



**WSPÓŁCZESNE PROBLEMY  
INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

**Beata Malczewska**

**BADANIE WYBRANYCH WŁASNOŚCI  
OSADÓW ŚCIEKOWYCH W ŚWIETLE  
MOŻLIWOŚCI ICH UTYLIZACJI**

**X**



**Wrocław 2008**

*Autor*  
Beata Malczewska

*Opiniodawca*  
prof. dr hab. inż. Jan Pawełek

*Redaktor merytoryczny*  
dr hab. inż. Krzysztof Pulikowski, prof. nadzw.

*Opracowanie redakcyjne*  
mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz

*Korekta:*  
Janina Szydłowska,  
dr Ewa Jaworska

*Łamanie*  
Alina Gebel

*Projekt okładki*  
Krzysztof Wyszatycki

Monografie LXIII

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2008

ISSN 1898–1151  
ISBN 978–83–60574–42–3

**WYDAWNICTWO UNIwersytetu PRZYRODniczego WE WROCLAWIU**

**Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki**  
**ul. Sopocka 23, 50–344 Wrocław, tel. 071 328–12–77**  
**e-mail: wyd@up.wroc.pl**

---

Nakład 100 + 16 egz. Ark. wyd. 6,2. Ark. druk. 6,0  
Druk i oprawa: Wydawnictwo Tekst Sp. z o.o.  
ul. Kossaka 72, 85–307 Bydgoszcz

# Spis treści

	<b>Wykaz symboli użytych w pracy .....</b>	<b>5</b>
<b>1.</b>	<b>Wprowadzenie .....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>Cel i zakres pracy .....</b>	<b>14</b>
<b>3.</b>	<b>Przegląd literatury przedmiotowej .....</b>	<b>16</b>
3.1.	Metody oczyszczania ścieków .....	16
3.2.	Proces oczyszczania ścieków za pomocą osadu czynnego .....	17
3.3.	Charakterystyka osadów ściekowych .....	17
3.4.	Sposoby postępowania z osadami ściekowymi .....	18
3.5.	Stan formalno-prawny w zakresie gospodarki osadami .....	22
3.6.	Zastosowanie reologii w technologii oczyszczania wody i ścieków .....	24
<b>4.</b>	<b>Badania własne .....</b>	<b>29</b>
4.1.	Krótką charakterystyka obiektów badawczych .....	31
4.2.	Metodyka opracowania wyników badań .....	36
4.3.	Badania fizykochemiczne i bakteriologiczne analizowanych osadów .....	37
<b>5.</b>	<b>Reologiczna charakterystyka osadów ściekowych .....</b>	<b>54</b>
5.1.	Badania reologicznych własności osadów ściekowych .....	54
5.2.	Wyniki badań wiskozymetrycznych .....	56
5.2.1.	Określenie metodyki pomiarów .....	57
5.2.2.	Charakterystyki płynięcia poszczególnych typów osadów .....	60
5.2.3.	Transformacja otrzymanych pseudokrzywych płynięcia na rzeczywiste krzywe płynięcia .....	62
5.2.4.	Dobór optymalnego modelu reologicznego .....	63
5.2.5.	Zmienność parametrów reologicznych w funkcji koncentracji .....	66
5.2.6.	Zmienność parametrów reologicznych w funkcji czasu pobierania prób do analiz .....	71
5.2.7.	Porównanie parametrów reologicznych osadu czynnego i osadu nadmiernego w badanym zakresie koncentracji .....	74
5.2.8.	Określenie koncentracji granicznej .....	76
5.2.9.	Wpływ temperatury na wartości parametrów reologicznych .....	77
<b>6.</b>	<b>Analiza błędów pomiarowych .....</b>	<b>78</b>
<b>7.</b>	<b>Podsumowanie i wnioski .....</b>	<b>80</b>
<b>8.</b>	<b>Piśmiennictwo .....</b>	<b>83</b>



## Wykaz symboli użytych w pracy

AOX		Związki Chloroorganiczne Chloroorganic compounds
BZT <sub>5</sub>		Biochemiczne Zapotrzebowanie Tlenu Biochemical oxygen demand
EDC		1,2-dichloroetan 1,2-dichloroethane
EPA		Environmental Protection Agency
GUS		Główny Urząd Statystyczny Central Statistical Office
LKT		Lotne kwasy tłuszczowe Volatile fatty acids
PCB		Polichlorowane bifenyle Polychlorinated biphenyls
PCDD		Polichlorowane dibenzeno-para-dioksyny Polychlorinated dibenzodioxines
PCDF		Polichlorowane dibenzofurany Polychlorinated dibenzofurans
s.m.		Sucha masa (sucha substancja) Dry substance
WKF		Wydzielone Komory Fermentacyjne Digestion chamber
WWA		Wielopierścieniowe Węglowodory Aromatyczne Polycyclic aromatic hydrocarbons
RMŚwOK		ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. (Dz. U.02.134.1140 z dnia 27 sierpnia 2002 r.) Regulation of the Minister of Environmental Protection of 1 August 2002
C <sub>s</sub>	[%]	Koncentracja wagowa Gravimetric concentration
C <sub>v</sub>	[%]	Koncentracja objętościowa fazy stałej Volumetric concentration
G	[s <sup>-1</sup> ]	Rzeczywista prędkość deformacji Shear rate
G <sub>p</sub>	[s <sup>-1</sup> ]	Pozorna prędkość deformacji Apparent shear rate
K	[Pa · n <sup>s</sup> ]	Współczynnik sztywności do modelu Vočadli Vočadlo's fluid consistency index
k	[Pa · s <sup>n</sup> ]	Współczynnik sztywności do modelu Herschela - Bulkley'a Herschel – Bulkley's fluid consistency index
n		Liczba strukturalna Flow behavior index
η	[Pa · s]	Dynamiczny współczynnik lepkości cieczy Absolute viscosity
η <sub>pl</sub>	[Pa · s]	Lepkość plastyczna Plastic viscosity

$\tau$	[Pa]	Napężenie styczne Shear stress
$\tau_0$	[Pa]	Próg płynięcia Yield stress
$\tau_R$	[Pa]	Napężenia styczne na ścianie wiskozymetru rotacyjnego Shear stress at viscometer wall
$\tau_w$	[Pa]	Napężenia styczne na ścianie rurociągu Shear stress at viscometer wall
$\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Gęstość Density
$\rho_m$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Gęstość mieszaniny Mixture density
$\rho_s$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Gęstość cząstek stałych Particle density
$\rho_w$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Gęstość wody Water density
$\rho_c$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Gęstość cieczy Fluid density
$W_n$	[%]	Wilgotność naturalna Natural humidity
$R$	[%]	Zawartość części organicznych Organic matter content
$v$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Prędkość opadania cząstek Particle sedimentation velocity
$d_{50}$	[ $\mu$ m]	Średnia średnica masy - średnica ziarna, która wraz z mniejszymi stanowi 50% próby The size in microns at which 50% of the sample is smaller and 50% is larger. This value is also known as the Mass Median Diameter (MMD)
$d_{10}$	[ $\mu$ m]	Średnica ziarna, która wraz z mniejszymi stanowi 10% próby The size of particle below which 10% of the sample lies
$d_{90}$	[ $\mu$ m]	Średnica ziarna, które wraz z mniejszymi stanowi 90% próby The size of particle below which 90% of the sample lies
$D$	[m]	Średnica rurociągu Pipeline diameter
$DN$	[mm]	Średnica nominalna rury instalacyjnej Nominal diameter of the sewer pipe
$g$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Przyspieszenie ziemskie Gravitational constant
$k_1, k_2, k_3$		Stałe dla wiskozymetru rotacyjnego Rotational viscometer coefficients
$a_1, a_2$		Współczynniki równań aproksymujących zależności $k = f(Cs)$ oraz $n = f(Cs)$ Correlation coefficients for equations $k = f(Cs)$ and $n = f(Cs)$
$b_0, b_1, b_2$		Współczynniki równań aproksymujących określające koncentracje graniczne Correlation coefficients for equations describing critical concentration

$R_1$	[m]	Promień cylindra wewnętrznego wiskozymetru rotacyjnego External cylinder radius of rotational viscometer
$R_2$	[m]	Promień cylindra zewnętrznego wiskozymetru rotacyjnego Internal cylinder radius of rotational viscometer
A	[m <sup>-3</sup> ]	Współczynnik kształtu dla danego układu pomiarowego Shape coefficient for given measurement system
M		Współczynnik szybkości ścinania Shearing coefficient
p		Współczynniki proporcjonalności Proportion coefficient
Md	[N · m]	Moment obrotowy cylindra wewnętrznego wiskozymetru rotacyjnego Rotational viscometer internal cylinder torque
$\Omega$	[rad · s <sup>-1</sup> ]	Prędkość kątowna cylindra wewnętrznego wiskozymetru rotacyjnego Angular velocity for rotational viscometer
m		Nachylenie stycznej w danym punkcie Slope of a tangent to curve
W	[%]	Wilgotność objętościowa Volume humidity





# 1. Wprowadzenie

Osady ściekowe pochodzące z oczyszczalni ścieków nie są jednorodne pod względem składu chemicznego. Skład ten uzależniony jest m.in. od charakteru zlewni kanalizacyjnej i stosowanej technologii oczyszczania ścieków.

Biologiczne oczyszczanie ścieków jest jedną z najczęściej stosowanych metod oczyszczania, jednakże zawsze prowadzi do powstawania dużej ilości osadów. Ilości te związane są z efektywnością oczyszczania, oszczędnym gospodarowaniem wodą oraz zwiększającą się liczbą oczyszczalni, ze szczególnym uwzględnieniem usuwania związków biogenych. Przyjęta i realizowana technologia oczyszczania, sposób i stopień oczyszczania ścieków oraz rozkładu substancji organicznych odgrywa również istotną rolę w ilości powstających osadów. Obecnie, w zależności od rodzaju ciągu technologicznego, powstaje ok. 0,5–1,2 kg s.m. na 1 kg usuniętego BZT<sub>5</sub>. Powszechnie uznaje się, że jednostkowy przyrost osadu zależy m.in. od ilości i rodzaju zawiesiny ogólnej i jej stosunku do BZT<sub>5</sub>, w ściekach dopływających do biologicznej części oczyszczalni [39].

