_0} = 3,1 \cdot 10^{-3} t_{pr} - 5 \cdot 10^{-2}, \quad R^2 = 0,958 \quad (6.5)$$

$$R_{a_MF} = 1,5 \cdot 10^{-3} t_{pr} + 6,07 \cdot 10^{-2}, \quad R^2 = 0,955 \quad (6.6)$$

$$H_{Bez} = 10 \cdot 10^{-5} t_{pr}^2 + 1,25 \cdot 10^{-2} t_{pr} + 2,32, \quad R^2 = 0,985 \quad (6.7)$$

$$H_{MF} = 4,6 \cdot 10^{-3} t_{pr} + 4,22, \quad R^2 = 0,926 \quad (6.8)$$

Do modelowania zmienności chropowatości powierzchni oraz wysokości profilu (głębokości wżeru) zastosowano model regresji wielorakiej. Jest to metoda, w której wartość zmiennej losowej Y zależy od k -tych cech niezależnych ($X_1, X_2, \dots, X_k$). Na podstawie danej próby wyników badań [88] dokonano wyznaczenia niezmiennych parametrów $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k$ stosując metodę najmniejszych kwadratów. Do wyznaczenia chropowatości powierzchni R_a oraz wysokości profilu H zaproponowano następujące zależności w funkcji czasu pracy układu hydraulicznego i typu układu uwzględniającego mikrofiltrację lub jej brak:

$$R_{aM} = \alpha_1 U_H + \alpha_2 t_{pr} + \alpha_0 \quad (6.9)$$

$$H_M = \beta_1 U_H + \beta_2 t_{pr} + \beta_0 \quad (6.10)$$

gdzie: U_H – rodzaj układu hydraulicznego (0 – układ bez mikrofiltracji, 1 – układ hydrauliczny z dodatkową bocznikową mikrofiltracją,
 t_{pr} – czas pracy układu hydraulicznego wyrażonego w godzinach.

Modele opisane zależnościami (6.9) i (6.10) uzyskały następujące współczynniki determinacji $R^2=0,88$ dla R_{aM} i $0,66$ dla H_M , zgodnie z zależnością (6.11):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.11)$$

gdzie: $\hat{y}_i$ – wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej (na podstawie modelu),
 $\bar{y}$ – wartość średnia cechy y (zmiennej objaśnianej),
 y_i – zmienna opisująca (rzeczywista wartość).

Weryfikację parametrów modeli regresyjnych przeprowadzono zgodnie z pracą [126]. W tabeli 6.3 przedstawiono wartości współczynników funkcji regresji wraz ze współczynnikiem determinacji R^2 dla modelu chropowatości powierzchni suwaka hydraulicznego w funkcji czasu eksploatacji t_{pr} wyrażonego w godzinach w układzie bez jak i z mikrofiltracją oraz dla modelu głębokości wżerów (rys) na powierzchni suwaka również w funkcji czasu i typu układu hydraulicznego.

Tab. 6.3. Współczynniki funkcji regresji wraz z dopasowaniem R^2 dla modelu chropowatości powierzchni suwaka hydraulicznego i głębokości wżerów

Model chropowatości powierzchni R_{aM}		Model wysokości profilu H_M	
Lp.	Wartość	Lp.	Wartość
α_1	-0,628	β_1	-35,64
α_2	$2,31 \cdot 10^{-3}$	β_2	$5,71 \cdot 10^{-2}$
α_0	0,319	β_0	14,61
R^2	0,881	R^2	0,661

Sprawdzono istotność układu współczynników regresji oraz istotność poszczególnych współczynników regresji. Weryfikując modele empiryczne opisane zależnościami (6.9) i (6.10), wykonano testy statystyczne. Na przykładzie wartości chropowatości powierzchni R_a , hipotezę statystyczną dotyczącą istotności układu współczynników regresji sformułowano następująco:

$$H_o : \sum_{k=0}^n \alpha_k^2 = 0; (k=0, 1, 2) \quad (6.12)$$

$$H_1: \sum_{k=0}^n \alpha_k^2 \neq 0; (k=0, 1, 2) \quad (6.13)$$

Odrzucenie H_0 oznacza, że są statystyczne podstawy do przyjęcia, że zachodzi związek liniowy między zmienną zależną, a co najmniej jedną zmienną objaśniającą. W teście istotności modelu regresji wykorzystano rozkład F Snedecora.

Do określenia istotności poszczególnych współczynników regresji postawiono hipotezy zapisane zależnościami:

$$H_0: \alpha_k = 0 \quad (6.14)$$

$$H_1: \alpha_k \neq 0 \quad (6.15)$$

Do testowania hipotez dotyczących istotności poszczególnych współczynników regresji wykorzystano rozkład t-Studenta. Jeżeli istotność F jest mniejsza od założonego poziomu istotności α ($\alpha=0,05$), to istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej i przyjęcia, że między zmienną objaśnianą a wszystkimi zmiennymi objaśniającymi uwzględnionymi w modelach zachodzi zależność liniowa.

W tabeli 6.4 podano wartości współczynników funkcji regresji wielorakiej wraz z ich istotnością F dla modeli chropowatości powierzchni R_{aM} i wysokości profilu H_M po przeprowadzeniu testów statystycznych.

Tab. 6.4. Zestawienie wyników testu statystycznego dla modeli R_{aM} i H_M

Model R_{aM}			Model H_M		
Współ.	Wartość	Wartość F*	Współ.	Wartość	Wartość F*
α_1	-0,628	$4,738 \cdot 10^{-3}$	β_1	-35,64	$7,953 \cdot 10^{-3}$
α_2	$2,31 \cdot 10^{-3}$	$4,611 \cdot 10^{-6}$	β_2	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$6,824 \cdot 10^{-3}$
α_0	0,319	0,109	β_0	14,61	0,225
F**	$8,31 \cdot 10^{-6}$		F**	$2,59 \cdot 10^{-3}$	
R ²	0,881		R ²	0,661	
* istotność dla poszczególnego współczynnika regresji					
** dla całego układu					

Analizując dane zawarte w tabeli 6.4 stwierdzono, że dla wyrazów wolnych α_0 i β_0 modeli regresyjnych otrzymano empiryczny poziom istotności (p-value) powyżej 0,05. Świadczy to, że wyrazy wolne są nieistotne statystycznie i można je usunąć z modeli regresyjnych. Ostateczną postać modelu chropowatości powierzchni R_{aM} i wysokości profilu H_M po weryfikacji parametrów modelu regresji wielorakiej przedstawiają zależności:

$$R_{aM} = -6,28 \cdot 10^{-1} U_H + 2,31 \cdot 10^{-3} t_{pr} \quad (6.16)$$

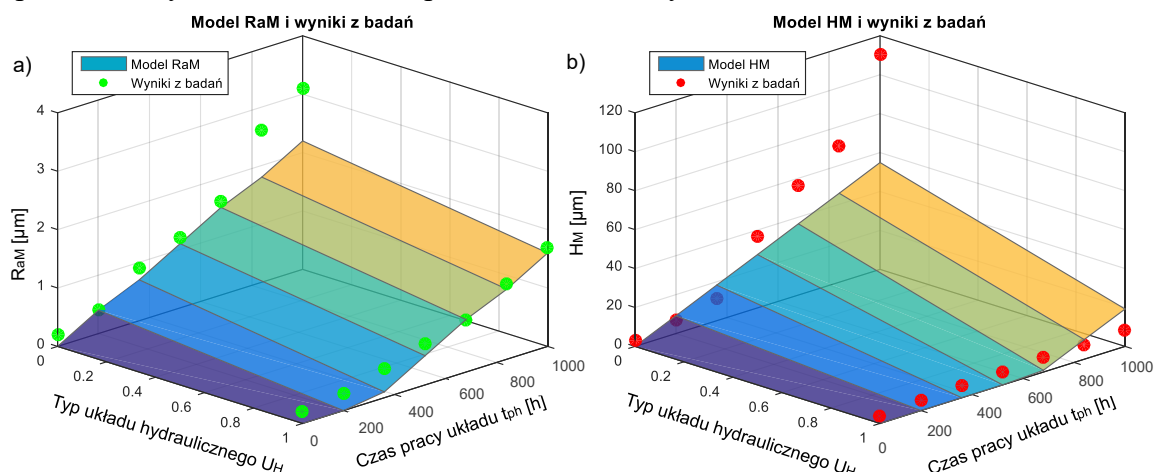
$$H_M = -35,64 U_H + 5,71 \cdot 10^{-2} t_{pr} \quad (6.17)$$

Zważywszy, że w przypadku regresji liniowej wartości wyników z modelu R_{aM} i H_M po weryfikacji mogą być mniejsze od 0, szczególnie dla małych wartości t_{pr} (od 0 do 320 godzin pracy), wprowadzono warunek aby funkcje (6.16) i (6.17) były równe zero dla wartości z modeli poniżej 0, co zapisano w następujący sposób.

$$R_{aM} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } -6,28 \cdot 10^{-1} U_H + 2,31 \cdot 10^{-3} t_{pr} < 0, \\ -6,28 \cdot 10^{-1} U_H + 2,31 \cdot 10^{-3} t_{pr}, & \text{gdy } -6,28 \cdot 10^{-1} U_H + 2,31 \cdot 10^{-3} t_{pr} \geq 0. \end{cases} \quad (6.18)$$

$$H_M = \begin{cases} 0, & \text{gdy } -35,64 U_H + 5,71 \cdot 10^{-2} t_{pr} < 0, \\ -35,64 U_H + 5,71 \cdot 10^{-2} t_{pr}, & \text{gdy } -35,64 U_H + 5,71 \cdot 10^{-2} t_{pr} \geq 0. \end{cases} \quad (6.19)$$

W programie Matlab R2025a z 2025 opracowano wykresy modeli R_{aM} i H_M wraz z punktami wyników z badań, co przedstawiono na rysunku 6.12.



Rys. 6.12. Zależność modelu: a) chropowatości powierzchni R_{aM} , b) wysokości profilu H_M od czasu pracy układu hydraulicznego t_{ph} i typu układu bez (0) lub z mikrofiltracją (1) suwaka hydraulicznego z uwzględnieniem wyników z badań parametru chropowatości R_a i H

Dla modeli regresyjnych opisanych zależnościami (6.9) i (6.10) przed weryfikacją współczynników oraz modeli R_{aM} i H_M zgodnie z zależnościami (6.16) i (6.17) po weryfikacji współczynników modeli, wyznaczono błąd względny procentowy (6.20) wartości otrzymanych z modeli względem wyników z badań chropowatości powierzchni R_a i profilu wysokości H_M .

$$\delta_{\%} = \frac{|R_{a_r} - R_{aM}|}{R_{a_r}} \cdot 100\% \quad (6.20)$$

gdzie: R_{a_r} – wartość rzeczywista zmierzona chropowatości powierzchni R_a ,
 R_{aM} – wartość teoretyczna z modelu.

W tabeli 6.5 przedstawiono rozkład błędu względnego procentowego dla modelu R_{aM} i H_M przed jak i po weryfikacji współczynników.

Tab. 6.5. Rozkład błędu względnego procentowego dla modeli R_{aM} i H_M przed i po weryfikacji współczynników

Rodzaj układu hydraulicznego U_H	Czas pracy układu hydraulicznego t_{pr}	Model R_{aM}		Model H_M	
		Błąd względny procentowy $\delta_{\%}$		Błąd względny procentowy $\delta_{\%}$	
		Przed weryfikacją	Po weryfikacją	Przed weryfikacją	Po weryfikacją
0 bez mikrofiltracji	0	3,9	6,5	10,3	3,0
	160	9,3	1,0	15,5	2,2
	320	5,1	5,2	19,6	6,3
	480	7,4	2,9	4,7	8,6
	640	6,4	3,9	4,5	17,8
	800	13,9	24,3	8,5	21,7
	960	18,1	28,5	37,0	50,2
1 z mikrofiltracją MF	0	11,8	11,8	3,2	3,2
	160	14,1	17,6	4,7	4,7
	320	4,1	22,9	5,5	5,5
	480	5,9	12,9	0,4	6,3
	640	15,9	2,9	7,5	5,8
	800	14,1	4,7	15,5	2,3
	960	12,3	6,5	23,2	9,9

Analizując dane zawarte w tabeli 6.5 stwierdzono, że dla modelu chropowatości powierzchni R_{aM} błąd względny procentowy zawiera się w przedziale 3,9-18,1% przed weryfikacją współczynników modelu i 1,0-28,5% po weryfikacji w zależności od czasu pracy układu hydraulicznego. W przypadku modelu wysokości profilu H_M błąd $\delta\%$ wyniósł 0,4-37% przed weryfikacją i 2,2-50,2% po weryfikacji współczynników modelu. Należy jednak podkreślić, że maksymalne wartości błędu względnego procentowego uzyskano tylko dla najdłuższego czasu pracy układu hydraulicznego pracującego bez mikrofiltracji tj. w czasie po 960 godzinach pracy. W pozostałych przypadkach, również dla układu z mikrofiltracją MF błąd nie przekracza 23,2%.

6.4. Podsumowanie badań zużycia układu hydraulicznego

Przeprowadzone badania zużycia wybranego zespołu hydraulicznego tj. rozdzielaczy hydraulicznych pracujących na dwóch typach instalacji hydraulicznych, pierwszej klasycznej bez mikrofiltracji oraz drugiej z mikrofiltracją, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Ze względu na tarcie płynne między współpracującymi elementami w parze suwak-obudowa, proces zużyciowy przebiega wolno, przez co ocenę zasadności zastosowania mikrofiltracji względem układu bez należy przeprowadzić oceną stanu powierzchni, a nie pomiarami wielkości geometrycznych.
- 2) Dostępnymi przyrządami pomiarowymi tj. profilomierzami do pomiaru chropowatości powierzchni możliwa jest ocena i pomiar stanu powierzchni takimi parametrami jak średnią chropowatość $2D R_a$, średnią chropowatość $3D S_a$, wysokość profilu H_L czy gęstość szczytową powierzchni S_{pd} .
- 3) Dla pomiarów stanu powierzchni cylindrycznych jak np. suwak rozdzielacza hydraulicznego wskazane jest również zastosowanie sond pomiarowych typu V do pomiaru wysokości profilu (głębokości wżerów).
- 4) Układ hydrauliczny z mikrofiltracją wykazał około dwukrotnie niższe wartości parametru chropowatości R_a suwaka hydraulicznego względem pomiarów na suwakach pochodzących z układu bez mikrofiltracji.
- 5) Klasyczny układ hydrauliczny bez mikrofiltracji wykazał po około 500 godzinach pracy wżery i zarysowania w wybranych powierzchniach suwaka hydraulicznego, czego nie stwierdzono na suwakach pracujących w układzie z MF .
- 6) W układzie bez mikrofiltracji wysokość profilu zmienia się nieliniowo (kwadratowo) w funkcji czasu pracy układu hydraulicznego. W układzie z mikrofiltracją profil wysokości H zmienia się liniowo w funkcji t_{pr} .
- 7) Regresyjnymi modelami liniowymi możliwe jest modelowanie zmiany chropowatości powierzchni R_a dla układu bez jak i z mikrofiltracją. Głębokość wżerów (profil wysokości) można modelować zarówno funkcją kwadratową ze współczynnikiem determinacji R^2 wynoszącym 0,985 lub funkcją liniową z $R^2=0,661$.
- 8) Modele regresyjne zmiany chropowatości powierzchni jak i wysokości profilu można uprościć przez eliminację wyrazów wolnych, co dowiodły testy statystyczne weryfikacji współczynników modeli (istotność współczynników modelu regresyjnego).
- 9) Błąd względny procentowy dopasowania modelu po weryfikacji współczynników względem wyników z badań nie przekroczył 28% dla modelu chropowatości powierzchni R_{aM} i 50% dla modelu wysokości profilu H_M . Należy podkreślić, że podane wartości błędu dotyczy tylko ostatniego punktu pomiarowego tj. po 960 godzinach pracy układu hydraulicznego. W pozostałych przypadkach pomiarów błąd względny procentowy wynosi maksymalnie 24% dla R_a w układzie bez MF i 21% dla H_M również w układzie bez MF . W układach z mikrofiltracją błąd $\delta\%$ nie przekracza 10%.

7. KONCEPCJA DODATKOWEGO UKŁADU DO MIKROFILTRACJI

7.1. Wprowadzenie do koncepcji dodatkowej mikrofiltracji

Zastosowanie mikrofiltracji oleju hydraulicznego w postaci dodatkowego zewnętrznego (bocznikowego) układu typu *by-pass* w maszynach budowlanych czy drogowych wynika z postawionej funkcji celu tj. maksymalnego wydłużenie czasu użytkowania oleju hydraulicznego O_h , co przedstawia zależność (7.1). Istotnym ograniczeniem dla postawionej funkcji celu jest prowadzenie mikrofiltracji *MF* bez wymiany oleju w przewidzianym przez *DTR* (dokumentację techniczno-ruchową) maszyny wymiany oleju – do osiągnięcia dolnej lub górnej granicy dopuszczanej lepkości kinematycznej ν oleju. Po badaniach lepkościowych, w których uzyska się jedną z granic np. dla oleju *HV 46* jest to 41,4 cSt (dolna granica) i 50,6 cSt (górna granica), należy bezwzględnie wymienić olej na nowy.

$$\begin{aligned} FC &= \max t_{uż} (O_h) \\ 41,4 \leq \nu(t) &\leq 50,6 \quad \forall t \in [0, t_{uż}] \\ \nu(t) &\text{ dla HV 46} \end{aligned} \quad (7.1)$$

gdzie: $t_{uż}$ – czas użytkowania oleju hydraulicznego O_h ,
 p_m – czas pracy maszyny w godzinach.

Wydłużony czas $t_{uż}$ oleju hydraulicznego również pośrednio przełoży się na dłuższy czas pracy maszyny p_m i poprawę współczynnika gotowości technicznej K_g . W klasycznym podejściu do utrzymania maszyn budowlanych czy drogowych należy w procesie eksploatacji przewidzieć czas na postój związany z wymianą oleju hydraulicznego.

Analiza dostępnych rozwiązań stosowanych w procesach separacji cieczy wskazuje, że technologie membranowe są szeroko wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu, takich jak przemysł chemiczny, spożywczy, farmaceutyczny, energetyczny, rolniczy czy gospodarka wodno-ściekowa [40, 50, 83]. W sektorach tych systemy mikrofiltracji, ultrafiltracji i nanofiltracji stanowią standardowe wyposażenie instalacji technologicznych, umożliwiając skuteczne usuwanie zanieczyszczeń oraz wydłużenie czasu eksploatacji mediów roboczych.

Na tle wymienionych branż stosunkowo niewielkie zastosowanie zaawansowanych technik separacji obserwuje się w hydraulice siłowej maszyn budowlanych, drogowych oraz innych maszyn roboczych. W praktyce eksploatacyjnej dominują klasyczne filtry hydrauliczne montowane w układach ciśnieniowych, powrotnych i ssawnych, które wraz z olejem są wymieniane zgodnie z przyjętym harmonogramem zapisanym w *DTR* maszyny lub pojazdu. Rozwiązania wykorzystujące mikrofiltrację oleju hydraulicznego z zastosowaniem membran filtracyjnych są realizowane przez przenośne stanowiska do oczyszczania oleju po skończonej pracy maszyny lub pojazdu. Na rysunku 7.1 przedstawiono widok zastosowania przenośnej maszyny Kleenoil *MS2+MM5* używanej przez autora w pracy zawodowej na maszynach budowlanych, pojazdach szynowych specjalnych czy maszynach produkcyjnych podczas okresowego czyszczenia oleju. Z punktu widzenia przemysłowego technika mikrofiltracji posiada szereg zalet. Charakteryzują się prostą obsługą, niewielkim zużyciem energii oraz ograniczoną ilością generowanych odpadów w porównaniu z metodami chemicznymi lub biologicznymi. Mikrofiltracja, dzięki możliwości zatrzymywania cząstek stałych o niewielkich rozmiarach oraz rozdzielenie wody od oleju jest obecnie w warunkach przemysłowych jedynym narzędzie do utrzymywania odpowiedniej klasy czystości oleju hydraulicznego. Podczas eksploatacji maszyn, pojazdów czy innych obiektów z układami roboczymi zasilanych hydrauliką siłową oraz sterowaniem za pośrednictwem zaworów proporcjonalnych czy serwozaworami w pętach regulacji czystość oleju w rozumieniu klasy czystości bezpośrednio przekłada się na dokładność pracy i trwałość tych obiektów.



Rys. 7.1. Widok zastosowania stanowiska Kleenoil MS2+MM5 do mikrofiltracji oleju hydraulicznego w: a) ładowarce kołowej Liebherr 566, b), c) wtryskarce Billion H3500/550, d), e) podbijarce podbijarki torów i rozjazdów typu 08-275 ZW [fot. S. Kołodziejski]

Świadomość użytkowników maszyn i pojazdów z układami hydraulicznymi sprawia, że podstawowe układy filtrów oraz ich okresowa wymiana wraz z olejem może być niewystarczająca dla zapewnienia wysokiej sprawności urządzeń hydraulicznych. Wynika to z warunki pracy maszyn budowlanych czy drogowych, którym towarzyszy ciągle zapylenie podczas pracy na otwartej przestrzeni i działanie innych czynników atmosferycznych jak woda z opadów. Zanieczyszczony olej jest przyczyną przyspieszonego zużycia elementów i zespołów hydraulicznych.

Dostawcy przenośnych stanowisk do mikrofiltracji olejów przemysłowych (głównie hydraulicznych) również oferują montaż jednozasobnikowych układów bocznikowej mikrofiltracji oleju silnikowego oraz paliwa. W USA jest to bardzo powszechne zjawisko, gdzie firmy transportowe w samochodach ciężarowych oraz samochodach dostawczych montują zasobniki z jednym wkładem do dodatkowej mikrofiltracji oleju silnikowego oraz paliwa, co przedstawiono na rysunku 7.2. W zależności od typu pojazdu oraz ograniczeń wynikających z możliwości montażu dodatkowego bocznikowego filtra i podłączenia się do głównej instalacji olejowej i paliwowej, każda zabudowa wykonywana jest indywidualnie. W Europie również występują bardzo nieliczne przypadki [56] możliwości podłączenia dodatkowego filtra olejowego dla silników wysokoprężnych maszyn pracujących w trudnych warunkach atmosferycznych, którym towarzyszy kurz, zapylenie oraz działanie deszczu. Przeglądając oferty firm w zakresie dystrybucji wkładów do mikrofiltracji oleju, znaleziono jeden przykład ze Słowenii [121], gdzie jedna z firm oferuje montaż zasobnika filtracyjnego w układzie hydrauliki siłowej.



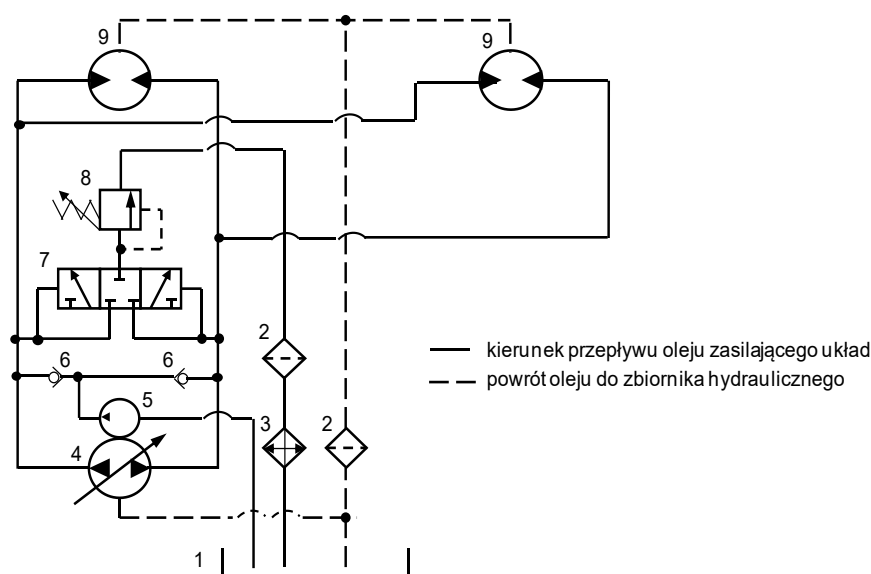
Rys. 7.2. Widok indywidualnie montowanych instalacji Kleenoil do bocznikowej mikrofiltracji a), b) oleju silnikowego w samochodzie ciężarowym, c) paliwa (Kleenfuel) w samochodzie pick-up, d) instalacji paliwa (Kleenfuel) i smarowania (Kleenoil) w Toyota Land Cruiser z silnikiem Diesla 4,2 l [96]

Analizując stan wiedzy z zakresu indywidualnie montowanych układów do mikrofiltracji oleju silnikowego i paliwa w pojazdach samochodowych, co ma miejsce w Stanach Zjednoczonych oraz w nielicznych przypadkach w Europie stwierdzono, że maszyny budowlane jak i drogowe są bardzo dobrymi obiektami do montażu takich układów w zakresie oleju hydraulicznego. Wynika to z faktu ich warunków pracy oraz zmienności obciążeń w czasie pracy. Dla tych pojazdów zarówno dodatkowe układy do mikrofiltracji paliwa czy oleju silnikowego będą również słuszne w przypadku oleju hydraulicznego. Należy podkreślić, że producenci maszyn budowlanych i drogowych montują w tych obiektach technicznych podstawowe układy filtrów (ssania, ciśnienia, powrotny czy odpowietrzający) oraz nakazują okresową wymianę oleju wraz z filtrami zgodnie z harmonogramem podanym w dokumentacji techniczno-ruchowej po przepracowaniu określonej liczby godzin. Zastosowanie układów bocznikowych *by-pass* pozwala na dokładniejsze usunięcie wody i zanieczyszczeń o średnicy powyżej $2\ \mu\text{m}$ z olejów hydraulicznych, wydłużając żywotność pomp, zaworów i siłowników hydraulicznych. Takie działanie jest próbą zastąpienia przenośnych stanowisk do mikrofiltracji zasilanych z instalacji elektrycznej jednofazowej $230\ \text{V AC}$ w miejscach, w których nie ma bezpośredniego dostępu do sieci elektrycznej

W kolejnych podrozdziałach zgodnie z postawioną funkcją celu określającą maksymalne wydłużeniem czasu użytkowania oleju hydraulicznego, zaproponowano dwie koncepcje związane z montażem dodatkowego indywidualnego bocznikowego układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego.

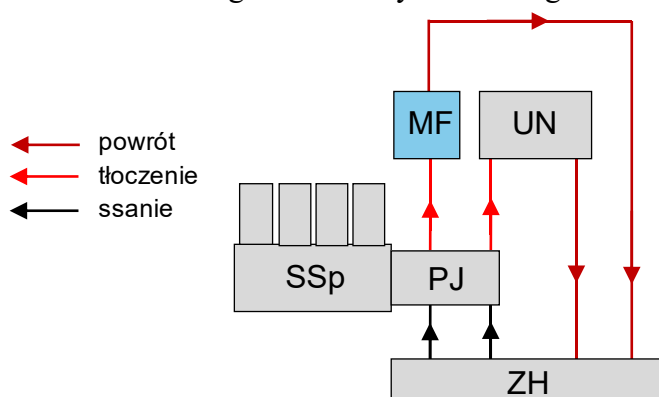
7.1.1. Koncepcja I

Napędy hydrauliczne w maszynach czy pojazdach dzielą się na hydrokinetyczne i hydrostatyczne [71]. W maszynach budowlanych oraz drogowych jak koparki jednoznaczniowe, walce drogowe, frezarki drogowe, rozkładarki mas asfaltowo-bitumicznych (tzw. rozściełacze) oraz niektóre ładowarki posiadają hydrostatyczne układy jazdy. Natomiast koparko-ładowarki czy spycharki wyposażone są w układy hydrokinetyczne. Zasilanie układów roboczych maszyn budowlanych czy drogowych również bazują na układach hydrostatycznych. Na rysunku 7.1 przedstawiono hydrostatyczny schemat hydrauliczny układu napędu kół jezdnych maszyny od pompy hydraulicznej (4) napędzanej przez silnik spalinowy aż do silników hydraulicznych (9) zamocowanych do kół za pośrednictwem przekładni zębatych.



Rys. 7.1. Schemat układu hydrostatycznego jazdy lekkiego pojazdu szynowego [78]: 1-zbiornik oleju, 2-filtr olejowy, 3-chłodnica oleju, 4-pompa wysokiego ciśnienia o zmiennej wydajności, 5-pompa uzupełniająca, 6-zawór zwrotny, 7-rozdzielacz hydrauliczny, 8-zawór bezpieczeństwa, 9-silnik hydrauliczny

Układy hydrostatyczne przeważają nad układami hydrokinetycznymi w maszynach budowlanych czy drogowych [70, 71]. W ramach pierwszej koncepcji zasilanie dodatkowego układu *by-pass* pochodzi od pompy hydraulicznej jazdy *PJ* zasilanej z silnika spalinowego *SSp* maszyny budowlanej czy drogowej. Na rysunku 7.2 przedstawiono schemat założenia pierwszej koncepcji zasilania dodatkowego obwodu hydraulicznego do mikrofiltracji oleju.

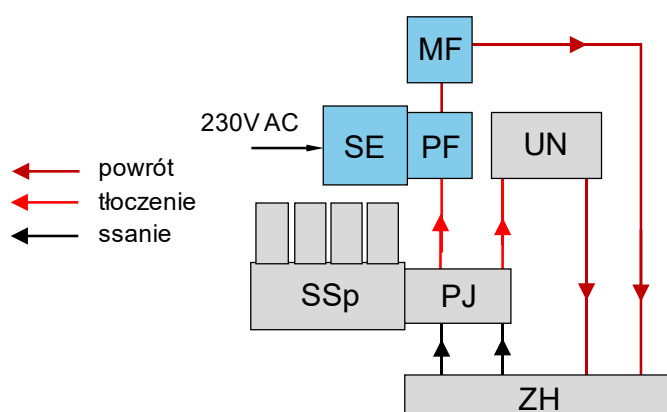


Rys. 7.2. Schemat układu bocznej mikrofiltracji oleju hydraulicznego I koncepcji: *SSp*-silnik spalinowy, *PJ*-pompa jazdy, *ZH*-zbiornik hydrauliczny, *UN*-układ napędowy (silniki hydrostatyczne), *MF*-zasobnik do mikrofiltracji

Pompa jazdy oprócz pobierania oleju ze zbiornika do układu zasilania układu napędowego równolegle zasysa olej do zasobnika *MF* z wkładem do mikrofiltracji, który po przejściu przez filtr wraca do zbiornika hydraulicznego *ZH*. W tej koncepcji olej hydrauliczny jest oczyszczany w czasie pracy maszyny w ciągu dnia, np. przez 8 lub 16 godzin, kiedy uruchomiony jest silnik spalinowy. Taka instalacja hydrauliczna jest prosta, ze względu na użycie tylko przewodów hydraulicznych z elementami podłączenia do pompy i zasobnika filtracyjnego. Po skończonej pracy i wyłączeniu maszyny układ do mikrofiltracji nie pracuje.

7.1.2. Koncepcja II

Druga koncepcja dodatkowego układu bocznikowej mikrofiltracji oleju hydraulicznego również zasilana jest z pompy hydraulicznej jazdy *PJ* zasilanej z silnika spalinowego *SSp* maszyny jak w przypadku pierwszej koncepcji. W tej koncepcji zastosowano dodatkową pompę hydrauliczną *PF* zasilaną z silnika elektrycznego *SE* do zasysania oleju ze zbiornika hydraulicznego *ZH*. Na rysunku 7.3 przedstawiono schemat drugiej koncepcji mikrofiltracji oleju hydraulicznego z możliwością zastosowania również napędu z silnika elektrycznego.



Rys. 7.3. Schemat układu bocznikowej mikrofiltracji oleju hydraulicznego I koncepcji: *SSp*-silnik spalinowy, *PJ*-pompa jazdy, *ZH*-zbiornik hydrauliczny, *UN*-układ napędowy (silniki hydrostatyczne), *MF*-zasobnik do mikrofiltracji, *PF*-dodatkowa pompa do mikrofiltracji, *SE*-silnik elektryczny

W tej koncepcji zastosowanie drugiej pompy hydraulicznej z napędem elektrycznym miało na celu prowadzenie mikrofiltracji oleju hydraulicznego jeszcze po skończonej pracy maszyny budowlanej lub drogowej, kiedy układ do *MF* zasilany był wcześniej z pompy jazdy maszyny. Dodatkowe zasilanie elektryczne z sieci jednofazowej 230 V AC daje możliwość dofiltrowania oleju w sytuacji, kiedy maszyna pracowała przez krótki okres czasu pod dużym obciążeniem i w trudnych niesprzyjających warunkach otoczenia. Operator maszyny podejrzewając, że olej może być zanieczyszczony podejmuje decyzję, aby po pracy przez kilka godzin uruchomić układ do mikrofiltracji oleju z sieci elektrycznej znajdującej się w hali do przechowywania maszyn budowlanych. Drugą zaletą tej koncepcji z dodatkowym elektrycznym zasilaniem pompy, do mikrofiltracji jest filtracja nowego oleju hydraulicznego po wlewniu oleju do zbiornika hydraulicznego. Autor w niniejszej pracy udowodnił, że nawet nowy olej pochodzący z metalowej beczki czy zbiornika *IBC* tzw. mauzera jest olejem pozaklasowym. Przed zalaniem układu hydraulicznego dofiltruje się olej na przenośnym stanowisku do mikrofiltracji. Rozwiązanie zaproponowane w drugiej koncepcji pozwala na wlewnie oleju z beczki lub zbiornika *IBC* bezpośrednio do zbiornika hydraulicznego maszyny budowlanej lub drogowej i włączenie elektrycznej pompy do mikrofiltracji, aby dofiltrować olej o określonej klasy czystości oraz usunąć wodę jak zgromadziła się w nowym oleju w wyniku procesów magazynowych czy transportowych.

7.2. Warunki brzegowe do realizacji koncepcji dodatkowej mikrofiltracji oleju

Na podstawie przeprowadzonych badań olejowych w aspekcie klasy czystości oleju, właściwości olejów hydraulicznych rozumianych zmianami lepkości kinematycznej w czasie jego użytkowania oraz w aspekcie środowiskowym i uzyskaniu zadowalających wyników związanych z wydłużeniem czasu użytkowania – opracowano w następujących punktach wytyczne dla budowy innowacyjnego układu do mikrofiltracji:

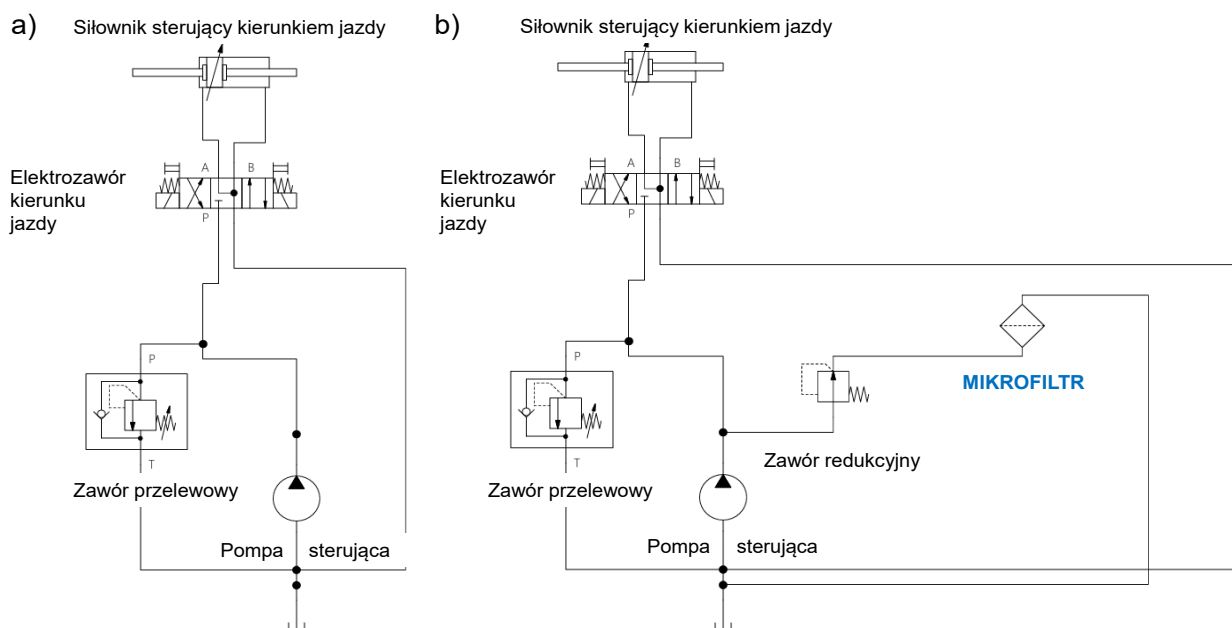
- a) Indywidualny układ do mikrofiltracji powinien być zabudowany blisko układu napędowego pojazdu, w którym znajduje się główna pompa hydrauliczna, np. pompa jazdy połączona z silnikiem spalinowym,
- b) Na pompie hydraulicznej (np. jazdy) należy wyprowadzić dodatkowy przewód do zasysania oleju hydraulicznego ze zbiornika hydraulicznego do zasobnika z filtrem polimerowym do mikrofiltracji,
- c) Zasilanie z pompy głównej tj. z pompy jazdy polegać będzie na wykorzystaniu możliwości (wydajności) pompy doładowującej pompę jazdy pracującej w otwartym układzie hydraulicznym,
- d) Z zasobnika filtracyjnego olej po przejściu przez filtr *MF* pompowany jest osobnym przewodem z powrotem do zbiornika hydraulicznego,
- e) Dodatkowy przewód ssania i tłoczenia oleju do zasobnika z wkładem filtrującym można wprowadzić do zbiornika hydraulicznego przez główny wlew oleju z jednoczesnym zabezpieczeniem zbiornika przed przedostawaniem się zanieczyszczeń i wody z zewnątrz do środka zbiornika,
- f) Zasobnik z wkładem filtrującym powinien znajdować się na zewnątrz pojazdu, aby możliwe było odpowietrzenie dodatkowego układu olejowego, kontrolę stanu zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego oraz jego bezproblemową wymianę,
- g) W dodatkowym układzie hydraulicznym do mikrofiltracji oleju należy wbudować punkt spuszczenia oleju w celu pobrania próbki olejowej do badania lepkości.
- h) W przypadku realizacji Koncepcji II do oczyszczania oleju możliwe jest wykorzystanie przenośnego stanowiska do mikrofiltracji, które można zabudować na błotniku tylnego koła. Wówczas przewody zasilające z pompy jazdy maszyny budowlanej należy doprowadzić do zasobników filtracyjnych. Wówczas możliwe jest dodatkowe wykorzystanie energii elektrycznej do pracy układu boczniowego przy niepracującym silniku spalinowym.
- i) Realizacja drugiej koncepcji wymaga zabezpieczenia maszyny filtracyjnej od wpływów atmosferycznych i działania kurzu w czasie pracy maszyny budowlanej lub drogowej. Jest to niezbędne w celu ochrony silnika elektrycznego i dodatkowej pompy zasilającej układ do mikrofiltracji.
- j) Badanie lepkości kinematycznej należy przeprowadzić po mikrofiltracji, aby wyeliminować wpływ zanieczyszczeń stałych i wody, które podnoszą lepkość oleju.
- k) Należy uzyskać klasy czystości: *ISO 18/16/13*, co odpowiadało 7 klasie *NAS* - dopuszczalna i akceptowana, wymagana jest klasa *ISO 17/15/12* (6 klasa *NAS*) w szczególności podczas wlewania nowego oleju do zbiornika hydraulicznego.

Wymienione wytyczne związane z zabudową pojazdu lub maszyny budowlanej w indywidualny układ do separacji olejowej, mają na celu zwiększenie skuteczności mikrofiltracji bez maszyny do *MF* (np. Kleenoil *MS2+MM5*), która uruchamiana jest obok pojazdu po zakończeniu pracy. Mikrofiltracja z zasobnika jednokomorowego realizowana jest w czasie jazdy lub pracy. Obecne na rynku, maszyny do mikrofiltracji mogą w sposób ciągły filtrować olej tylko na stacjonarnych maszynach przemysłowych jak wtryskarki znajdujące się na halach produkcyjnych. Maszyny te pracują w bardziej stabilnych warunkach otoczenia niż maszyny budowlane znajdujące się na zewnątrz, na które działają czynniki atmosferyczne.

Nieliczne przypadki np. z USA wskazują, że trend związany z indywidualnymi dodatkowymi układami do MF oleju silnikowego i paliwa jest coraz częściej oferowany przez dostawców wkładów filtracyjnych oraz stanowisk do mikrofiltracji.

7.3. Budowa układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego

W celu realizacji mikrofiltracji w maszynach budowlanych i drogowych z hydrostatycznym układem hydraulicznym zasilanie do układu *by-pass* pochodzić będzie z głównej wielotłoczkowej pompy jazdy zasilającej silniki hydrostatyczne przy kołach maszyn. Układ zasilania silników hydrostatycznych od pompy jest układem zamkniętym, jednak ze względu na przecieki hydrauliczne, które są nieuniknione w układach hydraulicznych, a ich wielkość wzrasta wraz z przyrostem zużycia na tłoczkach hydraulicznych względem korpusu – w pompie jazdy znajduje się pompa doładowująca pozwalająca utrzymać stałą wydajność pompy jazdy. Wspomniana dodatkowa pompa przedstawiona już została symbolem (5) na rysunku 7.1 podczas prezentacji pierwszej koncepcji dodatkowej mikrofiltracji w podrozdziale 7.1.1. Zważywszy, że wydajność pompy dodatkowej uzupełniającej pracę pompy jazdy (4) (rys. 7.1) jest znacznie większa niż występujące przecieki, co zostało już wielokrotnie stwierdzone przez autora w ramach pracy zawodowej. Stąd zdecydowano o wykorzystaniu potencjału wspomagającej pompy doładowującej do zasilania dodatkowego obwodu do mikrofiltracji. Na rysunku 7.4 przedstawiono dwa schematy hydrauliczne pompy jazdy bez oraz z układem zasilania zasobnika z filtrem MF. Schemat hydrauliczny opracowano w programie *D:FLUIDSIM-6-HYD* zakupionym ze środków na infrastrukturę w ramach realizowanego programu Doktorat Wdrożeniowy.



Rys. 7.4. Schemat instalacji hydraulicznej doładowującej pompy jazdy (pompy sterującej) maszyny budowlanej opracowanej w programie *D:FLUIDSIM-6-HYD*: a) bez mikrofiltracji, b) z mikrofiltracją

Wykonanie dodatkowego układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego zasilanego z dodatkowej pompy jazdy jest technicznie łatwe do wykonania. Wystarczy na wyjściu z pompy elektrozaworu kierunku jazdy i siłownika sterującego zamocować trójnik, aby nadwyżka oleju wynikająca z wydajności pompy doładowującej kierowana była przez zawór redukcyjny bezpośrednio do zasobnika filtracyjnego. W ciągłej filtracji stycznej olej kierowany jest przewodem powrotnym do zbiornika hydraulicznego i cykl jest powtarzany. Rozbudowę instalacji hydraulicznej można przeprowadzić w warunkach warsztatowych przy

wykorzystaniu podstawowych narzędzi i akcesoriów stosowanych w pracy przy hydraulice siłowej. Czas takiej modernizacji układu hydraulicznego o dodatkowy obwód boczny do MF to maksymalnie dwie godziny.

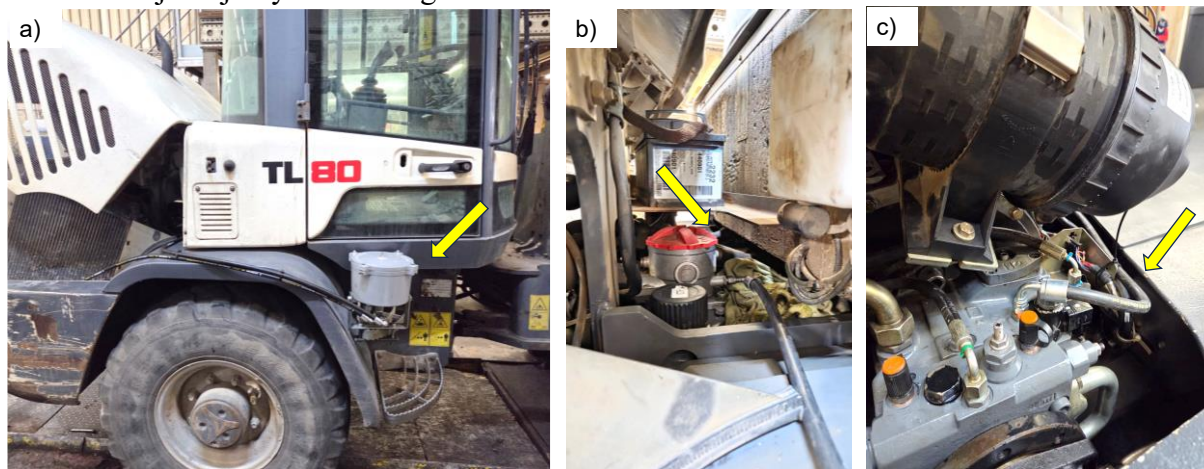
7.3.1. Układ MF 1 w ładowarce TEREX

Układ mikrofiltracji oleju hydraulicznego według pierwszej koncepcji został zbudowany na ładowarce kołowej TEREX TL80. Taka instalacja hydrauliczna jest prosta, gdyż zasilenie dla układu *by-pass* pochodzi od głównej pompy jazdy maszyny budowlanej bez dodatkowych układów zasilania zewnętrznego. Po skończonej pracy ładowarki i wyłączeniu maszyny (wyłączeniu silnika spalinowego) układ do mikrofiltracji nie pracuje. Ładowarka kołowa Terex TL80 jest przeznaczona do małych i średnich prac przeładunkowych, transportu materiałów sypkich oraz robót ziemnych na budowach, w gospodarstwach rolnych i zakładach komunalnych. Dzięki kompaktowym wymiarom, dużej zwrotności i możliwości współpracy z różnym osprzętem (np. łyżką, widłami paletowymi) sprawdza się szczególnie w miejscach o ograniczonej przestrzeni roboczej. W tabeli 7.1 przedstawiono podstawowe parametry techniczno-eksploatacyjne ładowarki wraz z charakterystyką układu hydraulicznego.

Tab. 7.1. Parametry techniczno-eksploatacyjne ładowarki kołowej Terex TL80 [127]

Lp.	Parametr	Wartość/Jednostka	Lp.	Parametr	Wartość/Jednostka
1	Masa eksploatacyjna	4,9–5,1 t	6	Wysokość wysypu	2,55 m
2	Moc silnika	44–45 kW	7	Długość transportowa	4,96 m
3	Pojemność łyżki	0,8–1,2 m ³	8	Szerokość ładowarki	1,85 m
4	Szerokość łyżki	1,85 m	9	Wysokość	2,64–2,67 m
5	Siła odpajania	48 kN	10	Promień skrętu	4,1 m
Układ hydrauliczny					
1	Pojemność układu hydraulicznego wraz ze zbiornikiem	55 l			
2	Wydajność pompy hydraulicznej	64 l/min			
3	Ciśnienie robocze	250 bar			
4	Oleju hydraulicznego klasy HLP (np. Shell Tellus S2 M 46) zgodnego z	DIN 51524-2			
5	Klasa lepkościowa	ISO VG 46			

Na rysunku 7.4 przedstawiono widok ładowarki kołowej Terex TL80 z układem do mikrofiltracji oleju hydraulicznego



Rys. 7.4. Widok ładowarki kołowej TEREX TL80 z zamocowanym dodatkowym układem do mikrofiltracji oleju hydraulicznego: a) widok na zasobnik z wkładem filtracyjnym pod kabiną operatora, b) widok na przewód ssący z wlewu zbiornika hydraulicznego do głównej pompy olejowej, c) widok na przewód ssący do pompy głównej zasilanej z silnika spalinowego ładowarki

W ładowarce kołowej ze względu na już istniejące ograniczenia dodatkowy jednokomorowy zasobnik do mikrofiltracji umieszczono z prawej strony maszyny pod kabiną operatora. Jednym przewodem ssącym ze zbiornika hydraulicznego (rys. 7.4b) zasysany jest olej hydrauliczny przez pompę główną jazdy (rys. 7.4c), a następnie olej kierowany jest do zasobnika filtracyjnego. Po przejściu przez wkład filtra olej wraca do zbiornika hydraulicznego ładowarki. W tabeli 7.2 przedstawiono wykaz elementów wraz z ceną zakupu, niezbędnych do wykonania dodatkowego układu do mikrofiltracji zgodnie z koncepcją I jaka została wykonana na maszynie Terex TL80. We wszystkich kosztorysach przedstawionych w niniejszej pracy podano ceny brutto.

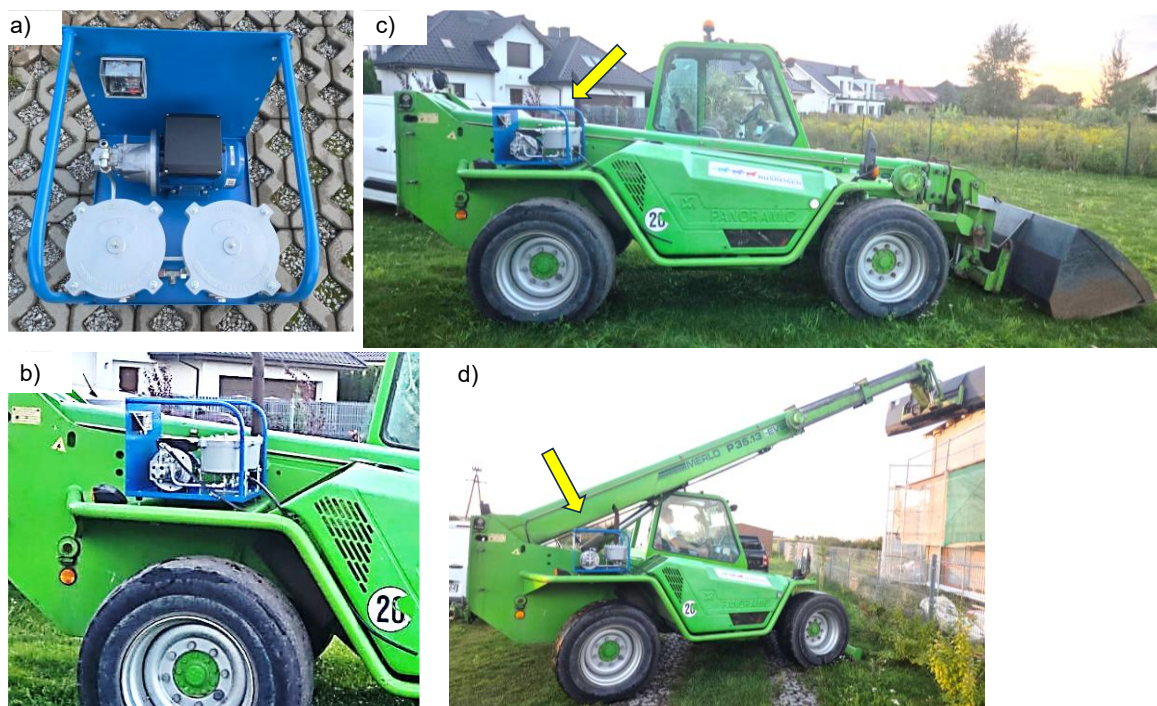
Tab. 7.2. Kosztorys wykonania układu do mikrofiltracji ładowarki Terex TL80 zgodnie z koncepcją I

Lp.	Nazwa elementu	Liczba / długość	Cena jednostkowa w [zł]	Cena w [zł]
1	Zasobnik filtracyjny	1 szt	1500	1500
2	Wkład do mikrofiltracji	1 szt	330	330
3	Przewód hydrauliczny elastyczny 1/2"	15 m	40	600
4	Tulejki zaciskowe przewodu 1/2"	4 szt	25	100
5	Końcówki hydrauliczne	4 szt	27	108
6	Przyłącze do zasobnika 3/4"-1/2"	2 szt	10	20
7	Przyłącze do zbiornika hydraulicznego 3/4"-1/2"	1 szt	10	10
8	Przyłącze do pompy hydr. 7/8" UNF-1/2"	1 szt	15	15
Koszt całkowity				2683 zł

Na podstawie wykazu elementów układu do MF (tabela 7.2) zgodnie z koncepcją I, koszt całkowity dodatkowej mikrofiltracji ładowarki Terex TL80 wyniósł 2683 zł.

7.3.2. Układ MF 2 w ładowarce MERLO

Druga koncepcja mikrofiltracji oleju hydraulicznego zrealizowana została na ładowarce teleskopowej Merlo EWVS 35/13, co przedstawia rysunek 7.5.



Rys. 7.5. Widok ładowarki teleskopowej Merlo EWVS 35/13, a) widok na zespół do mikrofiltracji, b) widok na zabudowany zespół do MF na tylnym prawym błotniku pojazdu, c) widok pojazdu, d) widok na pojazd w czasie pracy budowlanej [fot. S. Kołodziejki]

Tab. 7.3. Parametry techniczno-eksploatacyjne ładowarki teleskopowej Merlo EWVS 35/13 [74]

Lp.	Parametr	Wartość/Jednostka	Lp.	Parametr	Wartość/Jednostka
1	Masa eksploatacyjna	8,8 t	6	Udźwig przy max wysokości	2500 kg
2	Moc silnika	62 kW	7	Max wysokość podnoszenia	13,2 m
3	Pojemność łyżki	1,5–2,0 m ³	8	Max wysięg poziomy	8,63 m
4	Udźwig maksymalny	3500 kg	9	Wysokość	2,48 m
5	Udźwig przy max wysięgu	1000 kg	10	Promień skrętu	4,0 m
Układ hydrauliczny					
1	Pojemność układu hydraulicznego wraz ze zbiornikiem				120 l
2	Wydajność pompy hydraulicznej				120 l/min
3	Ciśnienie robocze				210 bar
4	Oleju hydrauliczno-przekładniowy klasy HVL P (np. Shell Tellus S2 VX 46)				DIN 51524-3
6	Klasa lepkościowa				ISO VG 46

Podstawowe parametry techniczno-eksploatacyjne ładowarki zawarto w tabeli 7.3. Ładowarka przeznaczona jest do prac przeładunkowych, transportu materiałów oraz obsługi palet i materiałów budowlanych na placach budowy czy w rolnictwie. Dzięki udźwigowi do 3,5 t oraz wysokości podnoszenia 13 m umożliwia wykonywanie szerokiego zakresu prac w trudno dostępnych miejscach. Zgodnie z drugą koncepcją prototypowy zespół do mikrofiltracji oleju hydraulicznego rozbudowano o możliwość pracy dodatkowej zewnętrznej pompy zasilanej z napięcia 230 V AC. W drugiej ładowarce teleskopowej (Merlo EWVS 35/13) wykonano modyfikację instalacji do mikrofiltracji przez dodanie silnika elektrycznego z małą pompą olejową, aby wydłużyć czas mikrofiltracji i po skończonej pracy ładowarki, operator miał możliwość uruchomienia pompy dla obwodu separacji olejowej wykorzystując zasilanie 230 V AC z miejsca postoju ładowarki.

W budowie zewnętrznego zespołu filtracyjnego wykorzystano gotowe zespoły jak obudowę czy podwójny zasobnik z dwoma wkładami filtracyjnymi zapewniający wydajność filtracji na poziomie 600 l/h i możliwość usunięcia 2,4 litra wody z instalacji hydraulicznej. W czasie pracy ładowarki układ zewnętrzny do separacji olejowej zasilany jest z pompy jazdy ładowarki, natomiast po skończonej pracy i po wyłączeniu silnika spalinowego jest możliwość załączenia dodatkowej pompy zębatej o wydajności 5l/min przez silnik elektryczny o mocy 0,75 kW z napięcia znajdującego się w hali lub garażu.