Według danych GUS [114] w 2006 r. w Polsce wytworzono ok. 790,9 tys. t s.m. z czego 501,3 tys. t s.m. odnotowano jako nagromadzone na terenie oczyszczalni. Zastosowanie w rolnictwie znalazło jedynie 80,6 tys. t s.m., natomiast do rekultywacji wykorzystano 109,7 tys. t s.m. Kompostowaniu poddano 28,1 tys. t s.m., natomiast 4,5 tys. t przekształcono termicznie, a 147,1 tys. t skierowano do składowania. GUS szacuje, że w ciągu najbliższych dziesięciu lat ilość osadów wzrośnie, w porównaniu do lat ubiegłych, od 420 000–450 000 tys. t rocznie [39, 114]. Z danych przedstawionych przez Instytut Ochrony Środowiska w Warszawie wynika, że ilość osadów ściekowych z komunalnych oczyszczalni ścieków wzrośnie do 2010 r. o 90% [9, 66, 81]. W kwietniu 1999 r. wydana została Dyrektywa unijna o składowaniu osadów, która wymusza na krajach członkowskich stopniowe redukcje zawartości odpadów organicznych w ogólnej masie składowanych odpadów do ok. 10% w 2015 roku. Wymóg ten spowodował intensyfikację działań zmierzających do wydzielenia i unieszkodliwienia frakcji organicznej z odpadów komunalnych [131]. Szacuje się, że od 35 do 40% wszystkich odpadów komunalnych w Polsce stanowi frakcja organiczna [114].

Osady stanowią objętościowo ok. 3% ścieków, a zawierają ponad połowę ładunku zanieczyszczenia dopływającego w ściekach surowych. Koszty przeróbki osadów to 30–40% kosztów inwestycyjnych i 5% kosztów eksploatacyjnych [69]. Gospodarka osadami ściekowymi nie zawsze jest prowadzona prawidłowo. Wiąże się to z faktem nieuwzględniania na etapie projektowania rozwiązań technologicznych mających na celu usuwanie i likwidację powstających na terenie oczyszczalni osadów. Problem z ich utylizacją na terenie większości oczyszczalni ograniczono do magazynowania osadów

na jej terenie (na lagunach, poletkach osadowych). Gospodarka osadami komunalnymi nie jest również dokładnie monitorowana [40]. Zgodnie z obowiązującym Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych (RMŚwOK) powinny być ewidencjonowane następujące informacje dotyczące składu i właściwości osadów w suchej masie:

- odczyn (pH);
- procentowa zawartość suchej masy, substancji organicznych, azotu ogólnego (w tym amonowego) w suchej masie, fosforu ogólnego, wapnia i magnezu, jaj pasożytów jelitowych;
- zawartość metali ciężkich;
- postać komunalnych osadów ściekowych;
- sposób ich wykorzystania.

Osady z oczyszczalni ścieków komunalnych powstają na różnych etapach procesu technologicznego oczyszczania. Można je podzielić na dwa zasadnicze rodzaje: osady z oczyszczania mechanicznego (skratki i piasek z piaskowników) oraz osady z oczyszczania biologicznego ścieków zawierające duże ilości związków organicznych. Skratki są to zanieczyszczenia zatrzymane na sitach lub kratkach w trakcie mechanicznego oczyszczania; ich ilość zależy od gęstości krat. Dziennie otrzymuje się od 0,5 do 1 t skratek na 100 000 mieszkańców [39]. Zatrzymywanie piasku i zanieczyszczeń mineralnych następuje w piaskownikach. W zależności od pogody, szacuje się na 100 000 mieszkańców, że dziennie powstaje od 2 do 3 t tego osadu na dobę. W procesie sedimentacji w osadnikach wstępnych powstaje osad wstępny – łatwo zagniwający, o uciążliwym zapachu. Szacuje się, że na 100 000 mieszkańców – ilość powstającego osadu wstępnego wynosi od 4 do 5 t s.m. na dobę. Osad czynny jest to kłaczkowata zawiesina o bardzo rozwiniętej powierzchni znajdująca się w reaktorach biologicznych, natomiast wtórny – wydzielany jest w osadnikach wtórnych. Osad zawracany do obiegu oczyszczania ścieków jest określany jako osad recykulowany, a osad nadmierny – to taki, który usuwany jest z obiegu do dalszej przeróbki. Osad nadmierny stanowi największą ilość odpadów z oczyszczania ścieków i powstaje go w ciągu doby ok. 4–6 t (na 100 000 mieszkańców) [39]. Zawartość substancji mineralnych w tym osadzie wynosi ok. 30%, reszta to substancje organiczne, zwykle w postaci bardzo uwodnionej. W przypadku stosowania koagulacji lub neutralizacji ścieków z użyciem związków chemicznych powstają osady chemiczne, zaś w wyniku zmieszania osadów wstępnych i surowych – osady mieszane. Podstawowym celem przeróbki osadów jest mineralizacja związków organicznych prowadząca do stabilizacji oraz zmniejszenia objętości, co osiąga się w procesach odwadniania oraz suszenia. Osady po kolejnych stopniach przeróbki są określane jako:

- zagęszczone – w procesie zagęszczania,
- stabilizowane – w procesach beztlenowych (przefermentowane),
- ustabilizowane – w procesach tlenowych,
- odwodnione – po procesach odwadniania,
- zhigienizowane – po pasteryzacji, wapnowaniu lub suszeniu.

Stabilizacja osadów ma na celu zmniejszenie ilości substancji organicznej w osadach, przyczyniając się również do zmniejszenia uciążliwości zapachowej. W zależności od ilości i jakości powstających osadów stosuje się następujące metody stabilizacji:

- stabilizacja alkalizacyjna (przeprowadzana poprzez zmianę pH),
- fermentacja,
- kompostowanie,
- suszenie,
- stabilizacja tlenowa, psychrofilna, termofilna, beztlenowa i mezofilna,
- stabilizacje dwustopniowe: tlenowo-beztlenowa, beztlenowo-beztlenowa.

Różnicowane własności osadów ściekowych i różny skład ilościowy osadów stwarzają problemy z podjęciem decyzji o sposobie ich zagospodarowania. Problematyka ta przyczyniła się do powstania licznych badań mających na celu opracowanie optymalnych rozwiązań ich utylizacji [5, 13, 14, 24, 33, 40, 42, 54, 58, 87, 88, 89, 97, 101, 105, 107, 127]. W zależności od ilości i jakości osadów oraz wielkości oczyszczalni stosuje się różne metody utylizacji (wykorzystania) osadów. Z ekonomicznego i ekologicznego punktu widzenia bardziej uzasadnione jest zagospodarowanie osadów niż ich gromadzenie [23, 61, 103]. Osad ściekowy jest źródłem azotu, fosforu, materii organicznej i węgla organicznego, a także makroskładników, które odgrywają dużą rolę w bilansie próchnicy glebowej [20, 21]. Technologia przeróbki osadów zmienia się z powodu wprowadzania nowych przepisów i trendów technologicznych, zmierzając w kierunku rolniczego bądź przyrodniczego wykorzystania. Rolnicze zagospodarowanie wiąże się z produkcją roślinną na cele konsumpcyjne lub przemysłowe, nieprzeznaczone do spożycia, np. uprawa rzepaku do produkcji biopaliw. Natomiast przyrodnicze wykorzystanie obejmuje głównie rekultywację terenów zdewastowanych oraz zagospodarowanie utworów antropogenicznych, np. poprzez hydroobsiew. Użytkowanie osadów ściekowych do celów rolniczych uzależnione jest od składu chemicznego (zawartości substancji organicznych, substancji nawozowych, metali ciężkich, związków toksycznych), stanu sanitarnego (ilości i rodzaju mikroorganizmów chorobotwórczych), jak również cech fizycznych (konsystencji). Rolnicze lub przyrodnicze wykorzystanie osadów jest preferowane w krajach Unii Europejskiej, Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, gdzie ponad 1/3 osadów ściekowych jest w ten sposób utylizowana [129, 130, 138]. Główną zaletą rolniczego wykorzystania osadów jest zwracanie istotnych i potrzebnych składników nawozowych do ziemi, umożliwiając rozwój roślin. Jest to również stosunkowo niedrogi sposób utylizacji osadów. Ograniczenie rolniczego wykorzystania wynika z warunku zapewnienia odpowiednio dużych terenów niezbędnych do zagospodarowania osadów. Możliwe jest jednak zminimalizowanie potrzebnej powierzchni poprzez zastosowanie odpowiedniej metody stabilizacji [9]. Rolnicze użytkowanie osadów wiąże się również z pewnymi ograniczeniami, wynikającymi z zawartości w osadach substancji toksycznych, pory roku i okresu wegetacyjnego oraz pracochłonności procesu. Warunki meteorologiczne mają również istotny wpływ na rolnicze wykorzystanie (intensywne opady uniemożliwiają wprowadzenie sprzętu rolniczego). W okresie zimowym bądź w okresie wegetacyjnym należy zapewnić przechowanie osadów. Ponadto przeszkodą dla rolniczej utylizacji osadów ściekowych są opory społeczne. Dodatkowe zagrożenie może wynikać z zastosowania większych dawek niż roślina potrzebuje i związana z tym migracja azotu do wód gruntowych. Spływ powierzchniowy może również

spowodować zanieczyszczenie wód powierzchniowych nadmierną ilością związków azotu i fosforu [59, 60, 70]. Rolnicze zagospodarowanie osadów jest często niemożliwe z uwagi na zbyt dużą zawartość metali ciężkich w osadach. Natomiast ilości normatywne metali ciężkich w osadach ściekowych przeznaczonych do przyrodniczego wykorzystania są odpowiednio większe i tym samym przyczyniają się do szerszego rozpowszechnienia tej metody. Podejmuje się liczne badania dotyczące określenia stopnia mobilności metali ciężkich z osadów do gleby. Wykazały one, że metale ciężkie obecne w osadach występują przede wszystkim we frakcjach trudniej dostępnych dla roślin [22, 81].