Tab. 7.4. Kosztorys wykonania układu do mikrofiltracji ładowarki Merlo EWVS 35/13 zgodnie z koncepcją II

Lp.	Nazwa elementu	Liczba / długość / rbh	Cena jednostkowa w [zł]	Cena w [zł]
1	Zasobnik filtracyjny	1 szt	1500	1500
2	Wkład do mikrofiltracji	1 szt	330	330
3	Przewód hydrauliczny elastyczny 1/2"	15 m	40	600
4	Tulejki zaciskowe przewodu 1/2"	6 szt	25	150
5	Końcówki hydrauliczne	6 szt	27	162
6	Przylącze do zasobnika 3/4"-1/2"	2 szt	10	20
7	Przylącze do zbiornika hydraulicznego 3/4"-1/2"	1 szt	10	10
8	Przylącze do pompy hydr. 7/8" UNF-1/2"	1 szt	15	15
9	Silnik elektryczny 0,75 kW 230 AC	1 szt	330	330
10	Pompa łopatkowa V10 1B3B1C 20	1 szt	1500	1500
11	Kołnierze AKA 04FS20024S	1 szt	200	200
12	Sprzęgło kłowe Rotex Apex 28	1 szt	230	230
13	Przewód hydrauliczny 1/2" zasobnik – pompa	1 m	40	40
14	Usługa wytaczania sprzęgła po wał silnika	1,5	200	300
Koszt całkowity				5387 zł

W tabeli 7.4 przedstawiono kosztorys wykonania instalacji hydraulicznej w ładowarce Merlo EWVS zgodnie z założeniami Koncepcji II dodatkowej bocznikowej mikrofiltracji. Pozycje od 1 do 8 są takie same jak w przypadku instalacji w Koncepcji I. W tym zakresie jedyną różnicą są dodatkowe końcówki i tuleje dla dodatkowego przewodu hydraulicznego między zasobnikiem filtracyjnym a pompą łopatkową (pozycja 13). Druga instalacja z obwodem zasilania elektrycznego dodatkowo posiada silnik elektryczny, pompę łopatkową, sprzęgło kłowe i elementy przyłączeniowe. Całkowity koszt wykonania drugiej instalacji do MF zgodnie z założeniami Koncepcji II to 5387 zł. Ze względu na najdroższy element w tym układzie tj. pompę łopatkową, druga instalacja jest dwukrotnie droższa od układu na ładowarce Terex TL80 wykonanego wg. Koncepcji I bocznikowej mikrofiltracji oleju hydraulicznego. W załączniku A przedstawiono projekt dokumentacji techniczno-ruchowej dla układu MF 1 i MF 2 bocznikowej mikrofiltracji oleju. Natomiast w załączniku B w sposób graficzny zaprezentowano algorytm przeglądowy dla układu hydraulicznego z dodatkowym układem filtrującym.

7.4. Badania oleju hydraulicznego w warunkach eksploatacyjnych

7.4.1. Cel badań eksploatacyjnych

Celem olejowych badań eksploatacyjnych było określenie klasy czystości olejów hydraulicznych i wilgotności względnej trzech maszyn budowlanych zgodnie z wymaganiami norm *ISO 4406* i *NAS 1638*. Zgodnie z normą *ISO* zanieczyszczenia stałe zostały sklasyfikowane według ich średnicy tj. powyżej 4 μm , 6 μm i 14 μm . Mimo, że norma *NAS 1638* nie jest obowiązująca od 2001 roku, badania również wykonano zgodnie z jej wymaganiami, ze względu na uśrednienie wszystkich zanieczyszczeń do jednej klasy (wartości), co w przypadku klasyfikacji *ISO* są podane 3 wartości klas czystości. W warunkach eksploatacyjnych (poligonowych) maszyn budowlanych czy drogowych klasyfikacja *NAS* jest cały czas stosowana równolegle z normą *ISO 4406*. W badaniach maszyn produkcyjnych z układami hydraulicznymi jak np. wtryskarki tworzyw sztucznych badania olejowe na klasę czystości prowadzi się tylko w oparciu o normę *ISO 4406*.

7.4.2. Metodyka badań eksploatacyjnych

Obiektem badań olejowych eksploatacyjnych były trzy kołowe maszyny budowlane (ładowarki). Pierwsze dwie posiadały rozbudowane instalacje hydrauliki siłowej o dodatkowe bocznikowe układy typu *by-pass* do mikrofiltracji oleju hydraulicznego. Trzecia maszyna posiadał klasyczny układ hydrauliczny z podstawowymi filtrami. Maszyny budowlane mimo różnicy w masach pracowały z osprzętem ładowarkowym o różnej pojemności. Jednak w badaniach olejowych uwagę zwrócono na stan oleju hydraulicznego po określonym czasie pracy niż na obciążenie osprzętu ładowarkowego. Pierwsza ładowarka tj. Terex TL80 posiadała rozbudowany układ do mikrofiltracji zgodnie z koncepcją I, druga ładowarka teleskopowa Merlo EWVS 35/15 wyposażona była w bocznikowy układ do mikrofiltracji zgodnie z koncepcją II. Trzecia ładowarka Liebherr 566 bez dodatkowego układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego. Porównując obiekty badań ze sobą to ładowarka Terex L80 to kompaktowa ładowarka kołowa przeznaczona głównie do załadunku i transportu materiałów na niewielkich placach budowy, w gospodarstwach rolnych i pracach komunalnych. Ładowarka teleskopowa Merlo EWVS 35/15 służy przede wszystkim do podnoszenia i przemieszczania ładunków na dużą wysokość oraz do obsługi materiałów w budownictwie, rolnictwie i przemyśle. Natomiast ładowarka kołowa Liebherr L 566 jest ciężką ładowarką kołową przeznaczoną do intensywnego załadunku i transportu dużych ilości

materiałów sypkich w kopalniach, kamieniołomach oraz na dużych budowach. Podstawowe parametry techniczno-eksploatacyjne ładowarki L 566 zawarto w tabeli 7.3.

Tab. 7.2. Parametry techniczno-eksploatacyjne ładowarki kołowej Liebherr L 566 [66]

Lp.	Parametr	Wartość/Jednostka	Lp.	Parametr	Wartość/Jednostka
1	Masa eksploatacyjna	23,9 t	6	Max wysokość podnoszenia	6,47 m
2	Moc silnika	200 kW	7	Max wysięg poziomy	1,49 m
3	Pojemność łyżki	4,2 m ³	8	Szerokość transportowa	3,0 m
4	Udźwig maksymalny	15900 kg	9	Wysokość	3,57 m
5	Udźwig przy max wysięgu	15900 kg	10	Promień skrętu	7,41 m
Układ hydrauliczny					
1	Pojemność układu hydraulicznego wraz ze zbiornikiem				280 l
2	Wydajność pompy hydraulicznej				290 l/min
3	Ciśnienie robocze				380 bar
4	Oleju hydrauliczno-przekładniowy klasy HVLP (np. Shell Tellus S2 VX 46)				DIN 51524-3
6	Klasa lepkościowa				ISO VG 46

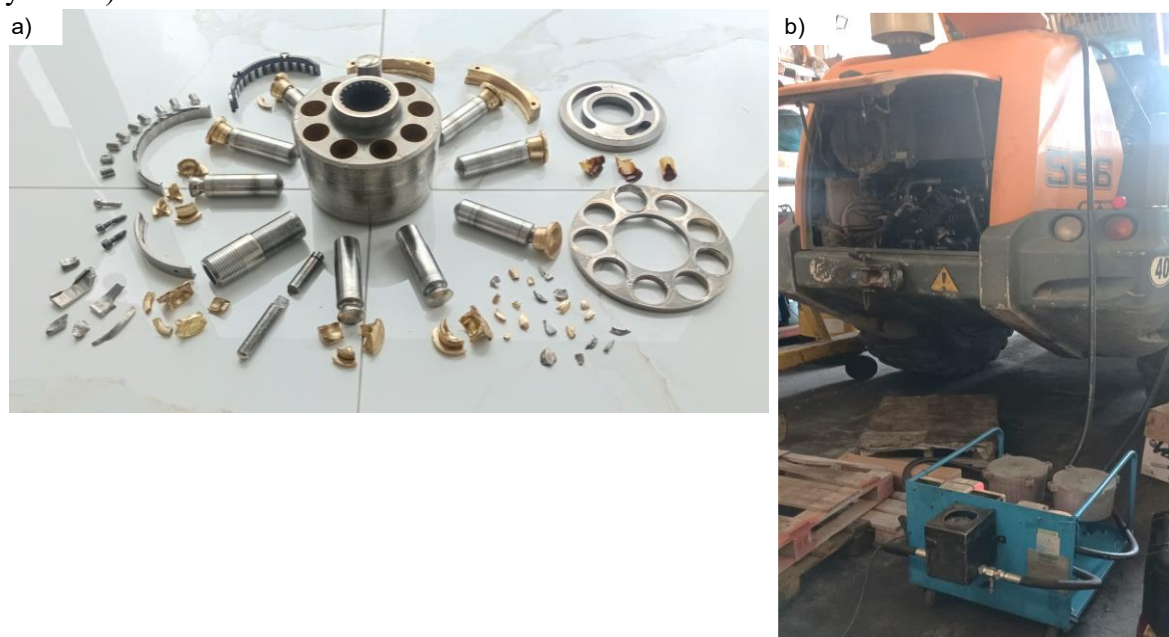
Na rysunku 7.6 przedstawiono widok trzeciego obiektu badań, widok ładowarka Terex TL80 przedstawiony był na rysunku 7.4 w podrozdziale 7.3.1, a ładowarki teleskopowej Merlo EWVS 35/15 na rysunku 7.5 w podrozdziale 7.3.2. Cechą wspólną wszystkich ładowarek mimo ich przeznaczenia był zastosowany olej hydrauliczny o klasie lepkościowej *ISO VG 46*.



Rys. 7.6. Widok ładowarko kołowej Liebherr L 566 [fot. S. Kołodziejski]

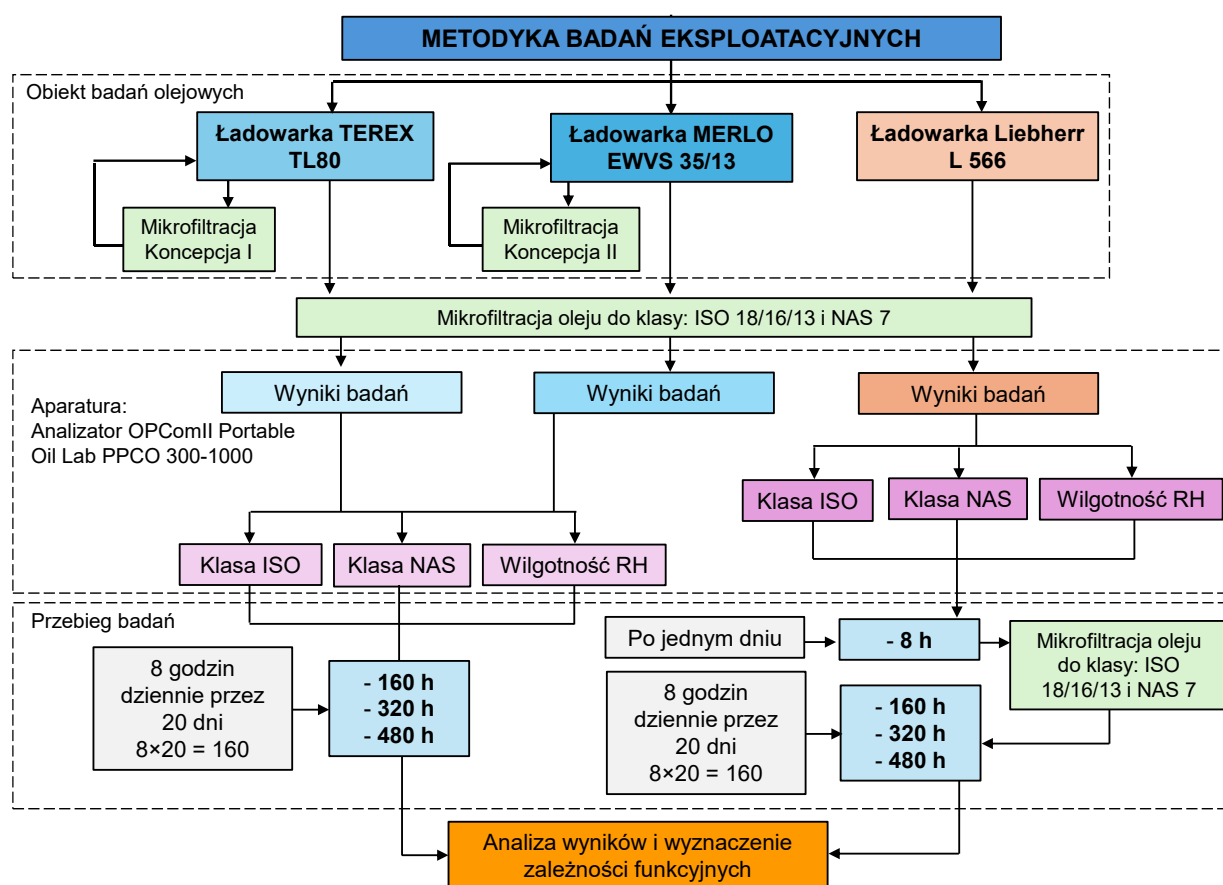
Ładowarka kołowa Liebherr L 566 była po wymianie wielotłoczkowej pompy hydraulicznej. Na rysunku 7.7 przedstawiono widok uszkodzonej i rozebranej pompy wielotłoczkowej. Ze względu na zatarcie się tłoczków w obudowie cylindra doszło do wyrwania przegubów na mosiężnych gniazdach kulowych, co również widać na rysunku 7.7a) wokół cylindra. Uszkodzenie pompy jazdy wystąpiło przy 13000 mth ładowarki. Bazując na doświadczeniu firm zajmujących się naprawami maszyn budowlanych i drogowych, trwałość pomp jazdy określana jest na około 10000 mth. Instalacja hydrauliczna tej ładowarki po zalaniu olejem hydraulicznym wymagała bezwzględnie przeprowadzenia

mikrofiltracji oleju hydraulicznego przenośnym urządzeniem filtrującym Kleenoi *MS2+MM5* (rys. 7.7b).



Rys. 7.6. Widok: a) uszkodzonej pompy wielotłoczkowej ładowarki Liebherr 566, b) mikrofiltracji oleju na przenośnym stanowisku Kleenoi *MS2+MM5* [fot. S. Kołodziejcki]

Badania eksploatacyjne klasy czystości oleju na ładowarkach kołowych przeprowadzone zostały zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 7.7.



Rys. 7.7. Schemat blokowy metodyki eksploatacyjnych badań olejowych ładowarek kołowych

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.7 badania przeprowadzono zgodnie z założeniami eksperymentu czynnego. Trzy ładowarki kołowe miały badany olej na klasę czystości *ISO* i *NAS* oraz wilgotność względną *RH*. Dwie pierwsze ładowarki tj. Terex TL80 i Merlo EWVS 35/15 posiadały dodatkowe układy do boczniowej mikrofiltracji w czasie ciągłym tj., kiedy uruchomiony był silnik spalinowy. Trzecia ładowarka Liebherr L 566 nie posiadała dodatkowych układów hydraulicznych do mikrofiltracji. Badania olejowe, co przedstawia rysunek 7.8 prowadzono po przepracowaniu przez ładowarki około 100-120 godzin pracy, co przekładało się na okres około miesiąca pracy. W sumie ładowarki w odstępach około miesiąca miały przebadany olej przez okres 4 miesięcy, co przełożyło się na 480 godzin pracy ładowarek.



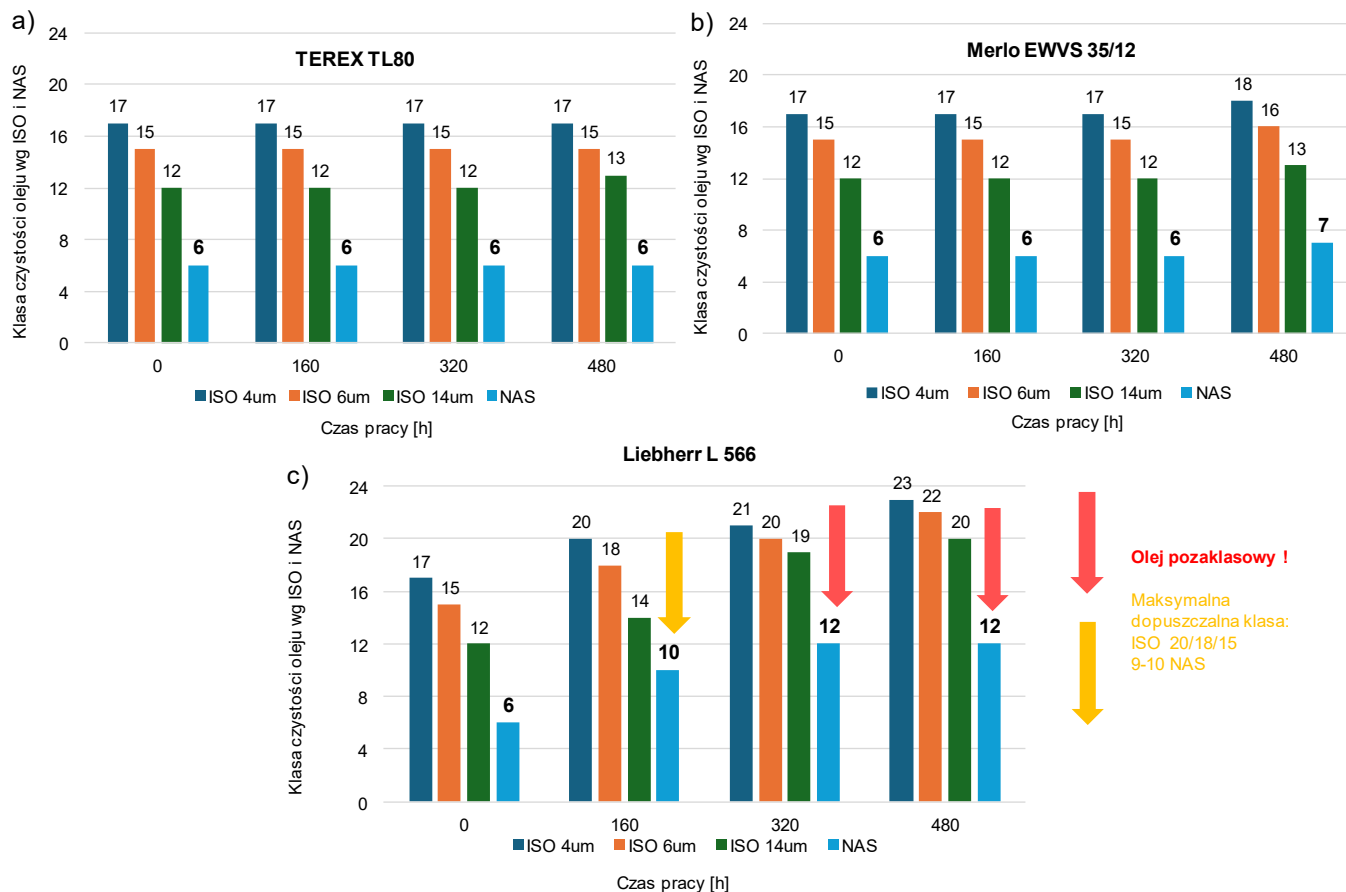
Rys. 7.8. Widok z badania okresowego oleju na klasę czystości i wilgotność względną na e) przenośnym laboratorium OPCOMII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytyos ładowarek kołowych: a) Terex TL80, b) Merlo EWVS 35/15, c), d) Liebherr L 566 [fot. S. Kołodziejski]

Ładowarki kołowe podczas badań eksploatacyjnych miały wlanej olej hydrauliczny o klasie lepkościowej *ISO VG 46*. Przed waniem oleju hydraulicznego do zbiorników hydraulicznych, oleje na terenie firmy Powers Partner w Czapurach gdzie realizowany jest program Doktorat Wdrożeniowy zostały poddane filtracji w celu uzyskania klasy czystości, maksymalnie *ISO 18/16/13*, co odpowiadało 7 klasie *NAS*, mimo, że w niektórych pozycjach [25] producenci zalecają klasę *ISO 17/15/12* (6 klasa *NAS*). Następnie ładowarki Terex, Merlo i Liebherr zostały skierowane do zaplanowanych prac drogowo-budowlanych i okresowo pobierane były próbki oleju do badań olejowych.

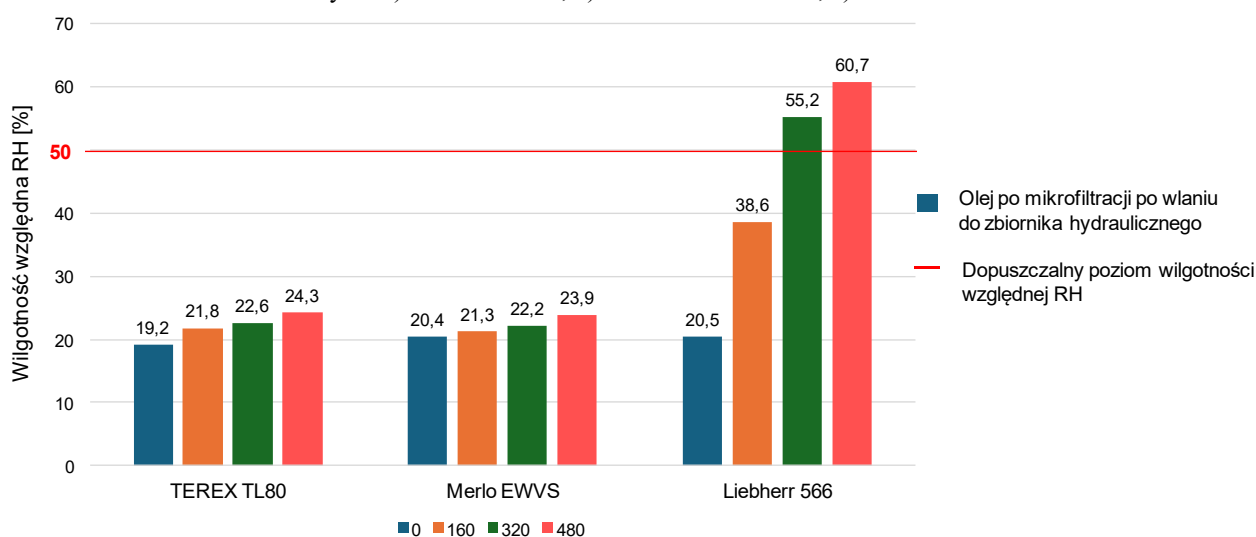
7.4.3. Wyniki badań eksploatacyjnych

Na rysunku 7.9 przedstawiono zależność zmiany klasy czystości oleju wg normy *ISO 4406* i wg *NAS 1638* co 100-120 godzin pracy ładowarek kołowych aż do osiągnięcia około 500 mth. Natomiast na rysunku 7.10 przedstawiono zależność zmiany wilgotności względnej *RH* w analizowanych ładowarkach kołowych, również w tych samych odstępach czasowych. Analizując dane przedstawione graficznie na wykresie 7.9 stwierdzono, że dwie pierwsze ładowarki tj. Terex TL80 i Merlo EWVS 35/12 z innowacyjnymi zasobnikami do boczniowej dodatkowej mikrofiltracji umożliwiają utrzymanie klasy czystości w całym okresie na poziomie założonym i otrzymanym po pierwszej mikrofiltracji przed waniem oleju do zbiorników hydraulicznych. Jedynie ładowarka Merlo w ostatnim okresie badania oleju na klasę czystości tj. po 480 godzinach pracy zwiększyła klasę czystości *ISO* z 17/15/12 o jeden stopień, na 18/16/13, co dla klasyfikacji *NAS* było wzrostem z 6 na 7 klasę czystości.

W przypadku ładowarki Liebherr bez dodatkowej mikrofiltracji klasa czystości wyraźnie wrastała i już po 320 godzinach pracy stan oleju oceniono na pozaklasowy według klasyfikacji *ISO* i *NAS*. Po 160 godzinach pracy czystość oleju wg *ISO* wzrosła z klasy 17/15/12 na 20/18/14, co zgodnie z normą *NAS 1638* było wzrostem z 6 na 10 klasę *NAS*. Dla prostych układów hydraulicznych jest to maksymalnie dopuszczalna klasa czystości jednak nie dla układów zaawansowanych jak w przypadku ładowarki Liebherr L 566.



Rys. 7.9. Zależność klasy czystości oleju hydraulicznego *HV 46* wg *ISO* i *NAS* od czasu pracy ładowarek kołowych: a) TEREX TL80, b) Merlo EWVS 35/12, c) Liebherr L 566



Rys. 7.10. Zależność wilgotności względnej *RH* oleju hydraulicznego *HV 46* od czasu pracy ładowarek kołowych: a) TEREX TL80, b) Merlo EWVS 35/12, c) Liebherr 566

Analizując dane wilgotności względnej *RH* oleju hydraulicznego przedstawione na rysunku 7.10 stwierdzono, że dodatkowa mikrofiltracja wykonana zgodnie z koncepcją I i II również istnienie nie wpływa na wzrost zawartości wody w oleju. Wilgotność oleju w przypadku ładowarki Terex TL 80 wzrosła z 19,2 na 24,3%, a w przypadku ładowarki Merlo EWVS wzrost był podobny z wartości 20,4 na 23,9%. W obu przypadkach wartość nie przekroczyła 25% względem wartości początkowej tj. około 20% dla oleju nowego przed pracą maszyn budowlanych. W przypadku ładowarki Liebherr L 566 podczas pomiaru po 320 godzinach pracy stwierdzono przekroczoną dopuszczalną wilgotność *RH* tj. 50%. Podczas tego pomiaru uzyskano wynik 55,2%, a po kolejnych 120 godzinach pracy już 60,7%. Ze względu na przekroczenie wartości 50% zgodnie z [7, 8] należy przeprowadzić mikrofiltrację oleju hydraulicznego na przenośnym stanowisku lub wymienić olej na nowy.

Ładowarka Liebherr L 566 nie była zabudowana zespołem do mikrofiltracji oleju, dlatego oprócz założonej metodyki badań zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.7 po pierwszym dniu pracy ładowarki na żwirowni wykonano badanie oleju na przenośnym laboratorium OPComII Portable Oil Lab PPCO 300-1000 firmy ArgoHytos i ponownie wykonano mikrofiltrację oleju na maszynie MS2+MM5. Wyniki badań oleju przedstawiono w tabeli 7.3 i na rysunkach 7.11 i 7.12.