Do utylizacji osadów organicznych mogą być stosowane metody biologiczno-tlenowe (kompostowanie), beztlenowe (fermentacja) oraz ich kombinacja [16]. Odpady łatwo rozkładalne biologicznie o dużej wilgotności mogą stwarzać problemy podczas kompostowania. Z ogólnej masy odpadów biologicznie rozkładalnych od 1/2 do 2/3 odpadów nadaje się bardziej do fermentacji niż do kompostowania [54, 97, 135, 140].

Technologia spalania osadów ściekowych jest droga, gdyż przed unieszkodliwieniem osady należy suszyć, a ponadto może się ona przyczyniać do zanieczyszczenia atmosfery. Zaletą tego typu rozwiązania jest znaczne zmniejszenie objętości osadu, jednakże istnieje zagrożenie wynikające z potencjalnej obecności w popiołach metali ciężkich [40]. W kosztach zagospodarowania osadów istotne znaczenie ma ich uwodnienie, które wpływa na konsystencję osadu, a tym samym na sposób transportu [137]. Zawartość suchej masy zależy od typu osadu oraz od stosowanego sposobu jego zagęszczania. W najpowszechniejszym użyciu znajduje się osad ziemisty, natomiast osad o konsystencji mazistej nie jest zbyt często stosowany z uwagi na trudności w równomiernym rozprowadzaniu na powierzchni gruntu [9, 61, 88, 99]. Uwodnienie osadów przed odwodnieniem i kondycjonowaniem wynosi 94–97% i w takiej formie mogą być przeznaczone jako osad płynny – poprzez wstrzykiwanie do gleby lub natryskiwanie. W Europie stosuje się metodę iniekcji podpowierzchniowej osadów ściekowych do gruntu za pomocą specjalnych urządzeń, np. Tanka i Terra-Gator [115, 127]. Osady o tak wysokim uwodnieniu wykorzystuje się w rekultywacji gruntów przeznaczonych do zalesienia, zadrzewienia i zadarnienia [88, 103]. Odwodnione osady mające strukturę wilgotnej gleby mogą być bezpośrednio użyte za pomocą typowych rolniczych zabiegów [61, 88]. W Polsce osady są najczęściej odwadniane do postaci ziemistej, co ułatwia załadunek i transport, magazynowanie i użytkowanie. Wprowadzenie osadów ściekowych do gleby poprawia jej strukturę i pojemność wodną, co zapewnia lepszy wzrost roślinom, gdyż poprawia ich odporność na susze. Osady ściekowe stanowią mogą alternatywę dla stosowania nawozów mineralnych. Organiczne formy zawarte w osadach ściekowych są mniej „wodolubne” i rzadziej wypłukiwane w głąb profilu glebowego [70]. Wzrost plonów roślin w efekcie stosowania osadów ściekowych odnotowano w licznych opracowaniach [59, 88, 89, 103], co potwierdza, że są one bardzo dobrym źródłem składników pokarmowych dla wielu upraw rolniczych. Na podstawie przeglądu literatury przedmiotowej oraz obowiązujących przepisów w tym zakresie można przyjąć, że jedynym rozsądnym sposobem wykorzystania związków biogennych znajdujących się w osadach ściekowych jest ich przyrodnicze lub rolnicze zagospodarowanie.

Osady są zaliczane do wielofazowych układów polidispersyjnych składających się z fazy rozpuszczonej (mieszaniny cząstek kłaczkowatych) i fazy rozpuszczającej (wody). Cząstki stałe (kłaczkki) w zawiesinie składają się z cząstek stałych organicznych, mine-

ralnych i mikroorganizmów występujących w różnych stosunkach ilościowych zależnie od rodzaju osadu i jego składu. Kłaczkami osadu charakteryzują się nietrwałą strukturą, wynikającą z oddziaływań między kłaczkami a wodą. Oddziaływania hydrauliczne mają również wpływ na ich strukturę [95]. Właściwości mieszaniny cząstek stałych i cieczy zależą przede wszystkim od średniej prędkości i średniej koncentracji [93]. Z hydromechanicznego punktu widzenia – osady mogą się zachowywać jak ciecze newtonowskie bądź też jako ciecze nienewtonowskie, stąd problemy w określeniu odpowiedniego sposobu opisu zachowania się mieszaniny.

Z danych literaturowych wynika, że hydrauliczny transport substancji płynnych (takich jak osady ściekowe) w rurociągach okrągłych jest metodą transportu najbardziej ekonomiczną i najbardziej wydajną. Wiedza na temat parametrów reologicznych osadów jest istotna w przypadku projektowania instalacji pompowo-rurowych, jak również przy projektowaniu urządzeń towarzyszących transportowi cieczy zawierającej cząstki stałe (prasy hydrauliczne, wirówki itp.) [45].

Zagospodarowanie osadów ściekowych jest ciągle tematem dyskusyjnym, dlatego też w pracy przeprowadzono analizę możliwości zastosowania oceny parametrów reologicznych osadów ściekowych jako kryterium stanowiącego podstawę przy wyborze technologii ich utylizacji. Określenie parametrów reologicznych jest trudne z uwagi na problemy związane z pomiarem „lepkości” osadu czynnego biologicznie [5, 76]. W publikacji podjęto również próbę przedstawienia opracowanej metodyki pomiarów wiskozymetrycznych uwodnionych osadów ściekowych.

## 2. Cel i zakres pracy

Realizacja oraz wybór odpowiedniego sposobu utylizacji osadu ściekowego, jak wynika z analizowanych prób z oczyszczalni mechaniczno-biologicznych, może następować wyłącznie po ocenie parametrów fizycznych, chemiczno-biologicznych oraz reologicznych, co jest celem niniejszej publikacji.

Badaniami zostały objęte następujące parametry:

- fizyczne (gęstość właściwa części stałych, gęstość mieszaniny, wilgotność, koncentracja, zawartość części organicznych),
- chemiczne (*pH*, zasadowość, *N*, *P*, zawartość metali ciężkich),
- biologiczne (ocena makro- i mikroskopowa oparta o metodykę ATV),
- reologiczne (model reologiczny, zmienność parametrów reologicznych wraz z koncentracją, określenie koncentracji granicznej).

Publikacja dotyczy określenia charakterystyki płynięcia analizowanych osadów ściekowych oraz określenia reologicznych parametrów dla przyjętego modelu. Podjęto również próby określenia zmian parametrów reologicznych wraz ze zmianami w jakości osadów ściekowych. Oprócz badań mających na celu wyznaczenie parametrów reologicznych, zostały również przeprowadzone badania parametrów fizykochemicznych i mikrobiologicznych, w celu określenia potencjalnej korelacji pomiędzy nimi. Określenie charakterystyki osadów ściekowych ze szczególnym uwzględnieniem parametrów reologicznych ma istotne znaczenie dla procesu utylizacji osadów. W pracy przeprowadzono badania procesów płynięcia osadów ściekowych. W badaniach tych brano pod uwagę sposoby zagęszczania, efekty biologicznej przeróbki osadów i możliwości ostatecznej likwidacji bądź wykorzystania oddzielonych części stałych. Prawidłowa ocena parametrów fizykochemicznych, biologicznych oraz reologicznych prowadzi do prawidłowego doboru urządzeń, właściwej eksploatacji węzłów odwodnienia oraz eliminacji zakłóceń w funkcjonowaniu instalacji pompowo-rurowych. Parametry reologiczne mogą posłużyć zatem jako parametr kontrolny w trakcie obróbki osadów w ciągu technologicznym. Poprawa właściwości fizycznych osadu z uwzględnieniem możliwości jego dalszej przeróbki pozwala na zmniejszenie objętości odpadów gromadzonych na składowiskach i zmianę statusu osadu z odpadu na produkt rolniczo użyteczny.

Zaplanowane badania dotyczą określenia reologicznego zachowania się osadów ściekowych na podstawie pomiarów wiskozymetrycznych. Pozwala to, dla przyjętego modelu reologicznego, na zastosowanie adekwatnego równania na wyznaczenie uogólnionej liczby Reynoldsa i umożliwia określenie współczynnika strat liniowych  $\lambda$  oraz całkowitych strat energii niezbędnych dla prawidłowego wymiarowania instalacji pompowo-rurowych w laminarnej strefie przepływu.

Na podstawie analizy powyższych parametrów, a w szczególności oceny reologicznej zostaną ustalone – dla badanego osadu – zakresy koncentracji odpowiadające

newtonowskiemu, pseudoplastycznemu i plastyczno-lepkim zachowaniu się mieszaniny. Pozwoli to, w konsekwencji, na opracowanie zaleceń dotyczących możliwości wyboru jednego ze sposobów utylizacji w zależności od występujących w praktyce koncentracji osadu. Przykładowo, osad ściekowy o właściwościach ciała plastyczno-lepkiego, tj. o koncentracji ustalonej na podstawie badań wiskozymetrycznych, może być rolniczo wykorzystany wyłącznie przez nawożenie wgłębne (iniekcja w górną warstwę gleby) lub przyrodniczo w ramach zastosowania np. hydroobsiewu. Jest to spowodowane wystąpieniem w mieszaninie progu płynięcia utrudniającego odwodnienie osadu, czyli czynnika niekorzystnego w przypadku np. nawodnień powierzchniowych, a uniemożliwiającego swobodny spływ osadów, czyli czynnika korzystnego w przypadku zastosowania hydroobsiewu powierzchni o znacznych spadkach, np. skarp utworów antropogenicznych.