Tab. 7.3. Wyniki badań olejowych ładowarki kołowej Liebherr L 566 w początkowym okresie od wiania oleju hydraulicznego do końca pierwszego dnia pracy

Pomiar	ISO 4um	ISO 6um	ISO 14um	NAS	RH*	Uwagi
1	23	20	14	12	27,1	Olej z beczki 200 l przed waniem do zbiornika hydraulicznego ładowarki
2	23	19	13	11	25,3	
3	23	19	13	11	25,2	
4	19	15	12	7	19,2	Pierwsza mikrofiltracja oleju przez 8 godzin po waniu do zbiornika hydraulicznego ładowarki
5	19	15	11	7	20,5	
6	19	15	11	7	20,4	
7	22	17	13	9	37,1	Ładowarka Liebherr L 566 po pierwszym dniu pracy na żwirowni (około 9 godzin)
8	22	17	13	9	38,2	
9	22	17	13	9	38,6	
10	17	15	12	6	19,8	Druga mikrofiltracja oleju hydraulicznego przez 10 godzin po pierwszym dniu pracy na żwirowni
11	17	15	12	6	20,0	
12	17	15	12	6	19,6	

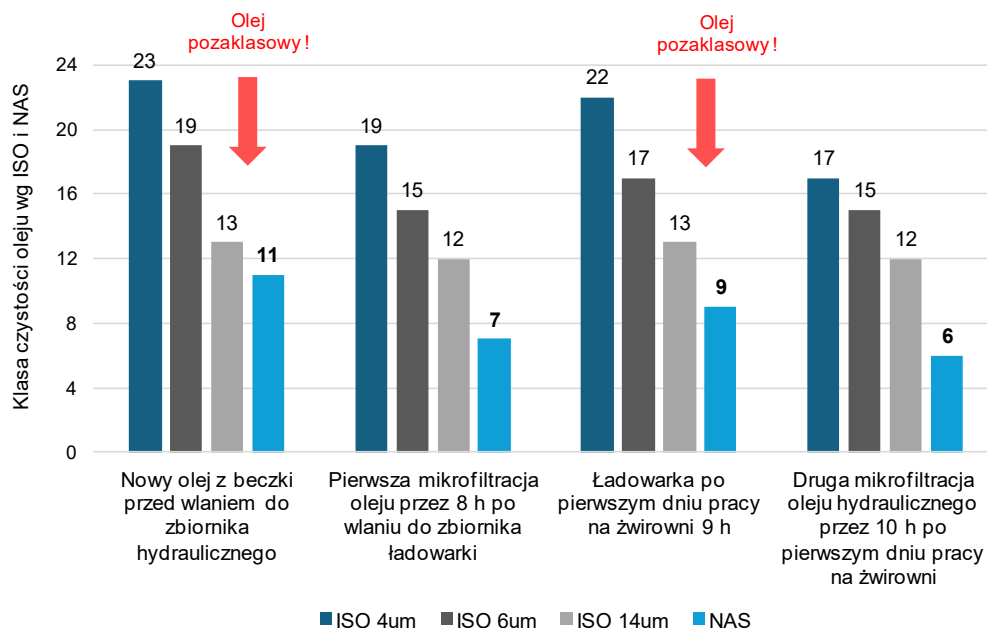
* do 50% - woda całkowicie rozpuszczona, bezpieczna i akceptowalna ilość wody w oleju,

* od 50 do 70% - woda całkowicie rozpuszczona, przyspieszone starzenie się oleju hydraulicznego,

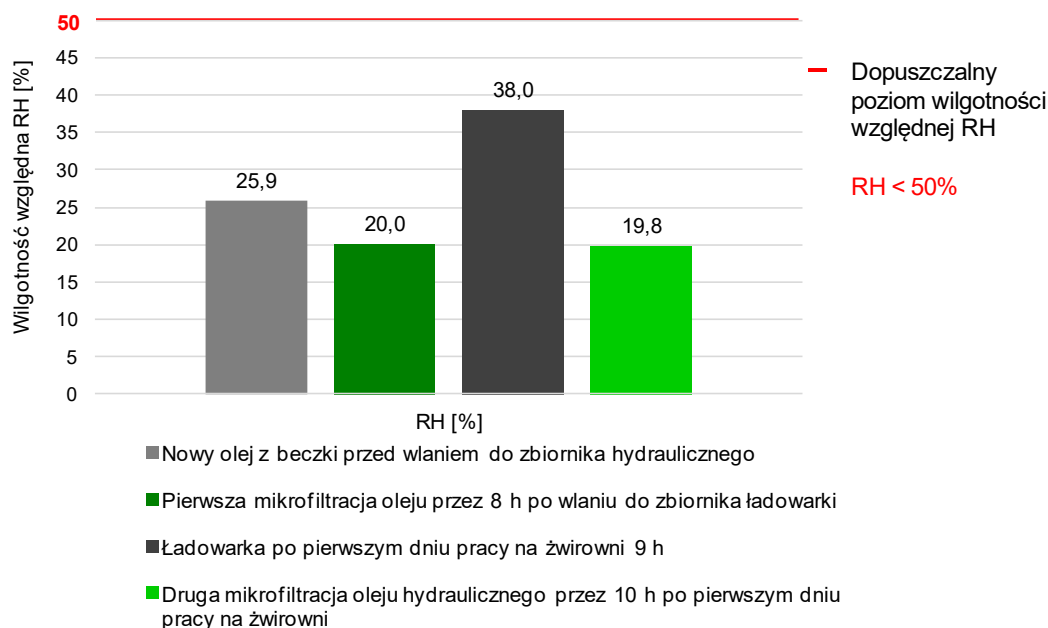
* powyżej 70% - możliwe wydzielanie się wody z oleju lub tworzenie się emulsji, korozja układu hydraulicznego, zużycie kawitacyjne, pogorszone smarowanie, uszkodzenia pomp. Zalecamy pilnie mikrofiltrację oleju przy użyciu filtrów usuwającą wodę, wodą jest w całym układzie (nie tylko w zbiorniku) należy wyczyścić cały układ hydrauliczny.

Analizując dane w zakresie klasy czystości oleju hydraulicznego przedstawione w tabeli 7.3 i na rysunku 7.11 stwierdzono, że po pierwszym dniu pracy ładowarki kołowej przez około 9 godzin na żwirowni – klasa czystości wzrosła o dwa stopnie w klasyfikacji *NAS* z 7 do 9 klasy. Ta klasa (tj. *ISO* 20/18/15 lub 22/17/13) jest ostatnią dopuszczalną klasą czystości oleju dla prostych układów hydraulicznych. W przypadku ładowarki kołowej Liebherr L 566 jest to niedopuszczalna klasa ze względu na zaawansowany układ sterowania hydraulicznego. Te badania również udowodniły, co było już napisane w rozdziale 4.3, że nowy hydrauliczny z metalowej beczki o pojemności 200 litrów jest olejem pozaklasowym. W tym celu na przenośnym stanowisku Kleenoil MS2+MM5 przeprowadzono mikrofiltrację nowego oleju wlanego do zbiornika hydraulicznego ładowarki. Po pierwszym dniu pracy ładowarki również

przeprowadzono mikrofiltrację oleju, aby uzyskać klasę czystości jak w przypadku badanych ładowarek Terex i Merlo z dodatkowymi bocznikowymi układami do mikrofiltracji oleju.



Rys. 7.11. Zależność klasy czystości wg ISO i NAS oleju hydraulicznego HV 46 od czterech okresów w pierwszym okresie pracy ładowarki Liebherr L 566



Rys. 7.12. Zależność wilgotności względnej RH oleju hydraulicznego HV 46 od czterech okresów w pierwszym okresie pracy ładowarki Liebherr L 566

W zakresie wilgotności względnej oleju hydraulicznego, co przedstawiono na rysunku 7.12, po pierwszym dniu pracy ładowarki kołowej Liebherr L 566 stwierdzono wzrost RH z 20% przed pracą do 38% po około 9 godzinach pracy. Druga mikrofiltracja przez 10 godzin pozwoliła na obniżenie RH oleju hydraulicznego do poziomu jak przez pracą tj. do około 20%. Należy zaznaczyć, że wahania wartości w zakresie klasy czystości czy wilgotności względnej już po pierwszym dniu pracy świadczy o dużym wpływie warunków pracy maszyn budowlanych czy drogowych na stan oleju hydraulicznego. Wahania temperatury otoczenia, praca na otwartej przestrzeni (wpływ wilgoci lub wody z opadów) na olej hydrauliczny czy

zmienne obciążenia w układzie roboczym bezpośrednio i szybko przekładają się na zmiany w oleju w rozumieniu wzrostu klasy czystości czy wilgotności względnej.

Ładowarka Liebherr L 566 celowo nie miała modernizowanej instalacji hydraulicznej dla montażu bocznikowego układu do mikrofiltracji, ze względu na posiadany system *LOA*. System Liebherr Oil Analysis (*LOA*) jest procedurą diagnostyczną, której celem jest monitorowanie stanu oleju oraz pośrednia ocena zużycia podzespołów ładowarki. Docelowo, ma to zapobiegać awariom i optymalizować terminy kolejnej obsługi. Producent zaleca regularne pobieranie próbek oleju podczas przeglądów okresowych oraz utrzymywanie trendów pomiarowych przez cały okres eksploatacji maszyny, a częstość badań dostosowuje się do harmonogramu serwisowego i warunków pracy. W laboratorium wykonywana jest analiza właściwości oleju, stopnia zanieczyszczenia oraz spektrometryczna analiza pierwiastków zużyciowych, takich jak żelazo *Fe*, miedź *Cu*, chrom *Cr*, aluminium *Al*, ołów *Pb*, cyna *Sn*, krzem *Si* i inne [66]. Analiza składu pierwiastkowego umożliwia ocenę stanu pomp, zaworów i elementów hydraulicznych. System *LOA* jest stosowany m.in. na takich maszynach i pojazdach firmy Liebherr jak: ładowarki *L 550*, *L 566*, *L 580*, *L 586 XPower*, koparki gąsienicowe *R 920*, *R 926*, *R 936*, *R 946*, koparki kołowe *A 914*, *A 918*, *A 924*, wozidło techniczne *TA 230* i wielu inny jak żurawie mobilne czy przeładunkowe i maszyny przeładunkowe. System Liebherr *LOA* stosowany jest do diagnostyki olejowej silnika spalinowego, olejów przekładniowych i hydraulicznych. Zgodnie z dokumentacjami techniczno-ruchowymi *DTR* ładowarki Terex TL80 i Merlo EWVS 35/12 olej hydrauliczny wymieniany jest po 2000 mth lub po 2 lata. W przypadku Liebherr L566 stosowany jest bardziej zaawansowany system *LOA* z badaniami okresowymi próbek oleju hydraulicznego. Dlatego dokumentacja serwisowa nie podaje okresu rozumianego czasem wyrażonego w godzinach i lat do wymiany oleju. Wyniki z badań próbek oleju mają posłużyć do podjęcia decyzji o czyszczeniu czy wymianie oleju. W okresie do 500 godzin pracy na ładowarce Liebherr celowo nie podejmowano działań związanych z pobieraniem próbek oleju zgodnie z *LOA*, a pobierano próbki do badań olejowych zgodnie z metodyką podaną w podrozdziale 7.4.2. Takie działanie miało na celu porównanie wyników stanu oleju hydraulicznego z ładowarek z dodatkowymi układami do bocznikowej mikrofiltracji.

7.5. Podsumowanie koncepcji dodatkowej mikrofiltracji

Przeprowadzone eksploatacyjne badania olejowe na klasę czystości i wilgotność względną na dwóch koncepcjach dodatkowej bocznikowej mikrofiltracji oleju hydraulicznego, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Zarówno pierwsza jak i druga koncepcja bocznikowej mikrofiltracji umożliwia utrzymanie klasy czystości oleju przez dłuższy czas pracy ładowarek jak przy klasie oleju wlewanego do zbiornika hydraulicznego.
- 2) Pierwsza koncepcja dodatkowej mikrofiltracji na ładowarce Terex TL80 utrzymała klasę czystości do około 500 godzin pracy na 6 klasie *NAS* i klasie *ISO 17/15/12*, jedynie zanieczyszczenia o średnicy 14 μm zwiększyły klasę o jeden do 17/15/13.
- 3) Druga koncepcja bocznikowej mikrofiltracji na ładowarce Merlo EWVS 35/12 dopiero po 480 godzinach pracy zwiększyła o jedną jednostkę klasę czystości *ISO* oleju z 17/15/12 na 18/16/13 tj. z 6 do 7 klasy *NAS*. Jednak należy podkreślić, że w tej ładowarce celowo nie był wykorzystywany układ elektrycznego zasilania dodatkowej pompy do mikrofiltracji po skończonej pracy ładowarki po wyłączeniu silnika elektrycznego. Zakłada się, że gdyby okresowo również uruchamiać ten układ klasa czystości utrzymana byłaby na tym samym poziomie, co w chwili oczyszczonego oleju wlanego do zbiornika hydraulicznego przed badaniami eksploatacyjnymi.

- 4) W ujęciu kosztowym pierwsza koncepcja mikrofiltracji oleju hydraulicznego wyniosła około 2700 zł, natomiast druga koncepcja bocznikowej *MF* to około 5400 zł. Dwukrotna wartość realizacji koncepcji drugiej wynikała z zakupu pompy łopatkowej i silnika elektrycznego.
- 5) W ładowarce Liebherr L 566 już po 160 godzinach pracy klasa czystości wzrosła o cztery stopnie z klasy *ISO 17/15/12* na 20/18/14 tj. z 6 do 10 klasy *NAS*. Dalsza praca ładowarki spowodował wzrost klasy do 21/20/19 (po 320 h) i 23/22/20 (po 480 h), co odpowiadało 12 klasie *NAS*. Olej po 320 godzinach pracy zgodnie z normami stał się olejem pozaklasowym.
- 6) Wilgotność względna oleju hydraulicznego na dwóch ładowarkach kołowych z pierwszą i drugą koncepcją bocznikowej mikrofiltracji nie spowodowała znaczącego wzrostu *RH* względem oleju przed badaniami. W obu przypadkach ładowarek wilgotność względna wzrosła z 20% do 24% po 480 godzinach pracy.
- 7) Wilgotność względna oleju na ładowarce bez bocznikowej mikrofiltracji w kolejnych pomiarach nieliniowo wzrastała z wartości 20% do 60% po 480 godzinach pracy. W ładowarce Liebherr L 566 już po 320 godzinach pracy uzyskano wynik *RH* 55%, co jest wartością przekraczającą dopuszczalną wartość 50%. W tym przypadku już było zalecenie do przeprowadzenia mikrofiltracji urządzeniem przenośnym.
- 8) Analizując jeden dzień pracy ładowarki na żwirowni bez dodatkowej mikrofiltracji stwierdzono, że klasa czystości wzrosła o dwa zakresy z klasy *ISO 19/15/12* na 22/17/13 tj. z 7 do 9 klasy *NAS*. Przeprowadzenie mikrofiltracji przez 10 godzin pozwoliło na obniżenie klasy czystości oleju do 16/15/12, co odpowiadało 6 klasie *NAS*.
- 9) Wilgotność względna oleju hydraulicznego po jednym dniu pracy (około 9 godzin) może spowodować wzrost *RH* do wartości 38% z wartości początkowej 20%.
- 10) Badania eksploatacyjne na ładowarce kołowej Liebherr dowiodły, że warunki pracy maszyn budowlanych przy zmiennym obciążeniu układu roboczego, w zróżnicowaniu temperaturowym (ranny rozruch i praca w okresie letnim) oraz działanie wpływów atmosferycznych podczas pracy na otwartej przestrzeni – wpływa w szybkim stopniu na zmiany w stanie oleju rozumianego wzrostem klasy czystości i wilgotności oleju.

8. OCENA MIKROFILTRACJI OLEJU HYDRAULICZNEGO W UJĘCIU ŚRODOWISKOWYM

8.1. Regulacje prawne dla odpadów olejowych

Ze względów środowiskowych, separacja membranowa jest powszechnym sposobem do oczyszczania cieczy z zanieczyszczeń. Zgodnie z pracą [20] stosuje się takie techniki filtracji w zależności od średnicy porów (otworów) w membranach (filtrach) jak mikrofiltracja, ultrafiltracja, nanofiltracja, odwrócona osmoza i separacja gazu. Na podstawie prac [10, 72] stwierdzono, że w przypadku olejów przemysłowych mikrofiltracja jest wystarczającą metodą do oczyszczenia oleju do wymaganej klasy czystości. Natomiast w przypadku wycieków olejów do morza w transporcie morskim, konieczne jest poprzedzenie mikrofiltracji oczyszczaniem biologicznym, a na końcu destylacją membranową [85]. Wynika to ze skażenia środowiska naturalnego oraz negatywnego oddziaływania na zwierzęta. Innym przykładem zastosowania mikrofiltracji jest oczyszczenie wody z ropy naftowej w procesie szczelinowania hydraulicznego i wiercenia poziomego w skałach podczas wydobywania ropy naftowej i gazu z łubków [46]. W tych procesach również stosuje się mikrofiltrację z elektrokoagulacją i destylacji membranową. Najmniej uwagi poświęca się zagadnieniu ponownego zastosowania olejów przemysłowych uznając okresową wymianę oleju, a zużyty olej przeznaczany jest na utylizację zgodnie z krajowymi czy europejskimi przepisami.

Oleje odpadowe, zarówno te przemysłowe, jak i pochodzące z pojazdów, należą do kategorii odpadów niebezpiecznych [86]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 5 października 2015 roku w sprawie szczegółowego sposobu postępowania z olejami odpadowymi, dokładnie precyzuje jak należy postępować z odpadami olejowymi. Zgodnie z przepisami [95, 135] zużyty olej powinno się zbierać do specjalnych zbiorników na olej i przekazywać do odbioru i utylizacji przez licencjonowane firmy (rys. 8.1).



Rys. 8.1. Widok magazynu z odpadami olejowymi przechowywanymi w metalowych beczkach [115]

W zakresie odpadów olejowych występują jeszcze inne akty prawne jak:

- a) Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku, która m.in. określa zasady postępowania z odpadami niebezpiecznymi i obowiązek przekazywania ich do odpowiednich podmiotów,

- b) Ustawa Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 roku, która m.in. określa zakres odpowiedzialności za szkody wyrządzone środowisku w wyniku niewłaściwego postępowania,
- c) Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów, które klasyfikuje przepracowane odpady, jako odpady niebezpieczne z określonymi kodami jak np. 13 01 01* dla olejów hydraulicznych zawierających PCB, 13 02 05* dla mineralnych olejów silnikowych, przekładniowych i smarowych niezawierających związków chlorowcoorganicznych czy 13 01 10* dla mineralnych olejów hydraulicznych niezawierających związków chlorowcoorganicznych,
- d) Ustawa Kodeks karny z dnia 6 czerwca 1997 r., w którym artykuł 182 i 183 określa sankcje karne za nielegalne składowanie i utylizację odpadów niebezpiecznych,
- e) System *SENT* (System Elektronicznego Nadzoru Transportu), który jest polskim, teleinformatycznym systemem Krajowej Administracji Skarbowej przeznaczonym do monitorowania przewozu towarów wrażliwych jak np. paliwa, alkohol, tytoń, niektóre odpady czy zboża.

Wymienione akty prawne dla przepracowanych olejów są wytycznymi i stanowią procedurę dla podmiotów wytwarzających zużyte oleje jak należy je utylizować poczynając od źródła ich wytwarzania, gromadzenia, transportu, aż do ich unieszkodliwienia rozumianego recyklingiem. Dzięki odpowiednim procedurom, możliwa jest szczegółowa kontrola na każdym etapie tego procesu postępowania z odpadowymi olejami [98].

Kod odpadu dla oleju przepracowanego jest uzależniony od początkowego przeznaczenia oleju. Olej silnikowy, hydrauliczny czy odpad z separatora posiadają tylko wspólną grupę 13. Każdy typ oleju posiada jeszcze oznaczenie podgrupy jak 13 01, 13 02, 13 03, 13 04, 13 05, 13 07 i 13 08, co również wraz z opisem przedstawiono w tabeli 8.1. Tak klasyfikacja uwzględnia odpowiednio odpadowe oleje hydrauliczne, silnikowe i smarowe, ciecze elektroizolacyjne i nośniki ciepła, oleje zęzowe, odpady z separatorów, odpady paliw ciekłych oraz inne odpady ciekłe olejowe nieujęte w pozostałych pozycjach. Gwiazdka (*) przy kodzie oznacza odpad niebezpieczny. Odpady oznaczone gwiazdką wymagają szczególnej staranności przy magazynowaniu, transporcie, ewidencji i przekazaniu.

Tab. 8.1. Klasyfikacja odpadów olejowych [93, 117]

Podgrupa	Nazwa	Opis (streszczenie)	Źródło pochodzenia
13 01*	Odpadowy olej hydrauliczny	Zużyte oleje robocze z układów hydrauliki siłowej	Maszyny budowlane, drogowe, przemysłowe, wózki widłowe
13 02*	Odpadowy olej silnikowy, przekładniowy i smarowy	Przepracowane oleje silnikowe, przekładniowe i smarowe	Warsztaty, floty zakładów produkcyjnych i firm transportowych
13 03*	Odpadowe oleje elektroizolacyjne i nośniki ciepła	Ciecze stosowane w urządzeniach energetycznych i instalacjach grzewczych	Transformatory i systemy grzewcze
13 04*	Oleje zęzowe	Odpady olejowe związane z eksploatacją jednostek pływających.	Żegluga, porty
13 05*	Odpady z odwadniania olejów w separatorach	Odpady i mieszaniny z separatorów substancji ropopochodnych	Warsztaty, myjnie i bazy transportowe
13 07*	Odpady z paliw ciekłych	Pozostałości i mieszaniny z paliw płynnych	Czyszczenie zbiorników, przeterminowane paliwa
13 08	Odpady olejowe nieujęte w innych podgrupach	Inne odpady olejowe nieujęte w klasyfikacji	Nietypowe i nie standardowe procesy technologiczne
* odpad niebezpieczny			

W zakresie obowiązków przedsiębiorcy związanego z gospodarką odpadami w Polsce występują dwa pojęcia. Jest to *BDO* i wystawienie *KPO*. *BDO* to Baza danych o produktach

i opakowaniach oraz o gospodarce odpadami. Jest to system, w którym przedsiębiorcy prowadzą ewidencję odpadów oraz dokumentują ich przekazania. W przypadku olejów odpadowych jak podano w tabeli 8.1, zużyte oleje, traktowane są, jako odpady. Każdy rodzaj odpadu olejowego ma przypisany odpowiedni kod odpadu zgodnie z katalogiem odpadów. *KPO* to Karta Przekazania Odpadów, która jest dokumentem wystawiany w systemie *BDO* przed przekazaniem odpadu odbiorcy lub transportującemu. Karta *KPO* zawiera m.in. takie informacje jak:

- a) dane przedsiębiorstwa przekazującego,
- b) dane podmiotu transportującego (jeśli dotyczy),
- c) dane punktu przejmującego odpad,
- d) kod i nazwę odpadu,
- e) masę (ilość) odpadu,
- f) datę przekazania odpadu.

W przypadku odpadów pochodzących od zużytych olejów hydraulicznych, które stanowią podgrupę *13 01** w odniesieniu do odpadów z grupy *13 02** tj. zużyte oleje silnikowe, przekładniowe czy smarne, stanowią one największą grupę przemysłowych odpadów olejowych [135]. Wynika to z objętości zbiorników (od 50 do nawet 500 litrów oleju) w maszynach budowlanych, drogowych, przemysłowych, wózkach widłowych, liniach technologicznych, podnośnikach, urządzeniach serwisowych i wielu instalacjach przemysłowych. Oleje hydrauliczne, kiedy tracą swoje właściwości użytkowe, zostają zanieczyszczone lub są wymieniane w ramach cyklu przeglądowo-naprawczego zgodnie z *DTR* lub *DSU* lub innego dokumentu serwisowego, stają się odpadem, który nie powinien być traktowany tak samo jak zużyty olej z silnika samochodowego.

Dla zakładów przemysłowych i działów utrzymania ruchu w zakładach produkcyjnych to ważna różnica w odniesieniu do olejów silnikowych czy przekładniowych, gdyż odpadowe oleje hydrauliczne często powstają w większych objętościach oraz jednocześnie na wielu maszynach jak np. wtryskarki tworzyw sztucznych niż oleje samochodowe. Mają też inną historię eksploatacji, inny poziom zanieczyszczeń i zagrożenie dla środowiska. Z punktu widzenia organizacji odbioru znaczenie ma również, czy odpad jest jednorodny, czy został zmieszany z wodą, czy w zbiorniku znajdują się osady, a także czy podmiot wytwarzający odpady ma możliwość bezpiecznego przepompowania do pojemników transportowych.

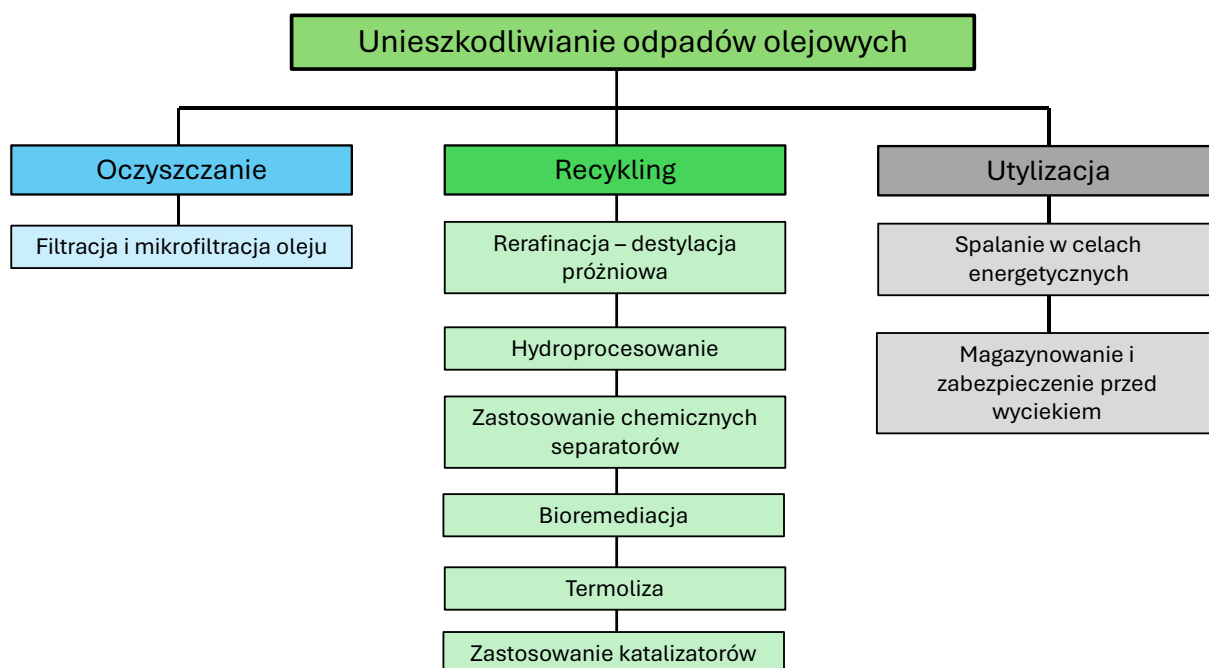
W praktyce odpadowe oleje hydrauliczne należy magazynować w szczelnych, oznakowanych pojemnikach (metalowych lub z tworzywa sztucznego), z dala od odpływów i w sposób ograniczający ryzyko wycieku. Prawidłowo działający odbiorca odpadów dokładnie określa właściwości odpadów, ich ilość, sposób wstępnego magazynowania oraz dokumenty, jakie posiada podmiot wytwarzający odpady. Dla małych firm lub podmiotów zaczynających swoją działalność, które na początku nie chcą samodzielnie prowadzić klasyfikacji olejowej, pomocne bywa wsparcie operatora takiego jak np. Waste24. Jest to polska firma informatyczna, która tworzy oprogramowanie dla przedsiębiorstw z branży odpadowej i komunalnej. Jej głównym produktem jest oprogramowanie *SaaS* (Software as a Service) do zarządzania gospodarką odpadami, logistyką oraz obsługą dokumentacji środowiskowej, w tym integracją z systemem *BDO*. Wszystkie te działania mają przeciwdziałać zjawisku nielegalnego składowania beczek z zużytym olejem jak w przypadku zdarzenia z gminy Miłkowice na Dolnym Śląsku. W dniu 20.03.2023 r. odkryto w Lipcach, przy drodze w kierunku byłego nieczynnego poligonu - 65 dwustulitrowych beczek z olejem. Pół kilometra dalej - kolejnych 15 beczek. Oprócz tego, również odkryto materiały eksploatacyjne z warsztatu. Beczki z olejem były szczelne i nie groziły wyciekiem, co przedstawia rysunek 8.2.



Rys. 8.2. Widok nielegalnego składowiska odpadów olejowych silnikowych na terenie gminy Miłkowice na Dolnym Śląsku w dniu 20.03.2023 r. [116]

8.2. Recykling i opłaty za utylizację odpadów olejowych

W przypadku odpadów olejowych (np. zużytych olejów hydraulicznych silnikowych czy przekładniowych) w rozumieniu środowiskowym można zastosować szereg pojęć jak oczyszczanie, recykling, rerafinacja czy utylizacja. Uszeregowanie znaczenia tych pojęć w ujęciu odpadów olejowych przedstawiono graficznie na rysunku 8.3 [19].



Rys. 8.3. Schemat klasyfikacji pojęć w procesie środowiskowego unieszkodliwiania odpadów olejowych

Analizując schemat przedstawiony na rysunku 8.3 można zauważyć, że oczyszczanie zużytego oleju hydraulicznego może nie być zakwalifikowane do procesu recyklingu. Według pozycji [3] jest to najprostszy i zarazem najtańszy proces mechanicznego usunięcia zanieczyszczeń (wody, osadów, cząstek stałych) bez zasadniczej zmiany składu chemicznego oleju. Poprzez mikrofiltrację otrzymuje się olej, który może być ponownie wykorzystany w maszynach z hydrauliką siłową. Natomiast według innych źródeł [51] mikrofiltracja, jako oczyszczenie odpadu olejowego jest zaliczane jako proces recyklingu. Jest to ogólne pojęcie oznaczające odzysk materiałowy odpadów i przekształcenie ich w produkty, materiały lub substancje do ponownego wykorzystania. Odpad olejowy staje się ponownie wartościowym surowcem. Utylizacja w języku potocznym oznacza zniszczenie lub unieszkodliwienie odpadu. W przepisach dotyczących gospodarki odpadami termin ten praktycznie nie funkcjonuje, jako nazwa procesu. Najczęściej odnosi się do procesów unieszkodliwiania (np. spalania bez lub z odzyskiem energii) lub jest błędnie używany zamiast zagospodarowania odpadów. Celem utylizacji jest bezpieczne usunięcie odpadu, a nie odzysk materiału jako surowca.

W obowiązujących przepisach dotyczących gospodarki odpadami obowiązuje hierarchia postępowania z odpadami, którą można uszeregować w następującej kolejności:

1. zapobieganie powstawaniu odpadów,
2. przygotowanie do ponownego użycia,
3. recykling i związane z nim techniki oczyszczania oleju,
4. utylizacja w rozumieniu odzysku energii,
5. unieszkodliwianie.

W kontekście tematu pracy doktorskiej dążeniem jest do postępowania z olejem hydraulicznym zgodnie z punktem pierwszym i drugim punktem hierarchii postępowania z odpadami. Mikrofiltracja oleju najlepiej wpisuje się w te punkty.

W zakresie odpadów olejowych możliwe jest zastosowanie różnych technik recyklingu, aby usunąć z oleju zanieczyszczenia stałe oraz wodę dla ponownego wykorzystania oleju. Są to następujące techniki recyklingu dla przepracowanego oleju:

- a) zastosowanie chemicznych separatorów,
- b) hydroprocesowanie,
- c) destylacja próżniowa (rerafinacja),
- d) separacja membranowa,
- e) bioremediacja,
- f) termoliza,
- g) stosowanie katalizatorów.

Pierwszą metodą recyklingu zużytego oleju jest zastosowanie chemicznych separatorów do oddzielania wody i zanieczyszczeń od oleju odpadowego [1, 2]. W tym procesie następuje neutralizacja węglowodorów aromatycznych oraz innych szkodliwych substancji. Druga metoda to hydroprocesowanie, która polega na wykorzystaniu wodoru do usuwania zanieczyszczeń z oleju odpadowego. Proces ten obejmuje hydrrafinację, hydrokrakowanie i hydrokonwersję. Ta metoda pozwala na uzyskanie wysokiej jakości baz olejowych [65, 132].

Destylacja próżniowa to proces separacji składników oleju na różne frakcje na podstawie ich temperatury wrzenia. W próżni, proces ten może odbywać się w niższych temperaturach, co minimalizuje ryzyko degradacji termicznej oleju [20, 69]. Destylacja próżniowa nazywana również rerafinacją jest zaawansowanym procesem technologicznym przywracającym zużytemu olejowi właściwości oleju bazowego. Ta metoda wykorzystuje różne rozpuszczalniki do usuwania zanieczyszczeń z przepracowanego oleju. Na przykład, rozpuszczalniki polarnie różnicują między komponentami oleju, co umożliwia ich selektywne

usuwanie [92]. W wyniku tego procesu powstaje wysokiej jakości olej bazowy, z którego można produkować nowe oleje smarowe. Dlatego rerafinacja jest obecnie uznawana za najbardziej pożądany sposób zagospodarowania zużytych olejów, ponieważ pozwala zachować ich wartość materiałową i ogranicza zużycie ropy naftowej do produkcji nowych olejów bazowych.

Separacja membranowa jest najbardziej popularną i efektywną metodą oddzielania zanieczyszczeń. Różne typy membran (mikrofiltracja, ultrafiltracja, nanofiltracja) mogą być stosowane do usuwania cząstek, wody i innych zanieczyszczeń. Techniki membranowe różnią się rodzajami membran i średnicami porów w membranach [40, 83].

Bioremediacja to metoda wykorzystująca mikroorganizmy do rozkładu zanieczyszczeń w zużytym oleju. Jest to proces ekologiczny, który może być stosowany jako uzupełnienie innych metod recyklingu [46, 64].

Termoliza polega na rozkładzie oleju w wysokiej temperaturze, często w atmosferze beztlenowej, co prowadzi do uzyskania gazów, olejów i resztek stałych. Proces ten jest skuteczny w przetwarzaniu oleju zawierającego trudne do usunięcia zanieczyszczenia [51, 85].

Stosowanie katalizatorów umożliwia bardziej efektywne usuwanie zanieczyszczeń z oleju przepracowanego. Katalizatory mogą wspomagać reakcje chemiczne, które usuwają siarkę, azot i inne szkodliwe substancje [134].

Ze wszystkich wymienionych metod recyklingu zużytego oleju, separacja olejowa, jako mikrofiltracja jest najszybszą i najprostszą metodą oczyszczenia oleju z zanieczyszczeń i wody. Na rynku oferowane są przenośne stanowiska do mikrofiltracji różnych firm oraz filtry pozwalające na zatrzymywanie zanieczyszczeń o średnicy powyżej 1 μm [59]. Dla olejów przemysłowych jak oleje hydrauliczne mikrofiltracja jest wystarczającą metodą oczyszczania oleju i ponownego jego zastosowania. Inną zaletą tej metody, że różnorodność stanowisk do mikrofiltracji oleju umożliwia oczyszczenie oleju w miejscu jego użytkowania, tj. w zakładach, które eksploatują maszyny i pojazdy zasilane olejem hydraulicznym. Nie ma potrzeby transportowania zużytego oleju do firm zajmujących się składowaniem i recyklingiem oleju.

W zakresie opłat wynikających z polskich przepisów odnośnie oddawania odpadowego oleju przemysłowego, należy rozróżnić opłaty publicznoprawne od kosztów komercyjnego odbioru odpadu. W przypadku zużytego oleju hydraulicznego w Polsce nie obowiązuje opłata administracyjna ani środowiskowa za samo przekazanie przepracowanego (zużytego) oleju hydraulicznego uprawnionemu odbiorcy. Przepisy nakładają obowiązek rejestrowania wytworzonych odpadów w systemie *BDO* i przechowywania dokumentów *KPO* oraz właściwego zagospodarowania odpadu. Koszt odbioru odpadu olejowego ustalany jest na zasadach rynkowych między wytwórcą odpadu a firmą posiadającą zezwolenie na zbieranie lub przetwarzanie odpadów. Cena zależy m.in. od następujących czynników:

- a) ilości odpadu,
- b) kodu odpadu,
- c) stopnia zanieczyszczenia oleju,
- d) lokalizacji odbioru,
- e) kosztów transportu,
- f) częstotliwości odbioru,
- g) aktualnej sytuacji na rynku surowców wtórnych.

Przedsiębiorca przekazujący odpadowy olej hydrauliczny powinien prowadzić ewidencję w systemie *BDO*, wystawić Kartę Przekazania Odpadu (*KPO*) i przekazać odpad wyłącznie podmiotowi posiadającemu odpowiednie zezwolenia. Przekazanie zużytego oleju hydraulicznego do uprawnionego odbiorcy nie powoduje obowiązku wnoszenia opłaty za

korzystanie ze środowiska. Takie opłaty dotyczą m.in. emisji substancji szkodliwych do powietrza w przypadku zużycia pali przez pojazdy w firmach transportowych, poboru wód czy składowania odpadów, a nie przekazania odpadu do odzysku lub unieszkodliwienia zgodnie z przepisami. Na podstawie krajowego przedsiębiorstwa Stena Recycling Sp. z o.o. w Swarzędzu zajmującego się gospodarką odpadową, dla odpadów olejowych w sposób uśredniony określono koszty związane z odbiorem i unieszkodliwianiem, co przedstawiono w tabeli 8.2.

Tab. 8.2. Koszty odbioru odpadów z układu hydraulicznego [118]

Lp.	Nazwa odpadu	Koszt w zł
1	Zużyty olej hydrauliczny	700 zł/t
2	Zużyte filtry z układu hydraulicznego	5000 zł/t
3	Transport	300 zł*
* koszt transportu dla odbioru 1000 litrów zużytego oleju i 1000 kg zużytych filtrów		

Zważywszy, że odbiór i rozliczanie odpadów olejowych jest od kilogramów a nie od litrów, przy założeniu gęstości oleju hydraulicznego $\rho_v 46$ zgodnie z tabelą 4.1 wynosi $0,86-0,88 \text{ g/cm}^3$ w 15°C , do dalszych analiz założono wartość $0,87 \text{ g/cm}^3$. Na tej podstawie uzyskano wartość 870 kg z 1000 litrów zużytego oleju. Zważywszy, że zbiornik IBC mauzer waży wraz z paletą i metalową klatką 60 kg zgodnie z [119], cały pojemnik wypełniony zużytym olejem będzie ważył 930 kg. Dla firm recylingowych odbiór zużytego oleju hydraulicznego odbywa się najczęściej w plastikowych pojemnikach o pojemności 1000 litrów lub w metalowych beczkach. Stawka za transport podana w tabeli 8.2 (300 zł) wynika tylko dla transportu jednej tony filtrów i 1000 litrów oleju z firmy wytwarzającej odpady olejowe znajdującej się w bliskiej lokalizacji podmiotu przetwarzającego odpady olejowe tj. do 15 km, np. z Poznania do Swarzędza. W przypadku firm wytwarzających odpady olejowe, znajdujących się w województwie wielkopolskim koszt transportu będzie większy proporcjonalnie i wynikach z odległości w kilometrach między tymi przedsiębiorstwami.

8.3. Korzyści środowiskowe stosowania mikrofiltracji

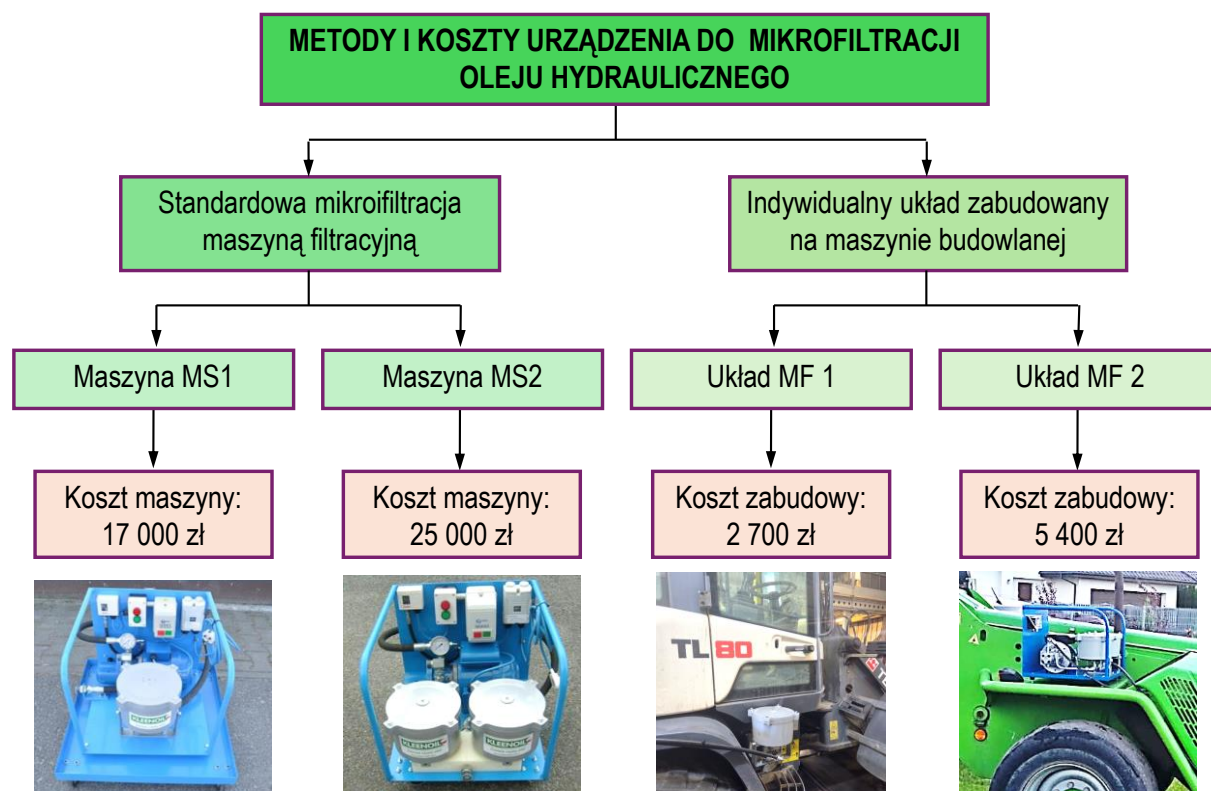
Analizując dokumentacje techniczno-ruchowe *DTR* różnych maszyn budowlanych i drogowych zauważyć można różne okresy wymiany oleju hydraulicznego. Średnio wymianę oleju hydraulicznego wykonuje się co 2000 lub 3000 godzin pracy. Jednak są przypadki maszyn, w których olej wymienia się rzadziej, co nawet 5000 czy 6000 godzin pracy, jeżeli prowadzona jest regularna analiza oleju hydraulicznego, co 1000 godzin pracy. Tak duża rozbieżność wynika z warunków pracy maszyn z instalacjami hydraulicznymi np. podczas dużego zapylenia (praca na kopalni czy żwirowni) oraz pod wysokim obciążeniu. Wówczas zalecana jest częstsza wymiana oleju wraz filtrami olejowymi. Niezależnie od godzin pracy maszyny zauważono, że większość dokumentacji *DTR* wspólnie podają czas 24 miesiące, jako maksymalny czas do wymiany niezależnie od intensywności pracy tych maszyn. Na przykładzie analizowanych w pracy doktorskiej maszyn budowlanych w tabeli 8.3 podano czasy wymiany oleju hydraulicznego zgodnie z ich *DTR*.

Tab. 8.3. Okresy wymian oleju hydraulicznego w analizowanych maszynach budowlanych [66, 74, 127]

Lp.	Nazwa maszyny (ładowniki kołowej)	Okres wymiany	Uwagi
1	Terex TL80	2000 mth lub co 2 lata	analiza oleju co 1000 mth
2	Merlo EWVS 35/12	2000 mth lub co 2 lata	wymiana filtrów co 500 mth
3	Liebherr L 566	3000 mth ^{1), 2)}	analiza oleju co 1000 mth
¹ wymiana oleju wydłużona do 6000 mth przy regularnej analizie oleju hydraulicznego,			
² starsze modele do 2008 roku, wymiana oleju co 2000 mth.			

Należy podkreślić, że ze względu na coraz to większą świadomość producentów maszyn jak i użytkowników w zakresie mikrofiltracji, zdarzają się dokumentacje techniczno-ruchowe *DTR* lub dokumentacje systemu utrzymania (np. żurawia *HDS Palfinger*) z zapisami, że przed zalaniem układu hydraulicznego klasa czystości oleju zgodnie z *ISO 4406* powinna wynieść 17/15/12, co odpowiada 6 klasie *NAS* (olej bardzo czysty przystosowany dla instalacji do 32 MPa) i wymianę, co 1000 godzin pracy lub po roku czasu.

Na rysunku 8.4 przedstawiono metody i koszty prowadzenia mikrofiltracji oleju hydraulicznego maszynie budowlanej lub drogowej. Koszt podany na schemacie blokowym związany jest z zakupem maszyny do mikrofiltracji lub zabudowy układu hydraulicznego zasobnikiem do bocznikowego oczyszczania oleju hydraulicznego.



Rys. 8.4. Schemat metod i kosztu prowadzenia mikrofiltracji oleju hydraulicznego w maszynie budowlanej i drogowej

Dostawca filtrów na stronie [103] deklaruje, że system Kleenoil pozwala wyeliminować zanieczyszczenia wodą i cząstkami stałymi, wydłużyć okres eksploatacji oleju silnikowego nawet pięciokrotnie (a oleju hydraulicznego – dziesięciokrotnie). Dzięki czemu zmniejszy się zużycie silnika i podzespołów oraz znacząco zredukuje się czas przestojów. Ponadto możliwe jest usuwanie cząstek o wielkości do 1 μm w silnikach, jak i układach hydraulicznych. Należy podkreślić, że zapis 5-cio krotnie czy 10-cio krotnie nie podaje przebiegu ani czasu pracy silników czy maszyn do wymiany bez stosowania mikrofiltracji oraz zapis może dotyczyć nielicznych przypadków silników i maszyn gdzie udało się utrzymać zadowalający stan oleju silnikowego czy hydraulicznego w tak długim czasie z zachowaniem parametrów smarnych i lepkościowych.

Do obliczeń związanych z korzyści środowiskowych stosowania okresowej lub ciągłej mikrofiltracji oleju hydraulicznego uwzględniono koszt zakupu oleju hydraulicznego do danej pojemności układu hydraulicznego analizowanych ładowarek, koszt zakupu filtrów hydraulicznych, koszt utylizacji oleju hydraulicznego, koszt utylizacji filtrów hydraulicznych, co przedstawiono w tabeli 8.4. Należy podkreślić, że analizowane trzy ładowarki kołowe

miały w różnym stopniu zaawansowane układy hydrauliczne. Ładowarka Terex TL80 posiadała dwa filtry (ssania i powrotny), Merlo EWVS 35/12 trzy filtry (ssania, powrotny oraz odpowietrzający), a Liebherr L-566 cztery filtry (ssania, powrotny, odpowietrzający i obwodu sterowania).

Tab. 8.4. Dane utrzymania instalacji hydraulicznej analizowanych ładowarek kołowych [118]

Lp.	Nazwa	Terex TL80	Merlo EWVS 35/12	Liebherr L-566
1	Pojemność okładu hydraulicznego	55 l	120 l	280 l
2	Typ oleju hydraulicznego	Shell Tellus S2 M 46	Shell Tellus S2 VX 46	Shell Tellus S2 VX 46
3	Koszt litra oleju hydraulicznego ¹	17 zł/l	18 zł/l	18 zł/l
4	Koszt oleju dla układu hydraulicz.	935 zł	2160 zł	5040 zł
5	Koszt zakupu filtrów olejowych	500 zł	750 zł	1100 zł
6	Waga filtrów olejowych	4 kg	5 kg	6 kg
7	Koszt utylizacji filtrów hydraulicz.	20 zł	25 zł	30 zł
8	Koszt utylizacji oleju ²	1 zł/l	1 zł/l	1 zł/l
9	Koszt utylizacji całego oleju	55 zł	120 zł	280 zł

¹ przy zakupie oleju hydraulicznego z metalowej beczki beczki 209 litrów,
² z uwzględnieniem transportu.

W tabeli 8.4 nie uwzględniono opłaty za korzystanie ze środowiska gdyż zgodnie z [118] odpady olejowe są przekazywane do punktu odbioru i utylizacji odpadów na podstawie *KPO* w systemie *BDO*. Olej nie jest spalany ani składowany przez przedsiębiorcę na terenie jego wytworzenia. Opłata środowiskowa dotyczyłaby np. umieszczenia odpadów na składowisku przez podmiot prowadzący składowisko.

Kolejnym etapem oszacowania pełnych kosztów utrzymania instalacji hydraulicznej z klasycznym podejściem w postaci okresowej wymiany oleju hydraulicznego oraz zastosowania bocznikowej mikrofiltracji jest określenie trwałości wkładów filtracyjnych w procesie mikrofiltracji. Dla systemu Kleenoil nie ma jednej stałej wartości czasu użytkowania wkładów, gdyż zależy to od stopnia zanieczyszczenia oleju, ilości wody w oleju, warunków pracy czy liczby godzin pracy urządzenia. Na podstawie zaleceń producenta i dystrybutorów przyjmuje się typowy interwał wymiany, co około 500 godzin lub raz w roku. Innym ograniczeniem w określeniu trwałości godzinowej wkładu jest jego chłonność. Jeden wkład do mikrofiltracji maksymalnie zatrzymuje 1,2 litra wody i w przypadku oleju bardzo zanieczyszczonego z dużą ilością wody, może okazać się, że okres wymiany będzie skrócony do 250-300 godzin pracy. Do dalszych obliczeń w zakresie oszacowania korzyści środowiskowych zastosowania mikrofiltracji założono wartość 500 godzin ze względu na występowanie innych filtrów w maszynie budowlanej. Na podstawie wyników z badań lepkości kinematycznej oleju hydraulicznego przedstawionych w podrozdziale 5.2.3 założono dwukrotną żywotność oleju do kolejnej wymiany do 4000 godzin pracy uwzględniając kryterium nieprzekroczenia dolnej granicy lepkości kinematycznej. Należy jednak podkreślić, że producent wkładów filtracyjnych Kleenoil podaje znacznie dłuższe okresy użytkowania oleju (nawet dziesięciokrotnie) do kolejnej wymiany bez informacji o własnościach lepkościowych oleju po tak długim okresie pracy oleju w instalacji hydraulicznej. Producent nie odnosi się do kwestii ścinania mechanicznego polimerowych dodatków poprawiających wskaźnik lepkości przy długotrwałej i pracy pod wysokim obciążeniem ani utraty dodatków uszlachetniających (przeciwutleniaczy, detergentów, dyspergatorów itd.). Jedynie producent podkreśla, że mikrofiltracja ogranicza tempo utleniania się oleju poprzez usuwanie wody i produktów degradacji, co spowalnia starzenie się oleju hydraulicznego. W tabeli 8.5 przedstawiono na przykładzie trzech ładowarek kołowych koszty eksploatacji układu hydraulicznego w sposób klasyczny z okresową wymianą oleju hydraulicznego oraz przy zastosowaniu mikrofiltracji w okresie 4000 godzin pracy (dwie wymiany oleju do 2000 mth).

W obliczeniach założono, że maszyny pracują 40 godzin tygodniowo (5 dni po 8h), co w miesiącu przełoży się na 160 mth. Te założenie było niezbędne do określenia liczby wymian wkładów Kleenoil do mikrofiltracji. Przy założeniu ich trwałości na 500 godzin pracy w okresie 4000 mth będzie to 8 wymian.

Tab. 8.5. Koszty eksploatacji układu hydraulicznego ładowarek kołowych bez i z mikrofiltracją

Bez mikrofiltracji – okres 4000 mth				
Lp.	Nazwa	Terex TL80	Merlo EWVS 35/12	Liebherr L-566
1	Liczba wymian oleju	2	2	2
2	Koszt oleju dla układu hydraulicz.	1870 zł	4320 zł	10 080 zł
3	Koszt zakupu filtrów olejowych	1000 zł	1500 zł	2200 zł
4	Koszt utylizacji filtrów hydraulicz.	40 zł	50 zł	60 zł
5	Koszt utylizacji całego oleju	110 zł	240 zł	560 zł
A	SUMA	3020 zł	6110 zł	12 900 zł
Z mikrofiltracją – okres 4000 mth				
1	Liczba wymian oleju	1	1	1
2	Koszt oleju dla układu hydraulicz.	935 zł	2160 zł	5040 zł
3	Koszt zakupu filtrów olejowych	1000 zł	1500 zł	2200 zł
4	Koszt utylizacji filtrów hydraulicz.	40 zł	50 zł	60 zł
5	Koszt utylizacji całego oleju	55 zł	120 zł	280 zł
6	Zakup wkładu Kleenoil	330 zł	330 zł	330 zł
7	Liczba wymian wkładów Kleenol	8	8	8
8	Waga wkładów Kleenoil	2 kg	2 kg	2 kg
9	Koszt utylizacji wkładu Kleenoil	10 zł	10 zł	10 zł
B	SUMA	4750 zł	6550 zł	10 300 zł
	Różnica w kosztach (A-B)	-1730 zł	-440 zł	2600 zł

Analizując wartości podane w tabeli 8.5 stwierdza się, że dodatkowa mikrofiltracja częściowo zwiększa koszty eksploatacji układu hydraulicznego w zakresie zakupu wkładów Kleenoil do MF oraz ich późniejszej utylizacji (pozycje od 6 do 9 w tabeli 8.5). Natomiast główną korzyścią finansową jest brak zakupu oleju do układu hydraulicznego po 2000 mth. Inne korzyści w rozumieniu środowiskowym jest nie przekazanie oleju hydraulicznego do utylizacji po pierwszej planowanej wymianie oleju w przypadku klasycznego podejścia wynikającego z DTR maszyny. W przypadku trzech ładowarek kołowych również zauważono, że przy małych pojemności układów hydraulicznych jak maszynie Terex TL80 koszt materiałów eksploatacyjnych do mikrofiltracji przyczyni się do wyższych całkowitych kosztów utrzymania układu hydraulicznego. W ładowarce średniej klasy jak Merlo EWVS35/12 koszty są nieznacznie wyższe, tj. o 440 zł w skali 4 lat względem klasycznej okresowej wymiany oleju hydraulicznego. W dużych maszynach budowlanych jak ładowarka klasy I ze względu na pojemność układu hydraulicznego tj. 280 l zastosowanie dodatkowego układu do MF zmniejszyło koszty eksploatacji układu hydraulicznego o 2600 zł w okresie 4 lat, co stanowi 20% kosztów z okresowej wymianie oleju hydraulicznego. Uwzględniając koszt budowy układu typu *by-pass* na ładowarce Liebherr L-566, to w przypadku instalacji MF 1 jaka została zbudowana na ładowarce Terex TL80, układ do mikrofiltracji zwróci się po 4 latach podczas drugiej wymiany oleju hydraulicznego. Natomiast w przypadku układu MF2, jaki zabudowany został na ładowarce Merlo, instalacja zwróci się po 8 latach podczas trzeciej wymiany olej hydraulicznego na nowy (tabela 8.6).

Tab. 8.6. Okres zwrotu inwestycji na budowę bocznikowego układu *by-pass* w ładowarce Liebherr L-566

Lp.	Nazwa	Układ MF 1	Układ MF 2
1	Czas zwrotu instalacji do MF	4 lata	8 lat
2	Liczba wymian oleju: z MF/ bez MF	1/2 wymiany oleju	2/4 wymiany oleju

Należy podkreślić, analizując dane zawarte w tabeli 8.6 odnośnie czasu zwrotu inwestycji budowy dodatkowego bocznikowego układu do mikrofiltracji zgodnie z założeniami instalacji *MF 1* i *MF 2*, że wartości dotyczą tylko oszczędności z tytułu zakupu oleju hydraulicznego do okresowej wymiany zgodnie z wymaganiami *DTR* ładowarki. Natomiast nie uwzględniono w tych analizach drugiego czynnika tj. przyspieszonego zużycia zespołów układu hydraulicznego (rozdzielacze i siłowniki hydrauliczne) i awarii jak uszkodzenie np. pompy jazdy czy silników hydraulicznych. W tabeli 8.7 podano koszty zakupu i regeneracji podstawowych zespołów hydraulicznych ładowarki Liebherr L-566.