Istnieje również możliwość, dla przyjętego sposobu utylizacji (deszczowanie, nawadnianie, iniekcja wgłębna itp.), przygotowania mieszaniny osadu ściekowego mającego parametry dynamiczne optymalne do zalecanego sposobu rolniczego zagospodarowania.

## 3. Przegląd literatury przedmiotowej

### 3.1. Metody oczyszczania ścieków

W procesach oczyszczania ścieków stosuje się następujące metody oczyszczania: mechaniczne, chemiczne, biologiczne, mieszane i dezynfekcje. W procesach mechanicznego oczyszczania stosuje się procesy jednostkowe takie jak: sedymentacja grawitacyjna, odśrodkowa, filtracja ciśnieniowa, próżniowa, odśrodkowa, złożona, odśrodkowo-grawitacyjne rozdzielanie w hydrocyklonach i inne. Służą one do usuwania grubszych zawiesin organicznych i mineralnych oraz ciał pływających [3, 7, 9, 35, 38, 64].

W zależności od składu ścieków stosowane są również procesy fizykochemiczne: koagulacja, współstrącanie, sorpcja, flotacja, wymiana jonowa na jonitach, elektroliza, elektrodializa, odwrócona osmoza, ultrafiltracja [7, 9, 38, 64]. Chemiczne oczyszczanie ścieków wiąże się z takimi procesami, jak neutralizacja, utlenianie i redukcja. Stosowane jest ono głównie w przypadku ścieków przemysłowych [7].

Metody mieszane powstają z kombinacji metod złożeń biologicznych i metod osadu czynnego. Jako złoża stosowane są powierzchnie stale zanurzone poniżej poziomu zwierciadła ścieków (metoda Biocomb, system NSW, system Weber, metoda Ring-Lace, metoda B+N), powierzchnie obrotowe (metoda Stählermatic, walców zanurzonych), zawieszono powierzchnie porostu (metoda Linpor, system Menzel) [7].

W procesie dezynfekcji stosuje się: metody chemiczne mające na celu podniesienie  $pH$ , procesy termiczne (kompostowanie) bądź pasteryzacje. Proces dezynfekcji osadów przeprowadza się celem higienizacji osadu.

Wstępne oczyszczanie ścieków przebiega na kratkach, sitach, w piaskowniku, odłuszczeniach oraz osadniku wstępnym i stanowi pierwszy stopień oczyszczania. Oczyszczanie mechaniczne stosowane jest w celu przygotowania ścieków do dalszych procesów technologicznych. Jego celem jest usunięcie ze ścieków zanieczyszczeń stałych pływających lub wleczonych (na kratkach i sitach), na piaskownikach usuwane są zawiesiny mineralne, a w osadnikach wstępnym – pozostałe zawiesiny łatwo opadające. Drugi stopień oczyszczania jest to oczyszczanie biologiczne. Ścieki komunalne zwykle oczyszcza się z wykorzystaniem procesów biologicznych, które dzieli się na dwa podstawowe rodzaje: oczyszczanie osadem czynnym oraz oczyszczanie na złożach biologicznych [3, 7, 9, 35, 38, 64].

W monografii zaprezentowano badania uwodnionych osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni ścieków komunalnych, które wykorzystują technologię osadu czynnego.



## 3.2. Proces oczyszczania ścieków za pomocą osadu czynnego

Proces biologicznego oczyszczania ścieków za pomocą osadu czynnego polega na rozkładzie związków organicznych występujących w ściekach (zmineralizowaniu) na substancje proste, m.in.: dwutlenek węgla, wodę i amoniak, który zostaje utleniony do azotanów (nityfikacja). Oczyszczanie ścieków za pomocą osadu czynnego przeprowadza się w komorach napowietrzania, gdzie następuje intensywne mieszanie i natlenianie ścieków z charakterystycznym dla tego procesu zespołem mikroorganizmów. Osad czynny stanowią kłaczkowate skupiska drobnoustrojów, w skład których wchodzi m.in. bakterie, pierwotniaki, wrotki i nicienie. Skład i proporcje ilościowe flory bakteryjnej osadu czynnego mają zasadniczy wpływ na sprawność technologiczną procesu oczyszczania ścieków. Za pomocą osadu czynnego usuwane (utleniane) są rozpuszczone substancje organiczne, takie jak: tłuszcze, białka i węglowodany. Jednocześnie oddziela się resztki drobnej zawiesiny substancji mineralnych. W ciągu 8 godzin oczyszczania uzyskuje się obniżenie zawartości zanieczyszczeń substancjami organicznymi o 85% [3, 9, 64]. Przebieg procesów oczyszczania w reaktorach biologicznych, kinetyka wzrostu mikroorganizmów, sorpcja zanieczyszczeń na powierzchni kłaczek były przedmiotem wielu analiz [15, 17, 55, 62, 98]. Z komory osadu czynnego odpływa mieszanina ścieków oczyszczonych do osadnika wtórnego, w którym następuje oddzielenie osadu od strumienia cieczy (sedymentacja osadu i klarowanie). Wydzielony w osadniku osad jest zawracany do komory napowietrzania, natomiast nadmiar osadu usuwa się z układu do dalszego unieszkodliwiania. Osad z osadnika może być poddany dalszej przeróbce, np. do celów rolniczych.

Trzeci stopień oczyszczania polega na doczyszczaniu ścieków z usuwaniem substancji biogenych. Usuwanie związków azotu i fosforu z oczyszczonych ścieków następuje w procesie denitryfikacji. Azotany są redukowane do azotynów, a następnie do azotu gazowego. Związki fosforu można usunąć również przy wykorzystaniu odpowiednich mikroorganizmów lub strącania chemicznego polegającego na dodaniu siarczanu glinu, chlorku żelaza lub wodorotlenku wapnia [134, 139].

## 3.3. Charakterystyka osadów ściekowych

Osady są zaliczane do wielofazowych układów polidispersyjnych składających się z wody i rozdrobnionych cząstek ciała stałego, a także pęcherzyków gazu. Proporcje między fazą stałą (cząstkami ciała stałego) a cieczą decydują o uwodnieniu, które dla osadów ściekowych wynosi 94–99% [32]. Woda w osadzie może występować w postaci:

- wolnej i międzycząsteczkowej, które łatwo oddzielić od cząstek osadu w procesie zagęszczania i filtracji;
- kapilarnej, związanej w cząsteczkach osadu siłami adhezji i kohezji;
- higroskopijnej lub koloidalnej, bardzo trudnej do oddzielenia, którą z cząsteczką osadu wiąże siła napięcia powierzchniowego;
- biologicznie związanej, która występuje w komórkach mikroorganizmów;

- usunąć ją można po zniszczeniu błon komórkowych;
- chemicznie związanej.

Osady ściekowe charakteryzują się dużą skłonnością do zagniwania, wynikającą głównie z dużej zawartości związków organicznych (osad czynny składa się w 60–70% z materii organicznej), nadmiernym uwodnieniem, oraz różną lepkością i konsystencją, która determinuje technikę wprowadzania osadu do gleby.

Struktura osadu decyduje o uwodnieniu międzycząsteczkowym, zaś natura cząstek – o ilości i stopniu związania wody biologicznej, adhezyjnej, adsorpcyjnej itp. [95]. Zwiększenie efektywności odwadniania uzyskiwane jest w procesie kondycjonowania. Jego założeniem jest zmiana struktury oraz zmiana własności osadu. Proces ten może być stosowany w różnych miejscach ciągu technologicznego oczyszczania ścieków. Dominującą obecnie w Polsce metodą jest kondycjonowanie chemiczne. Polega ono na dodawaniu do osadu związków nieorganicznych (soli żelaza, glinu, wapna) bądź organicznych (polielektrolitów). Zastosowanie polielektrolitów umożliwia zmniejszenie dawek koagulanta i wpływa korzystnie na proces flokulacji [9, 10, 12]. Prowadzone są również badania nad efektywnością kondycjonowania za pomocą metod fizycznych, termicznych, oraz kondycjonowania za pomocą pola ultradźwiękowego i pola magnetycznego [9, 10, 12]. Charakterystyka osadów ściekowych powinna być oparta na kompleksowej analizie następujących parametrów:

- fizycznych – dających ogólną informację;
- chemicznych – informujących o zawartości składników, w tym toksycznych;
- determinujących rolnicze wykorzystanie;
- biologicznych – określających poprawność przebiegu procesów w komorach osadu czynnego;
- reologicznych – mogących stanowić parametr technologiczny, stanowiący kryterium umożliwiające podjęcie decyzji o sposobie wykorzystania osadów (deszczowanie, nawadnianie, iniekcja wgłębna).

### **3.4. Sposoby postępowania z osadami ściekowymi**

Obecnie w Polsce dominującym sposobem unieszkodliwiania osadów ściekowych jest gromadzenie na składowiskach odpadów komunalnych albo na wydzielonych na terenie oczyszczalni składowiskach, lagunach. Jednakże w zaleceniach UE postuluje się zakaz składowania odpadów o zawartości powyżej 5% substancji organicznych, co w praktyce eliminuje możliwość unieszkodliwiania poprzez składowanie [131]. Zmiany legislacji w stosunku do osadów ściekowych, jak również potrzeba usuwania zwiększonych ilości związków fosforowych, powoduje poszukiwanie skutecznych i ekonomicznie uzasadnionych metod unieszkodliwiania. W Dyrektywie Rady 86/278/EEC ustalone zostały dopuszczalne stężenia metali ciężkich w glebie i w osadzie oraz maksymalne ilości metali ciężkich, które mogą być wprowadzane do gleby. Podano również okresy pomiędzy stosowaniem osadów ściekowych na poszczególnych rodzajach gruntów rolniczych oraz kierunki wykorzystania tych gruntów [140]. Strategia postępowania z osadami wg UE zakładała, że od 2015 r. nie będzie można ich deponować na składowi-

skach [55, 66, 131, 137]. Zakładano, że osady po sanitacji mają w 52% zostać wykorzystane rolniczo lub podlegać kompostowaniu, a w 38% (pozostała ilość) – spalaniu.