Tab. 8.7. Koszty zakupu i regeneracji podstawowych zespołów hydraulicznych w ładowarce Liebherr L-566

Lp.	Nazwa	Cena	Uwaga
1	Pompa jazdy Liebherr A4VG125 L566/L576	27 999,00 zł	Nowa
2	Silnik jazdy Rexroth A6VM140EP	24 999,00 zł	Nowy
3	Pompa robocza Bosch Rexroth A8VO55 lub A8VO107	6000-18000,00* zł	Regenerowana
4	Rozdzielacz hydrauliczny Bosch Rexroth M7-3028-01/4M7-22	46 500,00** zł	Nowy
5	Rozdzielacz hydrauliczny Bosch Rexroth M7-3028-01/4M7-22	16 000,00** zł	Regenerowany
* W zależności od stopnia zużycia i godzin pracy na naprawę			
** Na podstawie zapytania indywidualnego u dostawcy			

Dwie pierwsze pozycje w tabeli 8.7 dotyczą cen nowej pompy i silnika, jako zespołów zamiennych względem oryginalnych zalecanych przez producenta ładowarki. W przypadku takiego zakupu należy składać zapytanie o cenę bezpośrednio u dostawcy, jednak można wstępnie założyć, że taki zakup będzie dwukrotnie większy względem zamiennika pompy i silnika. Ładowarka Liebherr L-566, która była trzecim obiektem badań olejowych na czystość oleju i zawartość wody była po wymianie uszkodzonej pompy hydraulicznej jazdy, co przedstawiono już na rysunku 7.7a) w podrozdziale 7.4.2. Metodyka badań eksploatacyjnych. Analizując ceny zakupu i regeneracji podstawowych zespołów hydraulicznych wspomnianej ładowarki, co przedstawiono w tabeli 8.6 stwierdzono, że w przypadku pompy jazdy (cena 28000 zł) zwraca się nawet zakup dwuzasobnikowej przenośnej maszyny do mikrofiltracji Kleenoil *MS2+MM5* (25000 zł) o większej wydajności filtracji względem *MS1+MM5* (17000 zł). W kosztach głównych zespołów ładowarki podanych w tabeli 8.7 nie podano kosztów związanych z wymianą pompy jazdy. W firmie, w której realizowany był doktorat wdrożeniowy tj. Powers Partner, koszt ten wyniósł 3100 zł i zajął około 10 rbh przy stawce 310 zł/rbh (brutto). Firma jest autoryzowanym serwisem ładowarek Liebherr, w przypadku wymiany w serwisie tej marki koszty byłyby znacznie większe. Należy również podkreślić oprócz kosztów związanych z wymianą pompy oraz kosztami wymiany, dla właściciela ładowarki wystąpił kolejny koszt związany z przestojem maszyny i utraconymi korzyściami z tytułu wyłączenia ładowarki z pracy.

Zastosowanie maszyny do mikrofiltracji lub zabudowanych indywidualnych układów typu *by-pass* zmniejsza koszty utrzymania instalacji hydraulicznej tylko w zakresie zakupu i utylizacji oleju o 20% względem klasycznego podejścia do okresowej wymiany oleju zgodnie z *DTR* tylko przy pojemnościach układu powyżej 280 litrów. Należy podkreślić, że oszczędności na zakupie oleju w praktyce mogą być większe, gdyż założono na podstawie własnych badań, że mikrofiltracją można przedłużyć trwałość oleju do dwóch wymian do osiągnięcia dolnej granicy lepkości kinematycznej, mimo że dostawcy maszyn do separacji olejowej i filtrów na swoich stronach podają, znacznie dłuższe okresy wymian oleju. Aby takie podejście było możliwe konieczne jest ciągłe badanie oleju hydraulicznego na spadek lepkości kinematycznej. Autor w dalszych swoich pracach planuje zweryfikować otrzymane wyniki w kolejnych badaniach. Ponadto stwierdza się, że mikrofiltracja oprócz oszczędności na kosztach zakupu i wymian oleju hydraulicznego również wpłynie na wydłużenie trwałości zespołów hydraulicznych jak pompy, rozdzielacze, siłowniki czy zawory ze względu na ciągłe oczyszczenie układu hydraulicznego z zanieczyszczeń i wody. Analizując koszty

przyszłych awarii w układzie hydraulicznym, na przykładzie jednego pojazdu z instalacją hydrauliczną ze zbiornikiem o pojemności 280 litrów, koszt zakupu urządzenia do mikrofiltracji zwraca się od razu ze względu na bardzo wysokie koszty nowych zespołów układu roboczego i jazdy wraz z kosztami wymiany.

8.4. Podsumowanie znaczenia mikrofiltracji w ujęciu środowiskowym

Na podstawie oceny procesu mikrofiltracji oleju hydraulicznego w kontekście mniejszego obciążenia środowiska odpadami olejowymi stwierdzono:

- 1) Mikrofiltracja jest wystarczająca do oczyszczania wielu olejów przemysłowych, jednak w przypadku silnie zanieczyszczonych ścieków olejowych, np. po wyciekach do morza lub przy wydobywaniu ropy i gazu, należy ją łączyć z innymi procesami, takimi jak oczyszczanie biologiczne, elektrokoagulacja i destylacja membranowa.
- 2) Polskie przepisy tworzą rozbudowany system kontroli gospodarki olejami odpadowymi, obejmujący klasyfikację kodami odpadów, ewidencję w systemie *BDO*, wystawianie Kart Przekazania Odpadów *KPO* oraz monitorowanie transportu w systemie *SENT*.
- 3) Oleje hydrauliczne stanowią istotną grupę przemysłowych odpadów olejowych, ponieważ powstają często w dużych ilościach i mają zróżnicowany stopień zanieczyszczenia, dlatego wymagają indywidualnej oceny, właściwej organizacji odbioru i zabezpieczenia przed nielegalnym składowaniem.
- 4) Zalecanym sposobem postępowania z odpadowym olejem hydraulicznym jest zapobieganie jego powstawania i przygotowanie do ponownego użycia, a dopiero w dalszej kolejności recykling, odzysk energii i unieszkodliwianie.
- 5) Spośród dostępnych metod przetwarzania olejów odpadowych mikrofiltracja jest rozwiązaniem najprostszym, najszybszym i stosunkowo tanim, szczególnie w przypadku olejów hydraulicznych, dla których często zapewnia wystarczający poziom czystości.
- 6) Oczyszczanie oleju hydraulicznego bezpośrednio w miejscu jego użytkowania ogranicza koszty i ryzyko związane z transportem odpadu, a także pozwala wydłużyć okres eksploatacji oleju i zmniejszyć ilość odpadów przekazywanych do zewnętrznych firm.
- 7) Większość dokumentacji techniczno-ruchowych określa 2000 mth lub 24 miesiące, jako maksymalny okres użytkowania oleju do kolejnej wymiany.
- 8) W ujęciu środowiskowym mikrofiltracja wydłuża dwukrotnie okres użytkowania oleju hydraulicznego przy założeniu wymiany oleju, co 2000 mth jak w klasycznym podejściu do wymian zgodne z *DTR*. Dwukrotne wydłużenie czasu użytkowania oleju wynika z osiągnięcia dolnej granicy lepkości kinematycznej i pogorszenia właściwości smarnych oleju.
- 9) Deklaracje producentów wkładów filtracyjnych dotyczące pięciokrotnego lub nawet dziesięciokrotnego wydłużenia czasu użytkowania oleju należy traktować, jako teoretyczny. Producenci nie odnoszą się do kwestii lepkości oleju i podstawowego okresu do wymiany oleju na nowy.
- 10) Zastosowanie mikrofiltracji zwiększa koszty eksploatacyjne utrzymania układów hydraulicznych przy ich pojemnościach do 120 litrów oleju. Wynika to z zakupu i utylizacji dodatkowych wkładów filtracyjnych mimo, że ogranicza wydatki związane z zakupem nowego oleju i zagospodarowaniem oleju zużytego.
- 11) Opłacalność mikrofiltracji zależy od pojemności układu hydraulicznego. W dużych układach, o pojemności około 280 litrów lub większej, może przynieść oszczędności na poziomie około 20% względem klasycznego podejścia do wymian zgodnie z *DTR* maszyny. Nie występują koszty zakupu oleju przy drugiej wymianie oleju przy zwiększonych kosztach utylizacji filtrów olejowych.

- 12) Istotną korzyścią mikrofiltracji jest ograniczenie awarii kosztownych zespołów hydraulicznych. Utrzymywanie odpowiedniej czystości oleju wydłuża trwałość pomp, silników hydraulicznych, rozdzielaczy, siłowników i zaworów oraz zmniejszyć ryzyko przestojów maszyny.
- 13) Koszty wymian głównych zespołów hydraulicznych lub ich regeneracja zwraca zakup nawet dwuzasobnikowej maszyny do mikrofiltracji *MS2+MM5* wycenionej na 25000 zł przy cenie jednozasobnikowej przenośnej maszyny *MS1+MM5* kosztującej około 17000 zł.
- 14) Wydłużanie okresu użytkowania oleju powinno być połączone z regularnymi badaniami jego właściwości. Szczególnie istotne jest monitorowanie klasy czystości, zawartości wody i lepkości kinematycznej po mikrofiltracji. Sama mikrofiltracja nie przywraca utraconych dodatków uszlachetniających ani pierwotnych właściwości oleju jak przy zalewaniu układu hydraulicznego nowym olejem.
- 15) Kierunkami dalszych prac powinny być kilkuletnie badania intensywności zużycia głównych zespołów hydraulicznych do ich uszkodzenia pracujących w instalacji z oraz bez mikrofiltracji. W niniejszej pracy doktorskiej możliwe było wykazanie zużycia poprzez wzrost chropowatości powierzchni na elementach pracujących z olejem bez mikrofiltracji.
- 16) Dalsze prace powinny być również prowadzone nad dodatkami poprawiającymi lepkość oleju o większej odporności na ścinanie, które można dodawać w trakcie użytkowania oleju hydraulicznego. Opracowanie metodyki mieszania oleju z modyfikatorami w celu poprawy właściwości lepkościowych oleju w warunkach eksploatacyjnych.
- 17) Kierunki dalszych prac to również badania weryfikacyjne określające graniczny przebieg oleju wyrażony w motogodzinach na maszynach budowlanych i drogowych do osiągnięcia dolnej granicy lepkości kinematycznej oleju. W ramach tych prac prowadzonych w warunkach eksploatacyjnych wskazane jest zdefiniowanie czynników przyspieszających spadek lepkości oleju na maszynach pracujących na otwartej przestrzeni.

9. PODSUMOWANIE PRACY

9.1. Wnioski naukowe

Niniejsza praca dotyczyła problematyki czystości oleju hydraulicznego oraz jej wpływu na środowisko naturalne oraz zużycie elementów instalacji hydraulicznej. W pracy dokonano analizy procesu separacji olejowej, technik filtracji i rodzaju membran filtracyjnych na podstawie przeglądu literaturowego prac zagranicznych. Szczególną uwagę poświęcono procesowi mikrofiltracji olejów przemysłowych, na podstawie dalszego przeglądu literaturowego w oparciu o czasopisma branżowe, krajowe oraz normy. Na podstawie tych prac określono wpływ zanieczyszczeń na zużycie układu hydraulicznego oraz wzrost wilgotności oleju, jaki czynniki pogarszające właściwości oleju w dłuższym okresie jego użytkowania. Przeprowadzono badania nowych i zużytych olejów na klasę czystości i wilgotność względną oraz jej zmianę w czasie. W ramach pracy wykonano badania lepkościowe oleju oraz stopnia zużycia w badaniach porównawczych na dwóch równolegle pracujących instalacjach hydraulicznych tj. klasycznej z podstawowymi filtrami oraz z dodatkowym obwodem bocznikowej mikrofiltracji. W aspekcie praktycznym i wdrożeniowym wykonano prototypowe instalacje hydraulicznego typu *by-pass* na dwóch przykładowych ładowarkach kołowych dla dodatkowej mikrofiltracji w czasie pracy tył maszyn. W badaniach eksploatacyjnych również określono zmiany klasy czystości i wilgotności oleju. Wyniki badań nad dodatkową mikrofiltracją odniesiono do przepisów związanych z gospodarką odpadami olejowymi.

Wyniki z badań eksploatacyjnych pozwoliły na opracowanie wytycznych dla dokumentacji technicznej dla budowy zewnętrznych układów do mikrofiltracji oraz algorytm przeglądowy dla utrzymania minimalnej klasy czystości oleju hydraulicznego bez jego wymiany na nowy.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz uzyskanych wyników stwierdzono, że tezę pracy brzmiącą: *możliwe jest opracowanie wytycznych techniczno-konstrukcyjnych do budowy dodatkowych układów do mikrofiltracji oleju hydraulicznego w instalacjach hydraulicznych maszyn i pojazdów budowlanych odzwierciedlonych regresyjnymi modelami stanu oleju hydraulicznego* – należy przyjąć. Ponadto w trakcie realizacji niniejszej pracy sformułowano następujące wnioski naukowe:

1. Niezależnie od zastosowanej membrany, największym ograniczeniem w separacji cieczy jest szybkość zanieczyszczenia membrany i całkowita utrata strumienia cieczy za membraną. Model Hermia podaje, że w pierwszym etapie następuje pośrednie blokowanie porów membrany i spadek wydajności filtracji. W drugim etapie następuje wewnętrzne i zewnętrzne formowanie się ciasta filtracyjnego z ciągłym spadkiem filtracji. W ostatnim etapie jest całkowite zablokowanie porów membrany.
2. Zanieczyszczenia w oleju są przyczyną zużycia ściernego i erozyjnego zespołów hydraulicznych oraz zamułania (obliteracji) kanałów czy przewodów instalacji hydraulicznej.
3. Na intensywność zużycia w układzie hydraulicznym z zanieczyszczonym olejem, przyczynia się rozmiar i stężenie zanieczyszczeń oraz wartości luzów wynikających z montażu współpracujących ze sobą elementów.
4. Układy wysokociśnieniowe mają luzy do 5 μm , a układy niskociśnieniowe 10-20 μm . Częstki zanieczyszczeń o średnicy większej od 0,75 wartości luzu między współpracującymi elementami, zwiększają intensywność zużycia ściernego, a cząstki mniejsze od 0,75 wartości luzu powodują zużycie erozyjne, które jest szczególnie intensywne przy dużym stężeniu zanieczyszczeń i dużej prędkości strumienia oleju hydraulicznego w kanałach i przewodach.

5. Sposób przechowywania nowego oleju hydraulicznego wpływa na zawartość zanieczyszczeń i wilgotność względną. Stwierdzono, że liczba zanieczyszczeń o średnicy powyżej 4 μm była dwukrotnie większa w metalowej beczce niż w oleju znajdującym się plastikowym kanistrze. Zanieczyszczeń powyżej 6 μm było czterokrotnie więcej, z zanieczyszczeń powyżej 14 μm było szesnastokrotnie więcej w oleju w metalowej beczce względem plastikowego kanistra.
6. Wilgotność względna oleju jest ściśle uzależniona od wartości temperatury oleju. Zmiany RH możliwe są do zamodelowania regresyjnym modelem liniowym.
7. Czynniki, jakie towarzyszą w czasie pracy układu hydraulicznego z jednej strony mogą podnosić wartość lepkości kinematycznej, a z drugiej strony mogą go obniżać.
8. Mikrofiltracja oleju hydraulicznego przed badaniem lepkościowym pozwala na wyeliminowanie dwóch czynników podwyższających lepkość jak obecność zanieczyszczeń stałych i woda, która w dużym stężeniu tworzy emulsje olejowo-wodną.
9. Wyniki lepkości kinematycznej oleju bez mikrofiltracji względem oleju po mikrofiltracji są zawyżone o około 1,7 razy co nie świadczy, że olej bez mikrofiltracji utrzymuje swoje właściwości lepkościowe zgodnie z uzyskaną wartością.
10. Układ hydrauliczny z mikrofiltracją wykazał około dwukrotnie niższe wartości parametru chropowatości R_a suwaka hydraulicznego względem pomiarów na suwakach pochodzących z układu bez mikrofiltracji.
11. W układzie bez mikrofiltracji wysokość profilu H zmieniała się nieliniowo (kwadratowo) w funkcji czasu pracy układu hydraulicznego t_{pr} . W układzie z mikrofiltracją profil wysokości zmieniał się liniowo w funkcji t_{pr} .
12. Regresyjnymi modelami liniowymi możliwe jest modelowanie zmiany chropowatości powierzchni R_a dla układu bez jak i z mikrofiltracją. Głębokość wżerów (profil wysokości) można modelować zarówno funkcją kwadratową ze współczynnikiem determinacji R^2 wynoszącym 0,98 lub funkcją liniową z $R^2=0,66$.
13. Błąd względny procentowy dopasowania modelu po weryfikacji współczynników względem wyników z badań nie przekroczył 28% dla modelu chropowatości powierzchni R_{aM} i 50% dla modelu wysokości profilu H_M . Należy podkreślić, że podane wartości błędów dotyczą tylko ostatniego punktu pomiarowego tj. po 960 godzinach pracy układu hydraulicznego. W pozostałych przypadkach pomiarów błąd względny procentowy wynosi maksymalnie 24% dla R_a w układzie bez MF i 21% dla H_M również w układzie bez MF . W układach z mikrofiltracją błąd $\delta\%$ nie przekracza 10%.
14. Proces mikrofiltracji oleju powinien być prowadzony z równoległym badaniem klasy czystości oleju według normy *ISO 4406* na przenośnym analizatorze stanu oleju. Ocen wizualna wkładów filtracyjnych jest niewystarczająca, ze względu na brak informacji o klasie czystości przed jak i po badaniu.
15. Ocenę, jakości filtracji można przeprowadzić wyznaczając współczynnik filtracji, skuteczność filtracji lub dokładność filtracji. Pierwsze dwa parametry nie określają średnicy zanieczyszczenia (cząstki stałej) jak definiowane jest to w normie *ISO 4406*.
16. Nowe oleje hydrauliczne *HV 46* niezależnie od sposobu przechowywania były olejami pozaklasowymi wymagającymi przeprowadzenia mikrofiltracji przed zalaniem układu hydraulicznego.
17. Ze względu na tarcie płynne między współpracującymi elementami w parze suwak-obudowa, proces zużyciowy przebiega wolno, przez co ocenę zasadności zastosowania mikrofiltracji względem układu bez należy przeprowadzić oceną stanu powierzchni, a nie pomiarami wielkości geometrycznych.
18. W ujęciu środowiskowym mikrofiltracja wydłuża dwukrotnie okres użytkowania oleju hydraulicznego przy założeniu wymiany oleju, co 2000 mth jak w klasycznym podejściu do wymian zgodne z *DTR*. Dwukrotne wydłużenie czasu użytkowania oleju wynika

z osiągnięcia dolnej granicy lepkości kinematycznej i pogorszenia właściwości smarnych oleju.

19. Istotną korzyścią mikrofiltracji jest ograniczenie awarii kosztownych zespołów hydraulicznych. Utrzymywanie odpowiedniej czystości oleju wydłuża trwałość pomp, silników hydraulicznych, rozdzielaczy, siłowników i zaworów oraz zmniejszyć ryzyko przestojów maszyny.
20. Wydłużanie okresu użytkowania oleju musi być połączone z regularnymi badaniami jego właściwości. Szczególnie istotne jest monitorowanie klasy czystości, zawartości wody i lepkości kinematycznej po mikrofiltracji. Sama mikrofiltracja nie przywraca utraconych dodatków uszlachetniających ani pierwotnych właściwości oleju jak przy zalewaniu układu hydraulicznego nowym olejem.

9.2. Wnioski praktyczne

Przeprowadzone badania eksploatacyjne na wybranych ładowarkach oraz analizy wyników pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków praktycznych:

1. Mikrofiltracja ze względu na rozmiar porów jest pierwszą podstawową techniką w oczyszczaniu cieczy z zanieczyszczeń. W przypadku bardziej złożonych substancji w rozumieniu zanieczyszczeń, mikrofiltracja jest niewystarczająca i wymaga zastosowania kolejnych, bardziej dokładnych membran filtracyjnych jak ultrafiltracja, nanofiltracja czy odwrócona osmoza.
2. Stopień zanieczyszczenia cieczy sprawił, że jeden typ membrany filtracyjnej jest niewystarczający i konieczne jest użycie hybrydowych systemów filtracyjnych jak mikrofiltracja z ultrafiltracją, mikrofiltracja z oczyszczaniem biologicznym, elektrokoagulacja z mikrofiltracją i destylacją membranową czy np. mikrofiltracja z ultrafiltracją i odwróconą osmozą.
3. Zarówno pierwsza jak i druga koncepcja bocznikowej mikrofiltracji umożliwia utrzymanie klasy czystości oleju przez dłuższy czas pracy ładowarek jak przy klasie oleju wlewanego do zbiornika hydraulicznego.
4. Pierwsza koncepcja dodatkowej mikrofiltracji na ładowarce Terex TL80 utrzymała klasę czystości do około 500 godzin pracy na 6 klasie *NAS* i klasie *ISO 17/15/12*, jedynie zanieczyszczenia o średnicy 14 μm zwiększyły klasę o jeden do 17/15/13.
5. Druga koncepcja bocznikowej mikrofiltracji na ładowarce Merlo EWVS 35/12 dopiero po 480 godzinach pracy zwiększyła o jedną jednostkę klasę czystości *ISO* oleju z 17/15/12 na 18/16/13 tj. z 6 do 7 klasy *NAS*. Jednak należy podkreślić, że w tej ładowarce celowo nie był wykorzystywany układ elektrycznego zasilania dodatkowej pompy do mikrofiltracji po skończonej pracy ładowarki po wyłączeniu silnika elektrycznego. Zakłada się, że gdyby okresowo również uruchamiać ten układ klasa czystości utrzymana byłaby na tym samym poziomie, co w chwili oczyszczonego oleju wlanego do zbiornika hydraulicznego przed badaniami eksploatacyjnymi.
6. W ładowarce Liebherr L 566 już po 160 godzinach pracy klasa czystości wzrosła o cztery stopnie z klasy *ISO 17/15/12* na 20/18/14 tj. z 6 do 10 klasy *NAS*. Dalsza praca ładowarki spowodował wzrost klasy do 21/20/19 (po 320 h) i 23/22/20 (po 480 h), co odpowiadało 12 klasie *NAS*. Olej po 320 godzinach pracy zgodnie z normami stał się olejem pozaklasowym.
7. Analizując jeden dzień pracy ładowarki na żwirowni bez dodatkowej mikrofiltracji stwierdzono, że klasa czystości wzrosła o dwa zakresy z klasy *ISO 19/15/12* na 22/17/13 tj. z 7 do 9 klasy *NAS*. Przeprowadzenie mikrofiltracji przez 10 godzin pozwoliło na obniżenie klasy czystości oleju do 16/15/12, co odpowiadało 6 klasie *NAS*.
8. Wilgotność względna oleju hydraulicznego na dwóch ładowarkach kołowych z pierwszą i drugą koncepcją bocznikowej mikrofiltracji nie spowodowała znaczącego wzrostu *RH*

- względem oleju przed badaniami. W obu przypadkach ładowarek wilgotność względna wzrosła z 20% do 24% po 480 godzinach pracy.
9. Wilgotność względna oleju na ładowarce bez bocznikowej mikrofiltracji w kolejnych pomiarach nieliniowo wzrastała z wartości 20% do 60% po 480 godzinach pracy. W ładowarce Liebherr L 566 już po 320 godzinach pracy uzyskano wynik RH 55%, co jest wartością przekraczającą dopuszczalną wartość 50%. W tym przypadku już było zalecenie do przeprowadzenia mikrofiltracji urządzeniem przenośnym.
 10. Badanie oleju przenośnymi analizatorami do wyznaczenia klasy czystości oleju i wilgotności względnej należy bezwzględnie przeprowadzić na uspokojonym oleju bez pęcherzyków powietrza, które powstają przy powrocie oleju do zbiornika hydraulicznego z pracującego układu hydraulicznego. Analizatory stanu oleju wykorzystują układ laserowego prześwietlania przepływającej strugi oleju w celu identyfikacji zanieczyszczeń o różnych średnicach. Pęcherzyk powietrza wynikający ze spienienia oleju będzie rozpoznawany, jako zanieczyszczenie stałe.
 11. W ujęciu kosztowym pierwsza koncepcja mikrofiltracji MF 1 oleju hydraulicznego wyniosła około 2700 zł, natomiast druga koncepcja bocznikowej MF 2 to około 5400 zł. Dwukrotna wartość realizacji koncepcji drugiej wynikała z zakupu pompy łopatkowej i silnika elektrycznego.
 12. Najbardziej zalecanym sposobem postępowania z odpadowym olejem hydraulicznym jest zapobieganie jego powstawania i przygotowanie do ponownego użycia, a dopiero w dalszej kolejności recykling, odzysk energii i unieszkodliwianie.
 13. Spośród dostępnych metod przetwarzania olejów odpadowych mikrofiltracja jest rozwiązaniem najprostszym, najszybszym i stosunkowo tanim, szczególnie w przypadku olejów hydraulicznych, dla których często zapewnia wystarczający poziom czystości.
 14. Zastosowanie mikrofiltracji zwiększa koszty eksploatacyjne utrzymania układów hydraulicznych przy ich pojemnościach do 120 litrów oleju. Wynika to z zakupu i utylizacji dodatkowych wkładów filtracyjnych mimo, że ogranicza wydatki związane z zakupem nowego oleju i zagospodarowaniem oleju zużytego.
 15. Opłacalność mikrofiltracji zależy od pojemności układu hydraulicznego. W dużych układach, o pojemności około 280 litrów lub większej, może przynieść oszczędności na poziomie około 20% względem klasycznego podejścia do wymian zgodnie z DTR maszyny. Nie występują koszty zakupu oleju przy drugiej wymianie oleju przy zwiększonych kosztach utylizacji filtrów olejowych.

9.3. Propozycja kierunków dalszych badań

Kierunki dalszych prac w zakresie mikrofiltracji olejów hydraulicznych są następujące:

1. Przeprowadzenie kilkuletnich badań intensywności zużycia głównych zespołów hydraulicznych do ich uszkodzenia pracujących w instalacji z oraz bez mikrofiltracji.
2. Analiza literaturowa w zakresie dodatków poprawiającymi lepkość oleju o większej odporności na ścinanie, które można dodawać w trakcie użytkowania oleju hydraulicznego. Wnioski z tych prac pozwolą na opracowanie metodyki mieszania oleju z modyfikatorami w celu poprawy właściwości lepkościowych oleju w warunkach eksploatacyjnych.
3. Wykonanie badań weryfikacyjnych określających graniczny przebieg oleju wyrażony w motogodzinach na maszynach budowlanych i drogowych do osiągnięcia dolnej granicy lepkości kinematycznej oleju. W ramach tych prac prowadzonych w warunkach eksploatacyjnych wskazane jest zdefiniowanie czynników przyspieszających spadek lepkości oleju na maszynach pracujących na otwartej przestrzeni.