Wybór sposobu unieszkodliwiania zależy od: składu chemicznego (zawartości substancji organicznych i metali ciężkich), stanu sanitarnego, jak również cech fizycznych i reologicznych osadów.

W Polsce osady pochodzące z komunalnych oczyszczalni ścieków mają zmienną zawartość metali ciężkich. Zauważalna jest jednak tendencja do zmniejszania się stężenia metali, co może wynikać z likwidacji zakładów przemysłowych. Obecnie w Polsce ok. 36,93% osadów jest gromadzonych na składowiskach, 13,08% wykorzystuje się rolniczo, 4,41% jest kompostowane, 1,41% przekształcane termicznie, a 44,21% usuwane jest innymi metodami [114]. Możliwości zagospodarowania osadów ściekowych są następujące:

1. Przyrodnicze wykorzystanie:

- a) poziome (powierzchniowe) użyźnianie z zastosowaniem osadu ziemistego,
- b) wglębne (podpowierzchniowe) użyźnianie z zastosowaniem osadu ziemistego,
- c) wstrzykiwanie osadu płynnego,
- d) hydroobsiew.

2. Kompostowanie osadów ściekowych:

- a) w przyzmacz (stos napowietrzany),
- b) w urządzeniach mechanicznych ORGANIC-90, HORSTMANN, STRABAG.

3. Metody termiczne (spalanie)

4. Współspalanie:

- a) z węglem,
- b) w elektrowniach z warstwą fluidalną,
- c) z innymi odpadami komunalnymi,
- d) przy produkcji cegieł, cementu, asfaltu.

5. Procesy alternatywne:

- a) mokre utlenianie,
- b) piroliza,
- c) paliwo z odpadów,
- d) zgazowanie,
- e) zeszkliwanie.

Według obowiązujących w Polsce przepisów prawnych [108] komunalne osady ściekowe mogą być stosowane między innymi:

- a) w rolnictwie, rozumianym jako uprawa wszystkich płodów rolnych wprowadzanych do obrotu handlowego, włączając w to uprawy przeznaczone do produkcji pasz;
- b) do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne;
- c) do dostosowania gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu;
- d) do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu;
- e) do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i do produkcji pasz.

W rozporządzeniu są również wyszczególnione dopuszczalne procesy unieszkodliwiania odpadów i są to:

- składowanie na składowiskach odpadów obojętnych;
- obróbka w glebie i ziemi (np. biodegradacja odpadów płynnych lub szlamów w glebie i ziemi);
- składowanie poprzez głębokie wtryskiwanie (np. wtryskiwanie odpadów, które można pompować);
- retencja powierzchniowa (np. umieszczanie odpadów na poletkach osadowych lub lagunach);
- składowanie na składowiskach odpadów niebezpiecznych lub na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne;
- obróbka biologiczna – fermentacja – w wyniku której powstają odpady unieszkodliwiane;
- obróbka fizyczno-chemiczna – parowanie, suszenie, strącanie – w wyniku której powstają odpady unieszkodliwiane;
- termiczne przekształcanie odpadów w instalacjach lub urządzeniach zlokalizowanych na lądzie;
- składowanie odpadów w pojemnikach w ziemi (np. w kopalni);
- przepakowywanie, magazynowanie.

Poprawa właściwości osadu z uwzględnieniem możliwości dalszej przeróbki osadu ma na celu:

- a) obniżenie stężeń metali ciężkich w osadach ściekowych do wartości umożliwiających ich przyrodnicze wykorzystanie;
- b) zmniejszenie kosztów oczyszczania ścieków o koszt wapnowania, wywozu osadów na składowisko komunalne oraz opłat za gospodarcze korzystanie ze środowiska;
- c) zmniejszenie objętości odpadów gromadzonych na składowiskach;
- d) zmianę statusu osadu z odpadu na produkt użyteczny rolniczo.

Zainteresowanie problematyką utylizacji osadów ściekowych wynika z:

- niewłaściwego rozwiązania problemów zagospodarowania osadów,
- znacznego stopnia uciążliwości dla środowiska.

Większość oczyszczalni biologicznych w Polsce stosuje następujące metody utylizacji osadów ściekowych: zagęszczenie osadu, fermentacja w wydzielonych komorach fermentacyjnych otwartych i zamkniętych, wapnowanie. Wykorzystanie osadów ściekowych na cele rolnicze jest często stosowaną metodą w krajach Unii Europejskiej.

Jednym z przykładów wykorzystania osadów ściekowych jest uprawa tzw. roślin energetycznych (uprawa wikliny przez firmę Ashdown Environmental Company w Kornwalii, Wielka Brytania). Po ośmiu latach rośliny nadają się do zbioru i zostają wykorzystane do produkcji 2,5 MW energii [113]. Komunalne osady ściekowe, po przetworzeniu, są stosowane w rolnictwie do uprawy roślin ogrodowych, doniczkowych. Ziemia mieszana z osadami ściekowymi jest stosowana do użyźniania miejskich skwerów i parków [125, 129, 130, 138]. Wykorzystanie osadów na terenach rolniczych najczęściej wdraża się na obszarach blisko położonych od miejsca ich wytwarzania, ale zalety transportu sprawiły, że np. Filadelfia przemieszcza osady na odległość 402,34 km. Przewożone osady są kierowane do zagospodarowywania w kopalniach odkrywkowych.

Aktualnie trwają badania nad intensyfikacją procesów przeróbki osadów jako surowca do pozyskania użytecznych produktów (kanadyjska technologia – „Thermo

Tech”, polsko-niemiecka technologia KA-LE, w której przeróbce tlenowo-beztlenowej poddane są rozdrobnione odpady komunalne). Procesy anaerobowo/aerobowe są wykorzystywane w USA (technologia SEBAC), Belgii (DRANCO), Szwajcarii (KAMPO-GAS), Niemczech (BTA) czy Holandii (BIOCELL) [66].

Najpowszechniejszym sposobem utylizacji odpadów i osadów ściekowych jest proces fermentacji beztlenowej oraz kompostowanie w warunkach tlenowych [9, 66]. Kluczowym problemem technologicznym jest optymalizacja procesu odwadniania osadów ściekowych. W małych i średnich oczyszczalniach stosowane są urządzenia takie jak system DRAIMAD TEKNOBAG, wirówki, natomiast w większych oczyszczalniach stosuje się głównie taśmowe prasy filtracyjne.

Metoda iniekcji podpowierzchniowej osadów ściekowych do gruntu wykorzystywana jest w pracach zazieleniania terenów, umacniania skarp drogowych i zalesiania. Technika ta wymaga użycia specjalnych urządzeń takich jak: Tanka i Terra-Gator [115]. Analizowane są również praktyczne możliwości zastosowania dżdżownic kalifornijskich do przeróbki osadów ściekowych [8].

Jedną z najstarszych form utylizacji ścieków komunalnych jest wprowadzenie ścieków do gruntu, co eliminuje problem z unieszkodliwianiem osadów, jednakże nie zmniejsza zagrożenia dla środowiska. Do naturalnych metod biologicznych utylizacji ścieków zalicza się: nawadnianie, irygacje, pola filtracyjne, stawy biologiczne. Trwają analizy skuteczności oczyszczalni roślinno-gruntowych, stawów ściekowych, filtrów gruntowych i drenaży rozsączających. W oczyszczalniach trzcinowych osiągane są wysokie efekty oczyszczania, zarówno w zakresie redukcji zawiesiny, jak i BZT<sub>5</sub> oraz związków biogenych [132]. Stwierdzono, że w oczyszczalniach trzcinowych zachodzi wysokoefektywne usuwanie ze ścieków metali ciężkich, które kumulują się w złożu gruntowym [111]. Oczyszczalnie z udziałem roślin stanowią alternatywę dla małych oczyszczalni ścieków. Pierwsza tego typu oczyszczalnia powstała w latach pięćdziesiątych w Izraelu, a w Europie w latach sześćdziesiątych [109].

Z wielu publikacji [20, 21, 22, 112, 135] poświęconych analizie osadów ściekowych wynika, iż charakteryzują się one z jednej strony wysoką wartością nawozową, dzięki zawartości podstawowych biogenów (N, P oraz Mg, Ca), z drugiej zaś – skażeniem sanitarnym, a czasami również podwyższoną zawartością metali ciężkich. Wykorzystanie osadów ściekowych w celu zwiększenia plonów wydaje się być celowym działaniem i stanowiło tematykę wielu prac naukowych. Problematyką tą zajmowali się m.in. Kutera, Czyżyk, Kuczewski, Wierzbicki, Nowak, Reszel, Pałuch, Głowacka [23, 59, 60, 61, 70, 80, 103]. Wprowadzanie ścieków do gleby wpływa istotnie na zmianę struktury i składu chemicznego gleby, również osady ściekowe mogą mieć dużą wartość glebotwórczą i nawozową.

Osady ściekowe powstają i będą powstawały, dlatego też prowadzone są liczne badania na temat skuteczności stosowanych procesów utylizacji. Przyrodnicze i rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych zależy nie tylko od składu chemicznego (zawartości substancji organicznych), substancji nawozowych i metali ciężkich. Aktualnie trwają również badania pod kątem ilościowej oceny występowania w osadach ściekowych substancji toksycznych, takich jak WWA, PCDD, PCDF, PCB i EDC, AOX [8, 22, 40, 41].

Badania i próby unieszkodliwiania osadów poprzez spalanie nie przyniosły oczekiwanych rezultatów. Proces spalania zmniejsza znacząco ilość osadów, ale może przyczynić się do zanieczyszczenia powietrza dioksynami [8, 9, 81].

Ilość powstających osadów ściekowych wciąż zwiększa się, podczas gdy dysponujemy tylko kilkoma praktykowanymi metodami utylizacji. W związku z tym, głównym kierunkiem zagospodarowania osadów jest wykorzystanie przyrodnicze, przede wszystkim do rekultywacji terenów zdegradowanych przez przemysł. Powstało wiele opracowań naukowych potwierdzających zalety stosowania osadów ściekowych do rekultywacji terenów poprzemysłowych [26, 86, 88, 89].

Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych oraz ich stan sanitarny decydują o wykorzystaniu osadów. Często w osadach ściekowych stwierdza się przekroczenie wartości dopuszczalnych stężeń metali ciężkich, co dyskwalifikuje wykorzystanie ich na cele rolnicze. Z uwagi na częste przekroczenia norm dotyczących metali ciężkich ok. 60% osadów ściekowych może być wykorzystywanych na cele nierolnicze, natomiast większość z nich nadaje się do utrwalania powierzchni i rekultywacji gruntów, jako przekładki na składowiskach odpadów oraz pod zieleń miejską [143]. Przy stosowaniu osadów w rolnictwie dawkę osadu należy ustalać indywidualnie dla każdej partii osadu – wartość nawozowa zależy bowiem od rodzaju i koncentracji osadu ściekowego. Polski kodeks dobrej praktyki rolniczej zakłada, że dawka roczna nawozu naturalnego nie może przekraczać jego ilości zawierającej 170 kg azotu całkowitego na 1 ha użytków rolnych. Dawkę suchej masy dla określonego arealu gruntowego ustala się w oparciu o zapotrzebowanie rośliny na azot [133]. Technika wprowadzania osadów do gruntu (rekultywowanego) zależy od konsystencji osadu. W Polsce najszersze zastosowanie ma osad ziemisty, natomiast osad mazisty oraz osady płynne nie znajdują szerokiego zastosowania zwłaszcza do użyźniania podpowierzchniowego (wstrzykiwania osadu do gruntu). Sposoby wykorzystania płynnych osadów ściekowych:

- deszczowanie, przy zastosowaniu zraszaczy o dużych średnicach dysz,
- nawodnienia powierzchniowe, szczególnie na użytkach zielonych,
- nawożenie wgłębne gleby (dotyczy to osadów o dużej koncentracji) – grunty orne.

Charakterystyka reologiczna osadów umożliwia podjęcie decyzji o sposobie utylizacji uwodnionych osadów ściekowych. Pogłębienie wiedzy na temat możliwości ich utylizacji z uwzględnieniem charakterystyki płynięcia i zmienności parametrów reologicznych wraz z koncentracją stanowi cel niniejszej publikacji.

### **3.5. Stan formalno-prawny w zakresie gospodarki osadami**

W załączniku 1 umieszczono obowiązujące przepisy i rozporządzenia regulujące gospodarkę odpadami komunalnymi. Poniżej przedstawiono ich interpretację.

Obowiązujące przepisy dotyczące wykorzystania osadów ściekowych zawarte są w Rozporządzeniu Ministra Środowiska (RMŚwOK) z dnia 1 sierpnia 2002 r. (Dz. U.02.134.1140) w sprawie komunalnych osadów ściekowych. Wymagania stawiane komunalnym osadom ściekowym, co do zawartości metali ciężkich oraz stanu sanitarnego, są precyzyjnie określone. Sposób zagospodarowania osadów uzależniony jest

od stopnia ich ustabilizowania [6, 57, 108, 136]. Według niemieckiej normy DIN – EV 1058 przy określaniu stabilności osadu należy uwzględnić:

- cechy fizyczne stabilizowanego osadu,
- ograniczenie agresywnego wpływu osadów ściekowych na środowisko,
- zmniejszenie masy osadu.

EPA (Environmental Protection Agency) wprowadziła standardy dla użytkowania i utylizacji osadów ściekowych, które wymagają, aby osady przed zastosowaniem były ustabilizowane [127]. Polskie przepisy również zawierają informacje dotyczące stabilizowania osadów, jednak nie precyzują kryterium, według którego można stwierdzić, że dany osad jest ustabilizowany. Według RMŚwOK osad ustabilizowany to taki, który nie zawiera substancji organicznych podatnych na rozkład biologiczny lub zawiera je w ilościach minimalnych, ma niską intensywność oddychania, nie zawiera patogenów, jak również substancji szkodliwych oraz nie jest uciążliwy zapachowo. RMŚwOK nie podaje jednak jednoznacznego kryterium, które stanowi podstawę do podjęcia decyzji, czy osad jest ustabilizowany, czy nie. Zgodnie ze standardami proponowanymi przez EPA przyjmuje się, że kryterium stabilizacji stanowi zawartość związków organicznych poniżej 50%.

W praktyce gospodarowania osadami ściekowymi konieczne jest również uwzględnienie lokalizacji wykorzystania osadów ściekowych. Lokalizacja ta musi wynikać z planów gospodarki odpadami powstałymi na bazie planów zagospodarowania przestrzennego oraz uwzględnić ryzyko zanieczyszczenia źródeł wody do spożycia. Należy także brać pod uwagę klasyfikację rodzajów gruntów, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dz. U. 02.165.1359).

W RMŚwOK określono również wymagania dotyczące składu jakościowego gleb przeznaczonych pod rolnicze wykorzystanie. Wielkość dawki zależy m.in. od rodzaju gruntu, sposobu jego użytkowania, zapotrzebowania roślin na azot i fosfor. Dawki nie mogą przekraczać możliwości sorpcyjnych gleb i potrzeb pokarmowych roślin. Zawartość metali ciężkich w glebie nie powinna przekraczać norm ustalonych w Rozporządzeniu. Osady ściekowe mogą być stosowane na gruntach, których odczyn jest nie mniejszy niż pH 5,6. W cytowanym rozporządzeniu są również podane tereny, na których nie można stosować osadów, m.in. na obszarach parków krajobrazowych, w bezpośredniej bliskości stref ochrony ujęć wody.

Dokonany przegląd piśmiennictwa w zakresie zagrożenia sanitarnego wskazuje raczej na hipotetyczne niebezpieczeństwo rozwoju drobnoustrojów chorobotwórczych [70]. Dotychczas nie zanotowano występowania przypadków szczególnego zagrożenia dla zdrowia i życia ludzi, wynikającego z wprowadzenia w życie RMŚwOK. Jednakże takiego ryzyka nie można wykluczyć.

### 3.6. Zastosowanie reologii w technologii oczyszczania wody i ścieków

Reologia jest to nauka o plastycznej deformacji (odkształceniach) oraz płynięciu materiałów. Zadaniem reologii jest określenie równania wiążącego naprężenia z odkształceniami [28, 30, 43, 104]. W pracach związanych z poznawaniem reologicznych cech układów dyspersyjnych stosuje się metody [30, 43]:

- a) teorii strukturalnych – teorii modelowania,
- b) teorii modeli reologicznych.

W przypadku cieczy newtonowskich naprężenie ścinające jest proporcjonalne do szybkości ścinania, a lepkość stanowi współczynnik proporcjonalności między tymi wielkościami. Zależność naprężenia ścinającego od prędkości deformacji jest zależnością liniową. Lepkość w płynach newtonowskich jest wartością stałą mogącą ulegać zmianie jedynie pod wpływem zmian temperatury i ciśnienia. W układach składających się z dwóch faz – ciągłej i rozproszonej przepływ można analizować w dwóch wariantach, tj. jako przepływ w zakresie newtonowskim i nienewtonowskim. Na własności reologiczne takich układów mają wpływ wielkości takie jak: lepkość fazy ciągłej, rozmiar cząstek, kształt cząstek, koncentracja cząstek stałych [30, 43]. Einstein opracował zależność lepkości od koncentracji objętościowej małych cząstek kulistych, zawieszonych w płynie w następującej postaci:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + 2,5 \cdot C_v) \quad (1)$$

$\eta$  – lepkość mieszaniny,

$C_v$  – koncentracja objętościowa cząstek stałych,

$\eta_0$  – lepkość cieczy nośnej.

Dla uwzględnienia wpływu kształtu cząstek Kahn uogólnił wzór (1) następująco:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + B \cdot C_v) \quad (2)$$

gdzie:  $B \geq 2,5$

Zgodnie z podanymi wyżej zależnościami lepkość powinna liniowo rosnać wraz z koncentracją objętościową mieszaniny. Jednakże wzajemne oddziaływania cząstek substancji rozpuszczonej powodują wyraźne odstępstwa od tego prawa. Zależność naprężenia i prędkości deformacji, w przypadku płynów nienewtonowskich, nie jest zależnością liniową. Zastosowanie reologii w technologii wody i ścieków wiąże się z nienewtonowskim charakterem płynięcia osadów [8, 9, 51, 93, 94, 95, 96, 102, 128].

Osady ściekowe są układami dyspersyjnymi i opis własności hydromechanicznych nie może opierać się na modelu Newtona, ponieważ lepkość jest parametrem zależnym nie tylko od temperatury, ciśnienia i rodzaju osadu, ale również prędkości płynięcia, a niekiedy od czasu, a także wielkości i kształtu cząsteczek fazy rozproszonej [93, 94, 95, 96]. Ustalenie pełnej charakterystyki osadów jest możliwe po uwzględnieniu własności reologicznych, które pozwalają na optymalne zaprojektowanie przepływu w instalacjach pompowo-rurowych [44, 45, 46, 47, 49]. Zastosowanie reologicznej charakterystyki jest również ważne w procesach jednostkowych takich jak: mieszanie, hydrotransport [48] oraz w procesie fermentacji, kondycjonowania, itp. Poprzez wykorzystanie



parametrów reologicznych jako jednego z parametrów kontrolnych można usprawnić prace oczyszczalni ścieków [1, 2, 4, 5, 9, 10, 12, 25, 27, 31, 63, 68, 78, 79, 84, 90, 93, 94, 95, 96, 100, 102].