LITERATURA

- [1] Abd Ali NS, Joni HH, Al-Rubaei RHA. Effect of asphalt modified with waste engine oil on the durability properties of hot asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Open Engineering* 2024; 14(1): 20220529-1–20220529-17. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0529>
- [2] Abd Ali NS, Joni HH, Al-Rubaei RHA. Evaluation of reclaimed asphalt mixtures rejuvenated with waste engine oil to resist rutting deformation. *Open Engineering* 2024; 14(1): 20220555-1–20220555-17. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0555>
- [3] Abdel-Shafy HI, Mansour MSM, El-Toony MM. Integrated treatment for oil free petroleum produced water using novel resin composite followed by microfiltration. *Separation and Purification Technology* 2020; 234: 116058. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116058>
- [4] Ainscough TJ, Alagappan P, Oatley-Radcliffe DL, Barron AR. A hybrid super hydrophilic ceramic membrane and carbon nanotube adsorption process for clean water production and heavy metal removal and recovery in remote locations, *J. Water Process. Eng.* 2017; 19: 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.006>
- [5] Aircraft Accident Report: Loss of Control and Impact with Pacific Ocean Alaska Airlines Flight 261 McDonnell Douglas MD-83, N963AS About 2.7 Miles North of Anacapa Island, California January 31, 2000. NTSB/AAR-0201: 1-250. <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAR0201.pdf>
- [6] Ali S, Rehman SAU, Luan HY, Farid MU, Huang H. Challenges and opportunities in functional carbon nanotubes for membrane-based water treatment and desalination, *Sci. Total Environ.* 646 (2019) 1126–1139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.348>
- [7] Argo-Hytos, Zarządzanie cieczami i monitoring stanu oleju. Poradnik techniczny. Sposób na czysty olej: 1-15. https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/downloads/Polish/Technical_Handbook_PL.pdf (04.08.2026 r.)
- [8] Argo-Hytos, OCom Portable Oil Lab PPCO 300-1000. Poradnik techniczny 1-46. https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Manual_OCom_Portable_Oil_Lab_100.60_PL_0824.pdf (09.02.2026 r.)
- [9] Arunagiri V, Prasannan A, Udomsin J, Lai J, Wang C, Hong P, Tsai H. Facile fabrication of eco-friendly polycaprolactone (PCL)/Poly-D, L-Lactic acid (PDLLA) modified melamine sorbent for oil-spill cleaning and water/oil (W/O) emulsion separation. *Separation and Purification Technology*. 2021; 259: 118081. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118081>
- [10] Baczewski K, Szczawiński P. Investigation of the process of ageing of hydraulic oil during its use. *The Archives of Automotive Engineering*. 2016; 73(3): 5-18. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL73.ART1>
- [11] Baczewski K, Hebda M. Filtracja płynów eksploatacyjnych tom 1. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Radom 1992.
- [12] Baczewski K, Hebda M. Filtracja płynów eksploatacyjnych tom 2. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Radom 1992.
- [13] Barati R, Liang JT. A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells, *Journal of Applied Polymer Science* 2014; 131(16): 1-11. <https://doi.org/10.1002/app.40735>

- [14] Bhawe R, Kuritz T, Powell L, Adcock D. Membrane-based energy efficient dewatering of microalgae in biofuels production and recovery of value added co-products. *Environ Sci Technol* 2025; 46(10): 5599-5606. <https://doi.org/10.1021/es204107d>
- [15] Brodny J. Modelowanie tarcia w układach mechanicznych. *Górnictwo i geologia* 2010; 5(2): 7-17.
- [16] Cantley RE. The Effect of Water in Lubricating Oil on Bearing Fatigue Life. *ASLE Transactions, American Society of Lubrication Engineers* 1977; 20(3): 244-248.
- [17] Chang Q, Zhou J, Wang Y, Liang J, Zhang X, Cerneaux S, Wang X, Zhu Z, Dong Y. Application of ceramic microfiltration membrane modified by nano-TiO₂ coating in separation of a stable oil-in-water emulsion. *Journal of Membrane Science* 2014; 456: 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.01.029>
- [18] Cheryan M, Rajagopalan N. Membrane processing of oily streams: wastewater treatment and waste reduction, *J. Membr. Sci.* 1998; 151: 13-28. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00190-2](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00190-2)
- [19] Chomik Z. Ekologiczne aspekty serwisowania maszyn rolniczych. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*. 2018; 6: 14-18.
- [20] Daneluz J, Ferreira da Silva G, Duarte J, Turossi TC, Santos V, Baldasso C, Daneluz AC. Characterization of microfiltration and ultrafiltration membranes for application in kombucha filtration. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2023; 126: 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.06.015>
- [21] Danfoss. Technical Information, Hydraulic Fluids and Lubricants Oils, Lubricants, Grease, Jelly. July 2016: 1-44. <https://assets.danfoss.com/documents/latest/54030/BC152886484524en-000902.pdf> (10.05.2026 r.)
- [22] Das B, Chakrabarty B, Barkakati P. Preparation and characterization of novel ceramic membranes for micro-filtration applications. *Ceram. Int.* 2016; 42: 14326-14333. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.125>
- [23] Day M, Bauer Ch. Water Contamination in Hydraulic and Lube Systems. *Machinery Lubrication*. <https://www.machinerylubrication.com/Read/1084/water-contamination-lube> (04.08.2026 r.)
- [24] Department of Energy, Mines, Industry Regulation and Safety. Hydraulic fluid contamination resulting in uncontrolled movement: elevating work platforms. *Health and Safety Bulletin No. 15, 1 march 2024*. https://www.worksafe.wa.gov.au/system/files/migrated/sites/default/files/atoms/files/hs_b_15_ewp_hydraulic_fluid_contaminaton.pdf?utm_source (03.08.2026 r.)
- [25] Dokumentacja Systemu Utrzymania. Pojazd szynowo-drogowy. Podwozie: Volvo FMX D13 420 8×4. Żuraw: Palfinger PK 29002 E Railway. *STAR SAN DUO* 2025: 54-55.
- [26] Duda S. Modelowanie i symulacja numeryczna zjawisk dynamicznych w elektrycznych pojazdach szynowych. *Monografia Wydawnictwa Politechniki Śląskiej* 2012.
- [27] Duque-Sarmiento DS, Baño-Morales DA. Assessment of Hydraulic Oil Properties during Operation of a Mini Loader. *Lubricants* 2024; 12(9): 320. <https://doi.org/10.3390/lubricants12090320>
- [28] Field RW, Wu D, Howell JA, Gupta,BB. Critical flux concept for microfiltration fouling. *J. Membr. Sci.* 1995; 100: 259–272. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00265-Z](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00265-Z)
- [29] Filipponi A, Masi G, Matos M, Benito JM, Gutiérrez G, Bignozzi MC. Development of metakaolin-based geopolymeric asymmetric membrane for oil-in-water emulsion microfiltration. *Ceramics International* 2024; 50: 21107-21117. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.220>

- [30] Filipponi A, Masi G, Bandini S, Bignozzi MC. Preparation and characterization of metakaolin-based geopolymer membrane supports by facile pressed one-part route. *Ceram. Int.* 2023; 49: 6834–6842. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.233>
- [31] Frysztacka S. Filtracja oleju, *Główny Mechanik*. 2018:40-44.
- [32] Gajek L, Kałuska M. Wnioskowanie statystyczne – modele i metody. WNT, Warszawa, 2000.
- [33] Gao Y, Xu G, Zhao P, Liu L, Zhang E. One step co-sintering synthesis of gradient ceramic microfiltration membrane with mullite/alumina whisker bi-layer for high permeability oil-in-water emulsion treatment. *Separation and Purification Technology* 2023; 305: 122400. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122400>
- [34] Garcia Lesak GV, Xavier LA, Valadares de Oliveira T, Fontana F, Santos AF, Cardoso VL, Vieira RB. Enhancement of pozzolanic clay ceramic membrane properties by niobium pentoxide and titanium dioxide addition: Characterization and application in oil-in-water emulsion microfiltration. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2022; 217: 110892. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110892>
- [35] GREISINGER, Digital Quick-Response Thermometer GTH 1170. Operating Manual. GHM Messtechnik GmbH, Standort Greisinger: 1-6. https://www.greisinger.de/files/upload/en/produkte/bda/GTH1170_EN.pdf (06.12.2025 r.)
- [36] Gul A, Hruza J, Yalcinkaya F. Fouling and Chemical Cleaning of Microfiltration Membranes: A Mini-Review. *Polymers* 2021; 13(6), 846: 1-24. <https://doi.org/10.3390/polym13060846>
- [37] Hamdi A, Mahi D, Boudraa S. Study of kinematic viscosity of mixture oils under thermal aging in power transformer. *Electrical Engineering* 2018; 100: 2373-2381. <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0709-5>
- [38] Hebda M, Wachal A. Trybologia. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1980.
- [39] Hu J, Meng W, Su Y, Qian C, Fu W. Emerging technologies for advancing microalgal photosynthesis and metabolism toward sustainable production. *Frontiers in Marine Science* 2023; 10: 1260709. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1260709>
- [40] Hussain AJ, Al-Khafaji ZS, Al Saffar IQ. New recycling method of lubricant oil and the effect on the viscosity and viscous shear as an environmentally friendly. *Open Engineering* 2024; 14(1): 20220521-1–20220521-10. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0521>
- [41] ISO 6743-99:2002 - Lubricants, industrial oils and related products (class L) - Classification - Part 99: General.
- [42] ISO 3448:1992 - Industrial liquid lubricants - ISO viscosity classification.
- [43] ISO 11158:2023 - Lubricants, industrial oils and related products (class L) - Family H (hydraulic systems) - Specifications for categories HH, HL, HM, HV and HG.
- [44] Janocha A. Separacja siarkowodoru z gazu ziemnego w kaskadowych układach technologii membranowej. *Nafta-Gaz* 2020; 12: 935-943. <https://doi.org/10.18668/NG.2020.12.07>
- [45] Jasiński R. Ocena zdolności hydraulicznych zespołów sterujących uruchamianych w niskich temperaturach otoczenia. *Diagnostyka* 2008; 2(46): 189-194.
- [46] Jebur M, Chiao YH, Kupaaiekekaiao T, Patra T, Cao Y, Lee K, Gleason N, Qian, X, Hu Y, Malmali M, Wickramasinghe SR. Combined electrocoagulation-microfiltration-membrane distillation for treatment of hydraulic fracturing produced water. *Desalination* 2021; 500: 114886. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114886>
- [47] Jensen CC. Clean Oil Guide. The importance of oil maintenance 2019: 1-48. https://www.cjc.dk/fileadmin/root/File_Admin_Filter/doc_Brochures/Clean_Oil_Guide.pdf (23.04.2026 r.)

- [48] Kadziński A. Niezawodność pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1992.
- [49] Karl H, Bots S. Humidity Saturation Limits of Hydraulic and Lubrication Fluids. <https://www.machinerylubrication.com/Read/28697/humidity-saturation-limits?utm> (20.03.2026 r.)
- [50] Kaźmierczak E. Badanie parametrów przepływu oleju pompy ciągnika CLAAS ARION 610. Rail Vehicles. 2020;2:48-54. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138551>
- [51] Khudoyarova O, Ranskiy A, Korinenko B, Gordienko B, Sydoruk T, Didenko N, Kryklyvyi R. Integration of technological cycles of industrial waste processing. Journal of Ecological Engineering 2021; 22(6): 209–214. <https://doi.org/10.12911/22998993/137821>
- [52] Kim DY, Lee J, Park H, Park SJ, Lee JH. Ecofriendly hydrophilic modification of microfiltration membranes using pyrogallol/ε-polylysine. Separation and Purification Technology 2024; 350: 127988. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127988>
- [53] Klasyfikacja środków smarnych. W: Przemysłowe środki smarne. Poradnik. Warszawa: TOTAL Polska Sp. z o.o. 2003. Rozdz. III. <https://dxm.content-center.totalenergies.com/api/wedia/dam/variation/xysh7dg731tahrqwq5fd9w5mww/original%2Cdefault> (04.08.2026 r.)
- [54] Klasyfikacja środków smarnych. W: Ciecze do układów hydraulicznych. Poradnik. Warszawa: TOTAL Polska Sp. z o.o.; 2003. Rozdz. XI. https://dxm.content-center.totalenergies.com/api/wedia/dam/variation/xysh7dg731tahcsbonmosezfyh/original%2Cdefault?utm_source (25.06.2026 r.)
- [55] Koleżyński A, Król M, Żychowicz M. The structure of geopolymers – Theoretical studies. Journal of Molecular Structure 2018; 1162: 456-471. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.03.033>
- [56] Kołodziejski S, Sawczuk W. Budowa układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego z zanieczyszczeń. Rozdział w monografii naukowej pt. Współczesne wyzwania transportu i elektrotechniki. T. 4. Monografia pod redakcją Tomasza Ciszewskiego i Jerzego Wojciechowskiego: 181-188, ISSN 1642-5278.
- [57] Kołodziejski S, Bartkowiak A, Sawczuk W. The concept of microfiltration of hydraulic oil in rail vehicles. Rail Vehicles 2024; 1-2: 3-10. <https://doi.org/10.53502/RAIL-192525>
- [58] Kołodziejski S, Sawczuk W. Methodology for diagnosing hydraulic oil in production machines with the additional use of microfiltration. Open Engineering 2025; 15(1): 20250115-1-20250115-11. <https://doi.org/10.1515/eng-2025-0115>
- [59] Kołodziejski S, Sawczuk W, Jüngst M. Test verification of the condition of hydraulic oil of construction machines following the guidelines of ISO 4406 and NAS 1638. Diagnostyka 2025; 26(3): 3-8. <https://doi.org/10.29354/diag/208882>
- [60] Kostencki P. Intensywność zużycia stali pracującym w pyłe zwykłym, wyznaczona w warunkach polowych. Inżynieria Rolnicza 2009; 1(110): 139-146.
- [61] Krywicki W, Włodarski L. Analiza matematyczna w zadaniach, Wydawnictwo PWN, Warszawa, 2007.
- [62] Kubacki Ł. Kleenoil Preston Group. Mikrofiltracja oleju hydraulicznego, prezentacja szkoleniowa: 1-60.
- [63] Kumar R, Ismail AF. Fouling control on microfiltration/ultrafiltration membranes: Effects of morphology, hydrophilicity, and charge. Applied Polymer Science 2015; 132: 42042-42062. <https://doi.org/10.1002/app.42042>
- [64] Küçük S, Hejase CA, Kolesnyk IS, Chew JW, Tarabara VV. Microfiltration of saline crude oil emulsions: Effects of dispersant and salinity. Journal of Hazardous Materials 2021; 412: 124747. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124747>

- [65] Li H, Zhang B, Hong X, Wu Y, Wang T. Optimizing the microstructure and properties of microfiltration carbon membranes enabled with PAN fibers for emulsified oil removal from wastewater. *Chemical Engineering Research and Design* 2022; 184: 566-576. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.06.035>
- [65] Li H, Zhang B, Hong X, Wu Y, Wang T. Optimizing the microstructure and properties of microfiltration carbon membranes enabled with PAN fibers for emulsified oil removal from wastewater. *Chemical Engineering Research and Design* 2022; 184: 566-576. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.06.035>
- [66] Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH, L 566 2plus2 Wheel Loader. Operation and Maintenance Manual, Type 460, Serial No. from 11780, nr dok. LBH/07/003801/0003/8.07/en, Bischofshofen: Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH, 2007.
- [67] Lin YM, Rutledge GC. Separation of oil-in-water emulsions stabilized by different types of surfactants using electrospun fiber membranes. *J. Membr. Sci.* 2018; 563: 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.063>
- [68] Liu Z, Liu X, Wu H, Tang R, Wei D. Oil Film Characteristic Evolution and Hydrostatic-to-Hydrodynamic Dominance Transition Prediction Under Starved Lubrication with Thermo-Viscous Coupling. *Lubricants* 2026; 14(8): 294. <https://doi.org/10.3390/lubricants14080294>
- [69] Liu S, Rouquié C, Frappart M, Szymczyk A, Rabiller-Baudry M, Couallier E. Separation of lipids and proteins from clarified microalgae lysate. *Separation and Purification Technology* 2024; 328: 124985. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124985>
- [70] Marciniak Z. Układy napędowe lekkich pojazdów szynowych z wykorzystaniem urządzeń hydrostatycznych. *Technical Transactions Mechanics 2-M* 2011; 4(108): 81-90.
- [71] Marciniak Z. Wykorzystanie urządzeń hydrostatycznych w układach napędowych spalinowych pojazdów trakcyjnych typu autobus szynowy. *Pojazdy Szynowe* 2012; 2: 29-34. <https://www.pall.com/en/solutions/water-content.html> (04.08.2026 r.)
- [72] Matsuura T, Rana D, Qtaishat MR, Singh G. Desalination and Water Resources: Membrane Processes. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)* 2013; 3: 330-381. <https://doi.org/10.1201/b18319-5>
- [73] Measuring Water Content as Percent of Saturation. Pall Corporation.
- [74] MERLO S.p.A., Panoramic 35.12 K – Model P 35.12 K, dokumentacja techniczna producenta, MERLO S.p.A. Industria Metalmeccanica, S. Defendente di Cervasca (CN), Włochy.
- [75] Nandi BK, Uppaluri R, Purkait MK. Microfiltration of stable oil-in-water emulsions using kaolinbased ceramic membrane and evaluation of fouling mechanism. *Desalination and Water Treatment* 2010; 1-3(22): 133-145. <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1658>
- [76] National Transportation Safety Board. Diesel Generator Engine Failure aboard Passenger Vessel Ocean Navigator. April 2, 2025, MIR-25-13: 1-19. https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/MIR2513.pdf?utm_source=chatgpt.com (11.07.2026 r.)
- [77] Ng F, Harding JA, Glass J. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2017; 83: 176-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.006>
- [78] Nieśpiałowski K, Kaczmarczyk K. Mechaniczny i hydrostatyczny układ przeniesienia napędu spalinowych lokomotyw dołowych. *Maszyny Górnicze* 2016; 4: 71-83.

- [79] Olbromski D, Olej hydrauliczny HL 46 czy HV 46 - różnice i zastosowania. Poradnik i konserwacja maszyn. <https://kleenoilpolska.pl/olej-hydrauliczny-hl-46-czy-hv-46-roznice-i-zastosowania?utm> (26.07.2026 r.)
- [80] Parker Portable Particle Monitor – iCountOS. <https://ph.parker.com/pl/en/product-list/icount-os-portable-condition-monitoring-for-oil-and-fuel-systems> (04.08.2026 r.)
- [81] Peng H, Tremblay AY, Veinot DE. The use of backflushed coalescing microfiltration as a pretreatment for the ultrafiltration of bilge water. *Desalination* 2005; 181: 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.12.040>
- [82] Polak D, Kucharska K, Szwaś M. Membrany polipropylenowe modyfikowane kopolimerem PEBA w filtracji ścieków z pralni przemysłowych. *Inż. Ap. Chem.* 2017; 56(3): 100-101.
- [83] Poli A, Dagher G, Santos AF, Baldoni-Andrey P, Jacob M, Batiot-Dupeyrat C, Teychené B. Impact of C-CVD synthesis conditions on the hydraulic and electronic properties of SiC/CNTs nanocomposite microfiltration membranes. *Diamond and Related Materials* 2021; 120: 108611. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108611>
- [84] Pouzar M, Černohorský T, Krejčová A. Determination of metals in lubricating oils by X-ray fluorescence spectrometry. *Talanta* 2001; 54(5): 829-835. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(01\)00338-1](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(01)00338-1)
- [85] Purnima M, Paul T, Pakshirajan K, Pugazhenth G. Onshore oilfield produced water treatment by hybrid microfiltration-biological process using kaolin based ceramic membrane and oleaginous *Rhodococcus opacus*. *Chemical Engineering Journal* 2023; 453(2): 139850. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139850>
- [86] Putri, RW, Rahmatullah R, Santoso B, Savitri A, Zahara M. Effect of drying temperature of sawdust biobriquettes with used lubricant oil adhesive volume variation over carbonization process. *Journal of Ecological Engineering* 2024; 25(2): 309-320. <https://doi.org/10.12911/22998993/174964>
- [87] Pyszny P. Klasyfikacja olejów przemysłowych: lepkość i normy jakościowe jako klucz do niezawodności. *Ecol*, 2025. <https://ecol.eu/baza-wiedzy/klasyfikacja-olejow-przemyslowych-lepkosc-i-normy-jakosciowe/?utm> (01.08.2026 r.)
- [88] Rabiej M. Analizy statystyczne z programami Statistica i Excel. Wydawnictwo Heliot 2018.
- [89] Rana D, Matsuura T, Kassim MA, Ismail AF. Second Edition 2015, Ch. 3: 35-52. <https://doi.org/10.1201/9781420009484>
- [90] Rana D, Matsuura T, Sourirajan S. *Engineering Properties of Foods*. Forth Edition 2014, Ch. 12: 437-525, ISBN 9780429114199.
- [91] Relative humidity at defined temperature and water saturation curve. Test methods and equipment in our OELCHECK laboratory. <https://en.oelcheck.com/wiki/relative-humidity-at-defined-temperature/> (04.08.2026 r.)
- [92] Rouquié C, Szymczyk A, Rabiller-Baudry M, Roberge H, Abellan P, Riaublanc A, Frappart M, Álvarez-Blanco S, Couallier E. NaCl precleaning of microfiltration membranes fouled with oil-in-water emulsions: Impact on fouling dislodgment. *Separation and Purification Technology* 2022; 285: 120353. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120353>
- [93] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. z 2020 r. poz. 10).
- [94] Sandhya Rani SL, Kumar RV. Insights on applications of low-cost ceramic membranes in wastewater treatment: a mini-review, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 2021; 4: 100149. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100149>

- [95] Sawczuk W, Kołodziejski S. Microfiltration of industrial oils as a method for reducing the amount of waste oils. *Journal of Ecological Engineering* 2026; 27(8): 44-54. <https://doi.org/10.12911/22998993/219341>
- [96] Sawczuk W, Kołodziejski S, Bartkowiak A, Kubacki Ł. Microfiltration of oils in combustion engines in drive and hydraulic systems – research and review of solution. *Combustion Engines* 2025. <https://doi.org/10.19206/CE-208770>
- [97] Shell Tellus S2 VX 46. Karta charakterystyki oleju hydraulicznego 2016 v 4.4: 1-3.
- [98] Shubber MD, Kebria DY. Thermal recycling of bentonite waste as a novel and a low-cost adsorbent for heavy metals removal. *Journal of Ecological Engineering* 2023; 24(5): 288-305. <https://doi.org/10.12911/22998993/161805>
- [99] Skibińska A, Barglik E, Krasodowski W, Żółty M, Biernat K. Thermoxidation Stability of Gear Oils for Electric Vehicles. *Lubricants* 2025; 13(8): 337. <https://doi.org/10.3390/lubricants13080337>
- [100] Stanciu I. Some Methods for Determining the Viscosity Index of Hydraulic Oil. *Indian Journal of Science and Technology* 2023; 16(4): 254-256. <https://doi.org/10.17485/IJST/v16i4.1461>
- [101] Starczewski L. Wodorowe zużywanie ciernych elementów maszyn, Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej, Sulejówek 2002: 41-46.
- [102] strona internetowa: <https://filtertech.com.pl/filtracja-membranowa-przeplywu-krzyzowego-cmf/> (02.08.2026 r.)
- [103] strona internetowa: <https://kleenoil.net/?utm> (02.08.2026 r.)
- [104] strona internetowa: <https://www.oilsampling.co.uk/store/1878-Heavy-Duty-Filter-Cartridge-p172850134> (04.08.2026 r.)
- [105] strona internetowa: <https://filtracjaoleju.pl/produkt/wklad-filtracyjny-sdfc-ad2/> (04.08.2026 r.)
- [106] strona internetowa: <https://www.hydrolet.pl/warto-wiedziec/> (04.08.2026 r.)
- [107] strona internetowa: <https://www.hydac.com.au/news/post/water-in-operating-fluids.html> (05.08.2026 r.)
- [108] strona internetowa: <https://www.avanalubricant.com/product/hv46-hydraulic-oil-uae> (05.08.2026 r.)
- [109] strona internetowa: <https://fsv.bci.tu-dortmund.de/equipment/processing-technologies/coating-device-for-liquid-chocolate-3-1-1-3/> (04.08.2026 r.)
- [110] strona internetowa: https://www.hydro.com.pl/materialy/_upload/Karty_katalogowe/Technika_filtracyjna/Serwisowanie_i_diagnostyka_oleju/Agregaty_filtracyjne/WATER_REMOVAL_EN.pdf (04.08.2026 r.)
- [111] strona internetowa: <https://otooleje.pl/produkt/olej-hydrauliczny-hl-32-20l/> (04.08.2026 r.)
- [112] strona internetowa: <https://www.eoleje.pl/olej-hydrauliczny-hv-46-opak-200-l?srsId=AfmBOopE9bMO0cSO3ImPuK6HET3-8fMJ3LWb6vhqmL6Zv5T52bCssq1t> (04.08.2026 r.)
- [113] strona internetowa: <https://allegro.pl/listing?string=olej%20hydrauliczny%20hv%2046%201000&srsId=AfmBOoqCmNFfsrBrCvhKFFBaorpxAJfIG5EeDRnOh9436owH6Pr3MFy> (04.08.2026 r.)
- [114] strona internetowa:

- https://www.stu-tanktechnik.de/fahrbare-pneumatische-oelanlage-oelabgabegeraet-fuer-200l-fass-a-481?srsId=AfmBOortyaXPH6omx8XgXkIvBaEVFIEE1Mp9_FHFST5ZBU-K-W3cR1mz (04.08.2026 r.)
- [115] strona internetowa:
<https://pl.dreamstime.com/fotografia-royalty-free-magazynowy-chemiczny-magazyn-image38541717> (08.08.2026 r.)
- [116] strona internetowa:
<https://tvn24.pl/wroclaw/milkowice-beczki-z-olejem-silnikowym-zuzyte-filtry-i-uszczelki-nasaczone-szmaty-plaga-nielegalnych-odpadow-st6850573> (02.08.2026 r.)
- [117] strona internetowa:
<https://odpady.org/odbior-przepracowanych-olejow-kody-bdo-i-odbior/> (02.08.2026 r.)
- [118] strona internetowa:
<https://www.stenarecykling.com> (06.08.2026 r.)
- [119] strona internetowa:
<https://fach-pak.com/en/produkty/kontenery-ibc/standard-na-wode-pitna-i-produkty-spozywcze/kontener-ibc-standard-1000-l?> (08.08.2026 r.)
- [120] strona internetowa:
<https://alfatech.com.pl/produkt/defelsko-positector-spg/> (09.08.2026 r.)
- [121] strona internetowa:
<https://www.prima-filtertehnika.si/nekategorizirano/filter-za-olje/> (09.08.2026 r.)
- [122] Studenckie Laboratorium Podstaw Fizyki. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. <https://labor.zut.edu.pl/?id=11694> (09.08.2026 r.)
- [123] Su R, Cao W, Jin Z, Wang Y, Ding L, Maqsood M, Wang D. Deterioration Mechanism and Status Prediction of Hydrocarbon Lubricants under High Temperatures and Humid Environments. *Lubricants* 2024; 12(4): 116. <https://doi.org/10.3390/lubricants12040116>
- [124] Suresh K, Pugazhenth G, Uppaluri R. Fly ash based ceramic microfiltration membranes for oil-water emulsion treatment: Parametric optimization using response surface methodology. *Journal of Water Process Engineering* 2016; 13: 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.07.008>
- [125] Szuba S. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2004: 21-23.
- [126] Szymański G.M. Zagadnienia diagnostyki silników spalinowych z wykorzystaniem drgań rezonansowych. Rozprawa nr 500, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013: 88-89.
- [127] TEREX TL80 AS. Instrukcja eksploatacji ładowarki kołowej. Wydanie 2010-01.
- [128] The Swedish Club: Monthly Safety Scenario. Contaminated lube oil caused engine damage. August 2024: 1-2. <https://www.swedishclub.com/news/member-alert/mss-case-august-contaminated-lube-oil-caused-engine-damage/> (03.08.2026 r.)
- [129] Tummons EN, Tarabara VV, Chew JW, Fane AG. Behavior of oil droplets at the membrane surface during crossflow microfiltration of oil–water emulsions. *Journal of Membrane Science* 2016; 500: 211-224. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.005>
- [130] Wang Z. Chapter 3 – Microfiltration. *Fundamentals of Membrane Separation Technology* 2014: 55-124.
- [131] Wanke D, da Silva A, Costa C. Modification of PVDF hydrophobic microfiltration membrane with a layer of electrospun fibers of PVP-co-PMMA: Increased fouling resistance. *Chemical Engineering Research and Design* 2021; 171: 268-276. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.05.004>

- [132] Wu J, Meeten GH, Jones TGJ, Cagney N, Boek ES. Membrane fouling during the harvesting of microalgae using static microfiltration. *Separation and Purification Technology* 2025; 353: 127737. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127737>
- [133] Xaviera LA, Garcia Lesaka GV, Valadares de Oliveira T, Eiras D, Pedersen Voll FA, Vieira RB. Ceramic membrane applied to seawater pre-treatment: effect of flocculation and temperature on microfiltration. *Desalination and Water Treatment* 2023; 310: 43-49. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29929>
- [134] Yao Y, Zhang B, Jiang M, Hong X, Wu Y, Wang T, Qiu J. Ultra-selective microfiltration SiO₂/carbon membranes for emulsified oil-water separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2022; 10: 107848. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107848>
- [135] Zelenko Y, Bezovska M, Kuznetsov V, Muntian A. Technological and ecological aspects of disposal of spent cutting fluids. *Journal of Ecological Engineering* 2021; 22(4): 207-212. <https://doi.org/10.12911/22998993/134080>
- [136] Zhang N, Yang X, Wang Y, Qi Y, Zhang Y, Luo J, Cui P, Jiang W. A review on oil/water emulsion separation membrane material. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022; 10: 107257. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107257>
- [137] Zhou X, Li L, Wang J, Zou R, Su T, Zhang Y. Influence of Inner Diameter and Pleat Number on Oil Filter Performance. *Processes* 2026; 14(3), 426: 1-22. <https://doi.org/10.3390/pr14030426>

ZAŁĄCZNIK A

Dokumentacja techniczna dodatkowego zewnętrznego układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego

Spis treści

1. Przeznaczenie układu *MF 1* i *MF 2*
2. Dane techniczne *MF 1* i *MF 2*
3. Budowa i zasada działania
4. Transport, składowanie i instalacja
5. Bezpieczeństwo i niedozwolone użytkowanie
6. Uruchomienie i praca instalacji do mikrofiltracji
7. Dobór czasu filtracji i ocena efektu
8. Obsługa filtra magnetycznego *MM5*
9. Konserwacja i wymiana wkładów
10. Diagnostyka i usuwanie usterek
11. Postępowanie awaryjne i gospodarka odpadami
12. Części eksploatacyjne

A.1. Przeznaczenie układu MF 1 i MF 2

Układ *MF 1* i *MF 2* jest zespołem do mikrofiltracji boczniowej oleju hydraulicznego, możliwym do zabudowania na dowolnej maszynie budowlanej lub drogowej z hydrostatyczną instalacją hydrauliczną. Wersja *MF 1* posiada jeden zasobnik filtracyjny, natomiast wersja *MF 2* wyposażona jest w dwa wkłady filtracyjne i dodatkowe zasilanie z silnika elektrycznego 230 V AC.