Osady ściekowe mające zmienną lepkość pozorną, wymagają do opisu ruchu eksperymentalnych krzywych płynięcia, tj. zależności naprężenia stycznego od prędkości deformacji, co w dalszej kolejności pozwala określić parametry reologiczne dla przyjętego modelu reologicznego. Parametry reologiczne osadów powstających w wyniku oczyszczania wody i ścieków zależą od [93, 95]:

- a) własności fazy rozpuszczonej, jaką stanowi zawiesina mineralna i organiczna;
- b) własności fazy rozpraszającej – wody;
- c) zawartości rozpuszczonych związków mineralnych, organicznych i koloidów oraz wzajemnego współdziałania między nimi.

Własności cieczy nienewtonowskich przedstawia się za pomocą modeli, których parametry reologiczne nie zależą od czasu. W pracy Kempnińskiego [45] stwierdzono, że prawie wszystkie mieszaniny quasi-jednorodne zachowują się podczas transportu hydraulicznego jak ciała reostabilne. Zastosowanie reologii w technologii wody i ścieków było przedmiotem wielu badań [1, 2, 4, 5, 9, 10, 12, 25, 27, 31, 63, 68, 78, 79, 84, 90, 93, 94, 95, 96, 100, 102]. Stwierdzono, że ścieki, w tym osady ściekowe, wykazują cechy ciała pseudoplastycznego. Do opisu zachowania ciała pseudoplastycznego stosuje się model dwuparametrowy de Waale Oswalda. Natomiast prace Kempnińskiego [45], Czabana [19], Sozańskiego [93, 95] zawierają analizę praktycznych zastosowań modeli o trzech parametrach opisujących mieszaniny o zachowaniu plastyczno-lepkim. Według badań Sanina, Hiemenza i Rajagopalana [za: 82] takie właściwości osadów, jak rozmiar cząstek stałych, kształt, elastyczność, ładunek powierzchniowy, rozpuszczalność, flokulacja, decydują o charakterystyce płynięcia osadów. Zdaniem Sozańskiego [93, 95] zdecydowany wpływ na własności reologiczne osadów mają siły przyciągania i odpychania pomiędzy cząsteczkami fazy rozpuszczonej. Praktyczne zastosowanie pomiarów wiskozymetrycznych wynika z zależności między strukturą osadów ściekowych a ich właściwościami reologicznymi oraz z zależności pomiędzy strukturą osadów a technologicznymi charakterystykami ich unieszkodliwiania [9, 93, 104]. Zmiana struktury osadu doprowadza do osłabienia sił wiążących wodę z powierzchnią cząstek fazy stałej i łatwiejszego usuwania wody w procesach mechanicznego odwodnienia osadów [93, 95]. Proces odwadniania zależy od dobrej separacji pomiędzy osadem a wodą. Odwadnianie osadów ściekowych polega na obniżeniu zawartości wody tak, aby końcowe uwodnienie mieściło się w granicach od 50 do 88% [2, 9]. Woda wolna jest usuwana z osadu w procesie zagęszczania. Woda kapilarna, występująca w zakresie uwodnień 50–80%, usuwana jest w procesie odwadniania mechanicznego lub naturalnego, natomiast woda związana absorpcyjnie likwidowana jest w procesach suszenia. Odwadnianie mechaniczne usuwa z osadów wodę wolną oraz wodę kapilarną [64, 145]. Osady odwadniane w urządzeniach mechanicznych najczęściej posiadają konsystencję mazistą, która utrudnia ich rolnicze wykorzystanie. Do celów rolniczych najkorzystniejszą jest stosować osady o konsystencji płynnej lub ziemistej [9, 61, 86, 88, 89, 103]. Osad płynny to osad zawierający do 10% suchej masy. Podatność osadów do stabilizacji lub ostatecznego unieszkodliwiania zależy od następujących własności technologicznych: charakterystyki

postaci wody występującej w osadzie, oporu właściwego osadu na odwadnianie, ciepła spalania i wartości opałowej osadu, lepkości i charakterystyki płynięcia osadu [3].

Pomiary lepkości osadu zostały wykorzystane po raz pierwszy do automatycznej kontroli dawki polimeru przy odwadnianiu w Kanadzie [69]. Osady ściekowe są kondycjonowane z dodatkiem polimerów w celu poprawy efektywności odwadniania na prasach lub w wirówkach. Zależności pomiędzy parametrami reologicznymi a dawką polimerów stanowiły również istotę badań Bienia [9, 10, 11], według którego można stosować parametry reologiczne jako parametry kontrolne w dozowaniu polimerów w trakcie odwadniania. Wniosek ten potwierdzają również prace Mohammada M. Abdu-Orf'a oraz Campbell'a [za: 1, 9]. Kondycjonowanie ścieków za pomocą polielektrolitów przed odwadnianiem oraz sprawdzenie efektów mieszania na kondycjonowanie stanowiło podstawę tych badań. Zaobserwowali oni, że granica płynności kondycjonowanego osadu zwiększa się wraz z dodawaniem polimeru aż do osiągnięcia optymalnej dawki. Odnotowano, iż najniższy spadek lepkości koresponduje z naprężeniem maksymalnym i zwiększa się wraz z dodawaniem polimerów. Badania przeprowadzone przez Bienia, Abdu-Orf'a, Campbell'a [za: 1, 9, 11, 25] dotyczyły różnych polielektrolitów dostępnych na rynku. Autorzy ci sugerowali możliwość prognozowania wg krzywych płynięcia kondycjonowanych osadów, dla jakiej dawki polielektrolitu będzie zachodziło optymalne odwadnianie.

Wysoki koszt polielektrolitów stosowanych w procesie kondycjonowania powoduje poszukiwanie innych metod usprawnienia procesu odwadniania. Prowadzone są prace [9] określające możliwości zastosowania ultradźwięków w procesie odwadniania. Tematyką tą zajmował się Forster [31], który zaobserwował zmniejszanie się wartości progu płynięcia pod wpływem ultradźwięków. Odnotował również, że na zmniejszenie się progu płynięcia ma wpływ dodawany do osadów chlorek żelaza. Podobny efekt wystąpił przy dodawaniu organicznych polimerów.

Zmienna struktura osadów w jednostkowych procesach oczyszczania również wpływa na zmianę cech reologicznych. Powstają liczne opracowania analizujące cechy reologiczne osadów w połączeniu z procesami zmieniającymi ich strukturę, np. mieszanie, fermentacja tlenowa, wpływ koagulacji. Zmiany cech reologicznych osadów ściekowych w trakcie fermentacji stanowiły istotę pracy Moellera, Torresa, a także Monteiro [67, 68]. Badacze ci zaobserwowali dużą redukcję lepkości w trakcie procesu fermentacji. Według Monteiro [68] stopień przefermentowania ma większy wpływ na reologiczne własności osadu niż koncentracja cząstek stałych. Natomiast rezultaty wielu badań [45, 63] wykazują, że koncentracja części stałych jest głównym parametrem decydującym o zmianie własności reologicznych.

Sanin [82] analizował cechy reologiczne osadu wraz ze zmianami pH w reaktorach biologicznych. Jego obserwacje wskazują, iż najniższa lepkość występowała przy pH 5,5. Jednocześnie ze wzrostem pH mierzona lepkość zwiększała się. Autor ten łączy zaobserwowany efekt z występowaniem punktu izoelektrycznego dla bakterii (pH 2–4).

Sozański [93, 95] przeprowadzał doświadczenia mające na celu określenie zmian cech reologicznych pod wpływem zmian temperatury. Zaobserwował, że występujące

zmiany są wyraźniejsze w przypadku mniejszych koncentracji. Autor ten analizował również zastosowanie praktyczne parametrów reologicznych do określenia przepływu w rurach oraz spływu po płaskiej powierzchni [96].

Osad czynny powinien charakteryzować się dobrze rozwiniętą powierzchnią właściwą, a także dobrze sedimentować. Częstym problemem oczyszczalni ścieków jest również proces „puchnięcia” osadu, spowodowany m.in. nadmiernym rozwojem bakterii nitkowatych [3, 34, 56, 62]. Puchnący osad zwiększa swoją lepkość i powoduje problemy z obsługą instalacji pompowo-rurowych. Parametrem pozwalającym stwierdzić pogorszenie się własności sedimentacyjnych osadu w przypadku, gdy osad jest spuchnięty, jest Indeks Objętościowy Osadu (IO). Parametr ten eksploatacysty stosują w celu określenia jakości osadu, choć jest on zawodny i niejednoznaczny. Im mniejsze wartości indeksu, tym korzystniejsze własności sedimentacyjne posiada osad. Generalnie, stary osad sedimentuje szybciej. Osad spęczniały to taki, którego indeks przekracza  $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , aczkolwiek znane są przypadki prawidłowej pracy oczyszczalni przy indeksie wynoszącym  $0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  [3].

Podejmuje się również badania wykorzystania parametrów reologicznych nie tylko jako parametru kontrolnego na oczyszczalniach ścieków, ale również jako parametru stanowiącego kryterium do rolniczego wykorzystania osadów. Głównym celem pracy Smilgina [92] było określenie cech reologicznych osadów ściekowych, wykorzystywanych do hydroobsiewu skarp utworów antropogenicznych. Z kolei badania zaprezentowane w pracy Dirkwagera i L’Hermite’a [27] poświęcone są określeniu cech reologicznych osadów poddawanych składowaniu i kompostowaniu.