Układy do mikrofiltracji mogą pracować przy recyrkulacji cieczy w tym samym zbiorniku albo przy przepompowywaniu do zbiornika czystego. Podstawowy zakres zastosowań obejmuje środki smarne, oleje przemysłowe i produkty pokrewne wg ISO 6743/99, a także olej napędowy, w tym biodiesel. Inne media wymagają uzgodnienia z producentem lub dostawcą wkładów filtracyjnych.

System boczniowy *by-pass* jest przeznaczony m.in. do olejów hydraulicznych i przekładniowych oraz do oczyszczania zbiorników i instalacji przemysłowych. Filtracja odbywa się z niewielkim przepływem, dzięki czemu możliwe jest usuwanie bardzo drobnych cząstek i wody bez skomplikowanej ingerencji w istniejący układ.

A.2. Dane techniczne układu MF 1 i MF 2

Podstawowe dane techniczne układu *MF 1* i *MF 2* przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Dane techniczne układu MF 1 i MF 2

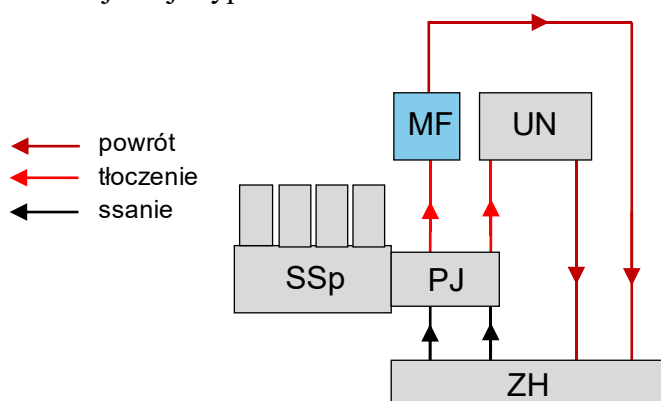
Lp.	Parametr	Wartość lub informacja
1	Konfiguracja MF 1 lub MF 2	Jeden lub dwa wkłady filtracyjne do mikrofiltracji oleju hydraulicznego.
2	Wydajność układu MF 1 i MF 2	ok. 400 l/h dla <i>MF 1</i> i ok. 600 l/h dla <i>MF 2</i> przy filtracji oleju hydraulicznego o lepkości kinematycznej 46 mm ² /s, nowych wkładów i temperatury pokojowej.
3	Dokładność filtracji	Do 1 µm, w <i>DTR</i> zalecana jest klasa ISO 17/15/12 oraz odpowiednik klasy 6 wg NAS 1638.
4	Zdolność pochłaniania wody	ok. 1,2 litra na każdy wkład filtracyjny.
5	Typowy zakres ciśnienia pracy zespołu	Od 0,5 do 6 bar, w zależności od temperatury, lepkości i zanieczyszczenia cieczy.
6	Zabezpieczenie ciśnieniowe	Presostat w instrukcji <i>MF 2</i> , nie dopuszczać do przekroczenia 75 psi.
7	Zasilanie	Zależnie od konfiguracji, w układzie <i>MF 1</i> i <i>MF 2</i> zasilanie z pompy hydraulicznej jazdy, w układzie <i>MF 2</i> dodatkowe zasilanie z silnika elektrycznego 230 V AC.
8	Stopień ochrony wyposażenia elektrycznego	IP55
Opcjonalnie montaż dodatkowego filtra magnetycznego <i>MM5</i>		
9	MM5 - pojemność zanieczyszczeń	do ok. 1 kg zanieczyszczeń.
10	MM5 - ciśnienie robocze	od 10 bar do 12 bar (170 psi) przy maks. 50°C. Do eksploatacji przyjąć niższą wartość 10 bar, o ile tabliczka znamionowa konkretnego filtra nie stanowi inaczej.

A.3. Budowa i zasada działania

Pompa z instalacji hydrostatycznej maszyny lub pojazdu zasysa ciecz ze zbiornika i kieruje ją do zespołu filtracyjnego (zasobnika). Ciecz wpływa do jednego lub dwóch wkładów, przechodzi przez centralną tuleję, a następnie pod działaniem ciśnienia przepływa przez gęsty materiał filtracyjny z impregnowanej celulozy. Wkład zatrzymuje cząstki stałe oraz wolną lub zemulgowaną wodę. Oczyszczony olej wraca do zbiornika lub jest kierowany do zbiornika czystego.

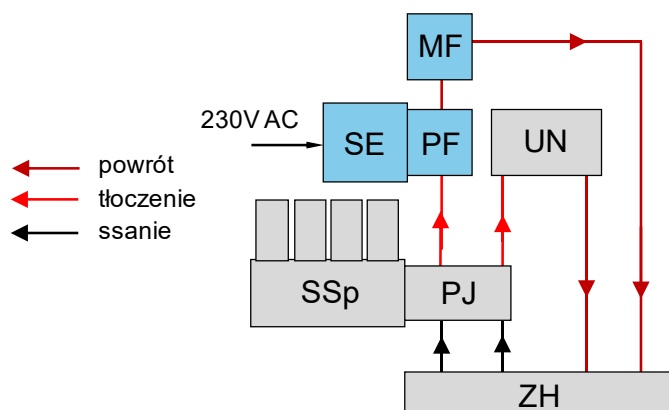
W przypadku montażu dodatkowego filtra *MM5* (opcjonalnie) wykorzystuje się centralny rdzeń z silnym materiałem magnetycznym z ziem rzadkich. Ciecz jest rozprowadzana kanałami, opływa rdzeń, a cząstki magnetyczne są wychwytywane na jego powierzchni. Konstrukcja przewidziana jest na zgromadzone zanieczyszczenia bez całkowitego blokowania przepływu.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy zasilania dodatkowego obwodu hydraulicznego do mikrofiltracji oleju typu *MF 1*.



Rys. 1. Schemat układu bocznej mikrofiltracji oleju hydraulicznego I koncepcji: *SSp*-silnik spalinowy, *PJ*-pompa jazdy, *ZH*-zbiornik hydrauliczny, *UN*-układ napędowy (silniki hydrostatyczne), *MF*-zasobnik do mikrofiltracji

Natomiast na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy drugiego układu do mikrofiltracji oleju hydraulicznego *MF 2* z zasilaniem z silnika elektrycznego.



Rys. 2. Schemat układu bocznej mikrofiltracji oleju hydraulicznego II koncepcji: *SSp*-silnik spalinowy, *PJ*-pompa jazdy, *ZH*-zbiornik hydrauliczny, *UN*-układ napędowy (silniki hydrostatyczne), *MF*-zasobnik do mikrofiltracji, *PF*-dodatkowa pompa do mikrofiltracji, *SE*-silnik elektryczny

W tabeli 2 i 3 przedstawiono wykaz części do budowy bocznej mikrofiltracji oleju hydraulicznego według założenia układu *MF 1* i *MF 2*.

Tab. 2. Wykaz elementów do mikrofiltracji oleju w układzie MF 1

Lp.	Nazwa elementu	Liczba / długość
1	Zasobnik filtracyjny	1 szt
2	Wkład do mikrofiltracji	1 szt
3	Przewód hydrauliczny elastyczny 1/2"	15 m
4	Tulejki zaciskowe przewodu 1/2"	4 szt
5	Końcówki hydrauliczne	4 szt
6	Przyłącze do zasobnika 3/4"-1/2"	2 szt
7	Przyłącze do zbiornika hydraulicznego 3/4"-1/2"	1 szt
8	Przyłącze do pompy hydr. 7/8" UNF-1/2"	1 szt

Tab. 3. Wykaz elementów do mikrofiltracji oleju w układzie MF 2

Lp.	Nazwa elementu	Liczba / długość / rbh
1	Zasobnik filtracyjny	1 szt
2	Wkład do mikrofiltracji	1 szt
3	Przewód hydrauliczny elastyczny 1/2"	15 m
4	Tulejki zaciskowe przewodu 1/2"	6 szt
5	Końcówki hydrauliczne	6 szt
6	Przyłącze do zasobnika 3/4"-1/2"	2 szt
7	Przyłącze do zbiornika hydraulicznego 3/4"-1/2"	1 szt
8	Przyłącze do pompy hydr. 7/8" UNF-1/2"	1 szt
9	Silnik elektryczny 0,75 kW 230 AC	1 szt
10	Pompa łopatkowa V10 1B3B1C 20	1 szt
11	Kołnierz AKA 04FS20024S	1 szt
12	Sprzęgło kłowe Rotex Apex 28	1 szt
13	Przewód hydrauliczny 1/2" zasobnik – pompa	1 m
14	Usługa wytaczania sprzęgła po wał silnika	1,5

A.4. Transport, składowanie i instalacja

Urządzenie nie wymaga fundamentu ani stałego mocowania do podłoża. Może być instalowane na elementach konstrukcyjnych maszyny budowlanej, drogowej lub innego pojazdu z instalacją hydrostatyczną. Elementy przed montażem, jak i gotowy układ MF 1 lub MF 2 składować w suchym miejscu, w temperaturze od 5 do 30°C. Krótkotrwałe odstępstwa podczas transportu są dopuszczalne wyłącznie warunkowo tj. przed uruchomieniem urządzenia powinno osiągnąć warunki bezpieczne dla wyposażenia elektrycznego i filtrowanej cieczy. W razie potrzeby przed działaniem czynników atmosferycznych układ z zasobnikiem MF 1 i MF 2 bezwzględnie przykryć.

Przed instalacją należy wyłączyć i odizolować urządzenie oraz maszynę, z którą zespół ma współpracować. Węże zasysający i zwrotny należy podłączyć do właściwych króćców. Wąż zasysający umieszcza się możliwie nisko w zbiorniku lub podłącza do przyłącza spustowego; wąż zwrotny kieruje się do górnej części zbiornika, powyżej poziomu oleju, albo do czystego zbiornika magazynowego.

Nie uruchamiać urządzenia bez podłączonych przewodów, na wejściu i wyjściu.

Filtr MM5 montować pionowo, z czaszą skierowaną do góry, zgodnie z oznaczeniami *wejście* i *wyjście*. W instalacji elastycznej filtr musi być podparty, w instalacji sztywnej stosować wsporniki, jeżeli są potrzebne. Połączenia powinny być wykonane z odpowiednich, certyfikowanych elementów.

A.5. Bezpieczeństwo i niedozwolone użytkowanie

Główne zagrożenia wynikają z kontaktu z olejami i paliwami, energii elektrycznej, ciśnienia w układzie oraz silnego pola magnetycznego MM5. Podczas pracy stosować, co najmniej rękawice, okulary ochronne, odzież roboczą i obuwie odporne na działanie olejów.

Zapewnić wentylację w przypadku pracy w pomieszczeniach, unikać kontaktu cieczy z oczami i skórą oraz wdychania par i mgły. Należy przestrzegać następujących zasad:

1. Nie jeść, nie pić i nie palić podczas obsługi urządzenia. Po pracy umyć ręce, a zanieczyszczoną odzież zdjąć i wyprać przed ponownym użyciem.
2. Przed czynnościami serwisowymi odłączyć i zabezpieczyć zasilanie. Nie wykonywać napraw instalacji elektrycznej bez odpowiednich kwalifikacji.
3. Rdzeń magnesu *MM5* może gwałtownie przyciągać metalowe przedmioty. Nie przenosić go w pobliżu narzędzi, stołów stalowych i innych masywnych elementów metalowych. Chronić dłonie przed przytrzaśnięciem.
4. Nie używać urządzenia do mediów innych niż przewidziane w niniejszej *DTR* bez uzgodnienia z producentem lub dostawcą instalacji do mikrofiltracji i wkładów filtracyjnych. Nie stosować olejów odpadowych, jako paliwa w piecu do celów grzewczych.

A.6. Uruchomienie i praca instalacji do mikrofiltracji

1. Sprawdzić stan przewodów hydraulicznych układu mikrofiltracji bocznikowej typu *bypass* oraz przewodów elektrycznych w przypadku układu *MF 2*.
2. Przewód zasysający i zwrotny nie może wykazywać wycieków, sprawdzić szczelność połączeń i poprawny kierunek przepływu oleju przez filtr magnetyczny *MM5*.
3. Przed pierwszym użyciem wstępnie zalać przewód zasysający ok. 0,75 l filtrowanej cieczy. Przy różnicy poziomów do 1 m pompa według *DTR* może nie wymagać zalewania.
4. Układ do mikrofiltracji oleju uruchamia się automatycznie po włączeniu silnika spalinowego maszyny budowlanej lub drogowej.
5. Dla układu *MF 2* po wyłączeniu maszyny budowlanej, drogowej (wyłączony silnik spalinowy) podłączyć urządzenie do zasilania i ustawić wyłącznik w pozycję WŁĄCZONY. Powinna zapalić się czerwona kontrolka.
6. Nacisnąć przycisk START dla układu *MF 2*. Po uruchomieniu pompy powinny świecić kontrolka czerwona i zielona.
7. Obserwować ciśnienie, przepływ, szczelność oraz temperaturę. Nie dopuszczać do przekroczenia 75 psi po stronie zespołu filtracyjnego.
8. Po zakończeniu filtracji w przypadku układu *MF 2* zatrzymać urządzenie i odłączyć zasilanie elektryczne.
9. Nie uruchamiać pompy na sucho dłużej niż 2-3 minuty, ponieważ może to spowodować uszkodzenie.

A.7. Dobór czasu filtracji i ocena efektu

Przy filtracji (recyrkulacji oleju) w tym samym zbiorniku maszyny budowlanej lub drogowej instrukcja *DTR* zaleca, aby cała objętość przeszła przez zespół około 7 razy. Czas filtracji można oszacować zgodnie z zależnością:

$$\text{Czas [h]} = (\text{objętość zbiornika [l]} \times \text{liczba przejść}) / \text{wydajność [l/h]} \quad (\text{A.1})$$

Dla przykładu układu *MF 2*: zbiornik $500 \text{ l} \times 7 / 600 \text{ l/h} \approx 5,8 \text{ h}$ (zalecane 6 h). Rzeczywisty czas zależy od temperatury, stopnia zanieczyszczenia, zawodnienia i stanu wkładów.

Przy przepompowywaniu oleju przepracowanego do czystego zbiornika instrukcja *DTR* zaleca zwykle dwa przejścia, a przy czyszczeniu świeżego oleju jedno. Efekt powinien być potwierdzany analizą oleju, zwłaszcza klasą czystości i zawartością wody. Przy silnym

zawodnieniu wkład może szybko osiągnąć pojemność sorpcyjną. Instrukcja *DTR* zaleca w takim przypadku kontrolę po 2-3 godzinach pracy i ewentualną wymianę wkładów.

Należy uzyskać klasy czystości: *ISO 18/16/13*, co odpowiadało 7 klasie *NAS* - dopuszczalna i akceptowana, wymagana jest klasa *ISO 17/15/12* (6 klasa *NAS*) w szczególności podczas wlewania nowego oleju do zbiornika hydraulicznego.

A.8. Obsługa filtra magnetycznego MM5

Filtr magnetyczny MM5 (montowany opcjonalnie) usuwa z cieczy zanieczyszczenia ferromagnetyczne. Stan rdzenia można wykorzystać również, jako wskaźnik charakteru zużycia elementów układu. Filtr należy okresowo otwierać i czyścić, zanim nagromadzone zanieczyszczenia utrudnią kontrolę lub obsługę. Postępowanie z filtrem magnetycznym jest następujące:

1. Zatrzymać i odizolować urządzenie od zasilania oraz zredukować ciśnienie do zera.
2. Pozwolić cieczy odpłynąć z czaszy i rdzenia zabezpieczyć miejsce pracy przed rozlewem oleju.
3. Ostrożnie wyjąć rdzeń magnetyczny, trzymając go z dala od metalowych narzędzi i powierzchni.
4. Usunąć zanieczyszczenia odpowiednim narzędziem do czyszczenia i zebrać je do przeznaczonego pojemnika.
5. Sprawdzić elementy uszczelniające i powierzchnie przylegania, złożyć filtr i sprawdzić szczelność po uruchomieniu.

A.9. Konserwacja i wymiana wkładów

Wkłady wymieniać przy spadku przepływu, wzroście ciśnienia, pogorszeniu wyników analizy oleju (brak uzyskania wymaganej klasy czystości), nasyceniu wodą lub zgodnie z przyjętym planem obsługi. Procedura wymiany wkładu filtracyjnego jest następująca:

1. Wyłączyć zespół do bocznikowej mikrofiltracji poprzez wyłączenie silnika spalinowego maszyny budowlanej lub drogowej.
2. Odpowietrzyć zaworem zasobnik filtracyjny i odczekać 5 minut na spłynięcie oleju do zbiornika hydraulicznego.
3. Odkręcić cztery nakrętki mocujące pokrywę dla *MF 1* lub pokryw dla *MF 2* i zdjąć pokrywę (pokrywy).
4. Wyciągnąć wkład pionowo w górę. Nie używać metalowej dźwigni, aby nie uszkodzić aluminiowej krawędzi obudowy zasobnika filtracyjnego.
5. Nowy wkład włożyć mosiężnym pierścieniem do góry i mocno osadzić.
6. Sprawdzić stan uszczelki pokrywy, w razie potrzeby wymienić.
7. Założyć pokrywę (pokrywy), śruby i nakrętki. Dokręcić równomiernie, bez nadmiernej siły.
8. Uruchomić zespół, odpowietrzyć układ i sprawdzić szczelność oraz ciśnienie.

Zużyte wkłady, osady z *MM5*, sorbenty i inne odpady zanieczyszczone olejem należy gromadzić i przekazywać do zagospodarowania zgodnie z przepisami ochrony środowiska oraz procedurami zakładowymi.

A.10. Diagnostyka i usuwanie usterek

W tabeli 4 przedstawiono wykaz przyczyn niewłaściwej pracy instalacji do bocznikowej mikrofiltracji oleju hydraulicznego w układzie *MF 1* i *MF 2*.

Tab. 4. Wykaz przyczyn niewłaściwej pracy instalacji do bocznikowej mikrofiltracji oleju hydraulicznego

Lp.	Objaw	Możliwe przyczyny	Zalecane działania
1	Brak uruchomienia	brak lub niewłaściwe napięcie elektryczne, uszkodzony bezpiecznik lub przewód (izolacja przewodu), usterka sterowania	sprawdzić zasilanie, przewód elektryczny, bezpieczniki. Gdy świeci czerwona kontrolka, ale brak zielonej po START - odłączyć zasilanie i wezwać wykwalifikowanego elektryka
2	Urządzenie zatrzymuje się	nadmierne ciśnienie, blokada przewodu lub rozdzielacza, zapchane wkłady	obserwować manometr, jeżeli ciśnienie rośnie powyżej 70 psi, sprawdzić drożność i stan wkładów
3	Niski przepływ	wkłady nasycone brudem lub wodą, wkład odwrócony, blokada, wysoka lepkość lub niska temperatura	Wymienić lub sprawdzić wkłady, skontrolować czy mosiężny pierścień jest u góry, udrożnić przewody, uwzględnić wpływ lepkości i temperatury
4	Wycieki przy pokrywach	Zużyta lub uszkodzona uszczelka; uszkodzona krawędź obudowy, luźne mocowanie	wymienić uszczelkę, sprawdzić powierzchnie przylegania i dokręcenie, uszkodzoną obudowę naprawić lub wymienić
5	Brak przepływu	nieszczelność po stronie ssawnej, pompa niezalana olejem, uszkodzenie pompy hydraulicznej lub silnika elektrycznego	sprawdzić połączenia, zalać pompę, skontrolować pracę silnika i pompy, w razie potrzeby sprawdzić lub wymienić pompę lub silnik elektryczny

A.11. Postępowanie awaryjne i gospodarka odpadami

W przypadku wycieku należy zatrzymać urządzenie, odłączyć zasilanie, ograniczyć rozlew i zabezpieczyć studzienki kanalizacyjne oraz powierzchnie nieutwardzone. Rozlew zebrać przy użyciu właściwych sorbentów lub innych środków zgodnie z ich instrukcjami. Zużyty sorbent umieścić w szczelnym pojemniku i przekazać uprawnionemu odbiorcy, jako odpad wymagający odpowiedniego zagospodarowania.

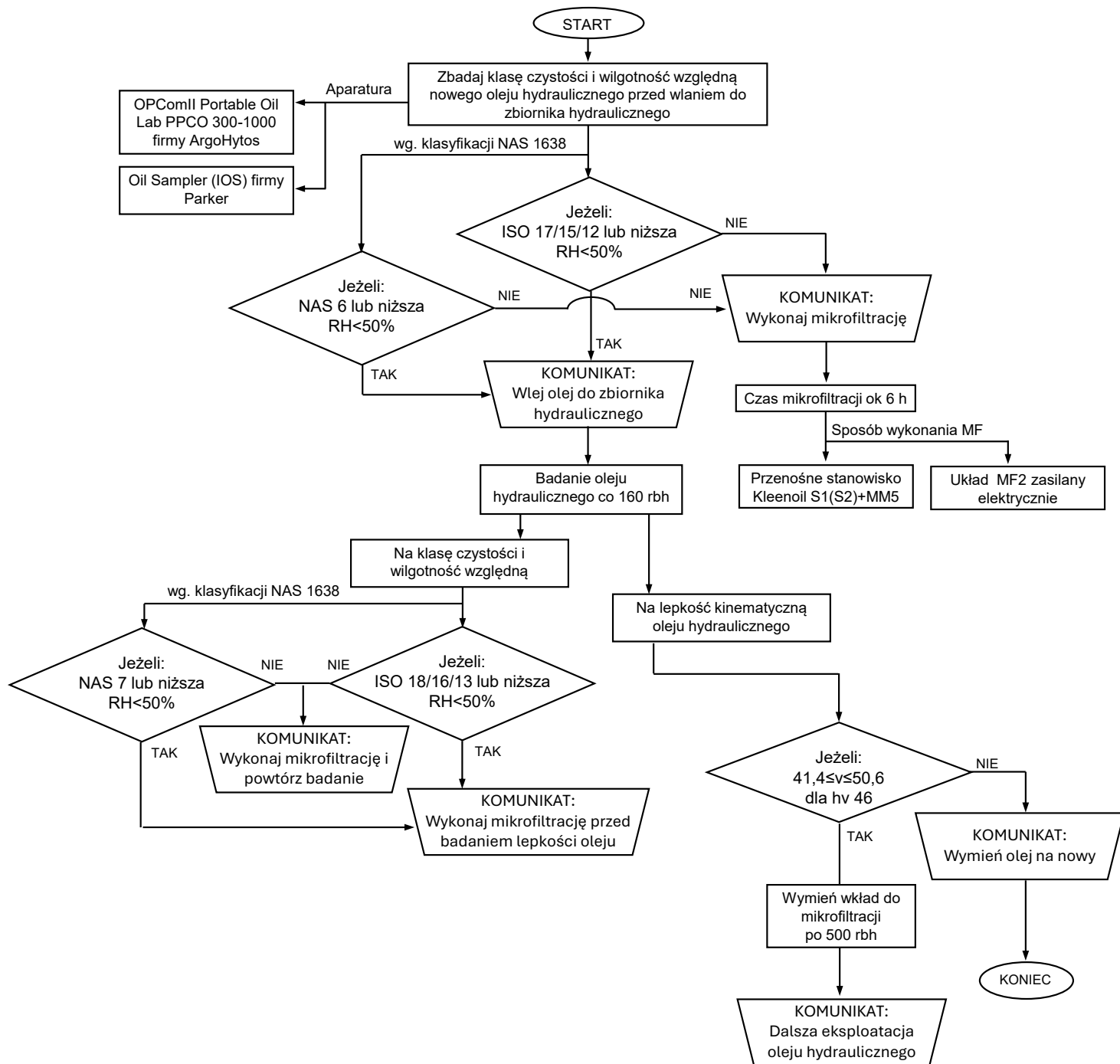
Jeżeli skala rozlewu przekracza możliwości bezpiecznego usunięcia dostępnymi środkami, należy uruchomić zakładową procedurę awaryjną i wezwać odpowiednie służby lub wyspecjalizowaną firmę do usunięcia oleju.

A.12. Części eksploatacyjne

W dokumentacji bazowej wymieniono m.in. wkłady filtracyjne, obudowy filtrów, rozgałęźniki, szybkozłączki, węże, złącze pomiarowe Minimes oraz filtr magnetyczny MM5. Przy zamawianiu części do pompy i silnika należy podać typ, moc i numer seryjny z tabliczki znamionowej urządzenia. DTR bazowa zawiera deklarację zgodności wykonanych układów MF 1 i MF 2 oraz odwołania do dyrektyw i norm obowiązujących w chwili wystawienia tej deklaracji. Niniejszy dokument DTR nie zastępuje deklaracji zgodności konkretnego układu MF 1 i MF 2 ani jego tabliczki znamionowej. W przypadku rozbieżności pierwszeństwo mają oznaczenia i dokumenty dostarczone z konkretnym układem. Kontakt serwisowy: Powers Partner Sp. z o.o., ul. Poznańska 99, 61-160 Czapury, tel. 795-559-811, e-mail: biuro@powerspartner.pl

ZAŁĄCZNIK B

Algorytm przeglądowny dla instalacji hydraulicznej z dodatkowym układem filtrującym



Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu przeglądowego dla instalacji hydraulicznej z indywidualnym układem do mikrofiltracji oleju typu hv 46