Pomiary współczynnika lepkości można wykonać, stosując metody opracowane na podstawie teorii Poiseuille’a bądź Stokesa. Bezpośrednie określenie zależności pomiędzy szybkością ścinania a naprężeniem stycznym jest możliwe za pomocą wiskozymetrów rotacyjnych typu stożek-płytki oraz przyrządów o cylindrach współosiowych. Pośrednie wnioskowanie, na podstawie pomiarów zmian ciśnienia i objętościowego natężenia przepływu, jest możliwe za pomocą wiskozymetrów rurowych, jak również kapilarnych [71, 72, 73, 74, 104]. Analiza możliwości zastosowania różnych rodzajów wiskozymetrów do oceny cech reologicznych osadów stanowiła istotę badań [71, 74, 90, 93, 102]. Slatter [90] zdecydował się na użycie wiskozymetru rotacyjnego i systemu MV1P, natomiast Wichmann i Riehl [102] przeprowadzali pomiary za pomocą wiskozymetru z systemem łopatkowym. Poitou, Racineux i Burlion [78] wykonywali również próby z wykorzystaniem różnych typów wiskozymetrów, analizując zmiany cech reologicznych osadów pod wpływem dysocjacji wody. Analiza zastosowań praktycznych i określenie spadku ciśnienia w wiskozymetrze rurowym stanowiły istotę badań Kempnińskiego i Smilgina [45, 92]. Parzonka [71, 74] przedstawił analizę zastosowań wiskozymetrów rotacyjnych i rurowych oraz zaproponował metodykę pomiarów dla mieszanin gruntowo-wodnych. Battistoni [4] sugeruje, iż nie ma opracowanej metodyki pomiarów wiskozymetrycznych w przypadku osadów ściekowych.

Zmienna w ciągu technologicznym koncentracja osadów utrudnia dokonanie pomiarów reologicznych. Autorzy wielu prac [9, 16, 44, 45, 49, 51, 53, 95] dowiedli, że koncentracja osadu ma istotne znaczenie dla określenia parametrów reologicznych. Pomiary

wiskozymetryczne osadów ściekowych są trudne w realizacji, gdyż podczas pomiaru tworzą się agregaty cząstek, często sedimentujące. Brak jest również jednoznacznego kryterium co do wyboru rodzaju wiskozymetru. Nie ma też opracowanej metodyki pomiarów wiskozymetrycznych dla osadów ściekowych, głównie z uwagi na problemy związane z pomiarem lepkości osadu czynnego biologicznie. Niniejsza praca dotyczy poszerzenia wiedzy na temat parametrów reologicznych w związku z brakiem wystarczających informacji na temat ich charakterystyki płynięcia.

## 4. Badania własne

Badaniom poddano próby osadów pochodzących z siedmiu oczyszczalni ścieków (tab. 1), których cechą wspólną było wykorzystywanie technologii osadu czynnego w procesie technologicznym. Do badań użyto prób pobranych z komór denitryfikacyjno-nitryfikacyjnych, osadnika wstępnego, osadnika wtórnego i komory zagęszczania osadów. Analizę wpływu zmian temperatury na parametry reologiczne wykonano dla osadów pochodzących z oczyszczalni ścieków w Rostocku (Niemcy) [50].

Tabela 1  
Table 1

Zestawienie analizowanych oczyszczalni ścieków  
Specification of analysed waste water treatment plant

Lokalizacja oczyszczalni Waste-water treatment plant location	Typ oczyszczalni Waste-water treatment plant type	Przepus- towość projekto- wana Flow capacity	Roczna ilość osadu Annual amount of sludge	Sposób odwadniania Sludge dewatering	Sposób wykorzystania Waste utilization
		[m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> ·rok <sup>-1</sup> ]		
Oleśnica	mechaniczno- -biologiczna mechanical and biological treatment plant	15 000	4965	zagęszczanie mechaniczne mechanical sewage sludge thickening	składowanie waste storage
Namysłów	mechaniczno- -biologiczna mechanical and biological treatment plant	8 500	1092	zagęszczanie mechaniczne sewage sludge thickening	wykorzystanie rolnicze agricultural use
Sieradz	mechaniczno- -biologiczna mechanical and biological treatment plant	15 000	–	zagęszczacz bębnowy wirówka sludge densifier basket centrifuge	składowanie waste storage

Tabela 1 cd.  
Table 1 cont.

1	2	3	4	5	6
Błaszki	mechaniczno- -biologiczna mechanical and biological treatment plant	1 066	–	prasa Monobelt Monobelt press	składowanie waste storage
Brzeg	mechaniczno- -biologiczno -chemiczna mechanical, biological and chemical treatment plant	18 000	2729,51 ton	prasa komorowa press chamber	wykorzystanie rolnicze agricultural use
Bolesławiec	mechaniczno- -biologiczna mechanical and biological treatment plant	10 000	–	prasa filtracyjna filter-press	wykorzystanie rolnicze agricultural use
Wrocław Janówek	mechaniczno- -biologiczna mechanical and biological treatment plant	70 000	46 000 ton	prasa filtracyjna filter-press	składowanie waste storage
Rostock	mechaniczno- -biologiczna mechanical and biological treatment plant	65 000	–	prasa filtracyjna filter-press	kompostowa- nie composting

Szczegółowy opis ciągu technologicznego oczyszczalni ścieków w Rostocku znajduje się na stronie internetowej <http://rostock.eurwasser.de/zka.htm>  
Details about waste-water treatment plant in Rostock can be found at <http://rostock.eurwasser.de/zka.htm>

## 4.1. Krótka charakterystyka obiektów badawczych

### ➤ Oczyszczalnia ścieków w Oleśnicy

Miejska oczyszczalnia ścieków w Oleśnicy oczyszcza ścieki komunalne i przemysłowe, a ilość, która jest doprowadzana w czasie pogody bezdeszczowej, wynosi  $180,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Doprowadzone kolektorem ścieki, poprzez komorę połączeniową, dopływają do dwudzielnej pompowni głównej. Pompy (typ CP 3300 Mn, produkcji Flygt, rurociągami tłocznym DN 800) dostarczają je do komór oczyszczalni mechanicznej. Składa się ona z dwóch niezależnych ciągów, w których z przepływających ścieków usuwane są: piasek, osady wstępne i zanieczyszczenia flotujące. Osady i części pływające podawane są pompami osadowymi do zbiorników osadów. Część mechaniczna służy do przygotowywania ścieków do dalszego unieszkodliwiania. Zasadnicze procesy eliminowania zanieczyszczeń odbywają się w części biologicznej. Ścieki pozbawione zanieczyszczeń wstępnych mieszane są z odtlenionym osadem powrotnym, a następnie wprowadzane do komór beztlenowych, gdzie następuje proces denitryfikacji. Następnie poprzez komorę rozdziału przepływają do przemiennie pracujących komór osadu czynnego, gdzie są silnie napowietrzane. Instalacja natleniająca składa się z wielostrumieniowych szybów napędzanych sprężonym powietrzem z zastosowaniem technologii średnio- i pełnowymiarowego napowietrzania. W oczyszczalni znajdują się dwie komory osadu czynnego, każda o powierzchni  $F_1 = 1090 \text{ m}^2$ . Pojemność pojedynczej komory, przy średnim wypełnieniu ok. 3,5 m, wynosi  $V_1 = 3924 \text{ m}^3$ , a średnie obciążenie ładunkiem BZT<sub>5</sub> –  $429,2 \text{ g O}_2 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Ścieki oczyszczone biologicznie odpływają do osadników wtórnych, gdzie następuje wydzielenie osadu recyrkulowanego i nadmiernego. Oczyszczone ścieki przez koryto pomiarowe odprowadzane są do odbiornika – kanał ulgi KO-1, stanowiącego dopływ rzeki Oleśnicy. Z obiegu osadu część (osad nadmierny) jest wydzielona do odrębnego zagęszczania i pompami osadu surowego przetłaczana do zbiornika magazynowania. Magazynowany osad w komorze ulega naturalnemu zagęszczaniu i odwadnianiu. Proces końcowego odwadniania przeprowadzany jest z zastosowaniem urządzeń mechanicznych z dodatkiem koagulanta.

Przewidziano możliwość deponowania osadów z pośrednim składowaniem wraz z piaskiem i skratkami na lagunie. Obecnie osad wywożony jest na składowisko miejskie. Dla ewentualnego podwyższenia efektywności usuwania fosforu z cieczy nadosadowej, pochodzącej z odwadniania osadu, przewidziano możliwość dodatkowego strącania fosforu na drodze chemicznej – w zbiorniku defosfatacji. Prowadzono również współpracę z firmą Ekopolgrunt, która zajmuje się zagospodarowaniem osadów ściekowych, uprawą roślin energetycznych oraz zagospodarowaniem osadów w postaci kompozytu mineralno-organicznego „Ekopolgrunt” [126]. W 2004 roku na oczyszczalni powstało  $4965 \text{ m}^3$  osadu (tab. 1).

### ➤ Oczyszczalnia ścieków w Namysłowie

Oczyszczalnia przeznaczona jest dla potrzeb miasta Namysłowa i oczyszcza ścieki komunalne oraz przemysłowe. Ilość doprowadzanych ścieków w czasie pogody bezdeszczowej wynosi  $6000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  (projektowana przepustowość  $8500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ). Ścieki

dopływają do oczyszczalni systemem kanalizacji grawitacyjnej. W swoim składzie zawierają rozpuszczone substancje organiczne i mineralne, zawiesinę, piasek i odpady stałe, które są kierowane na kratę mechaniczną gęstą typu Huber. Ścieki po oczyszczeniu mechanicznym płyną do piaskowników pionowych, gdzie następuje oddzielenie zanieczyszczeń mineralnych. Z dna piaskowników zanieczyszczenia pompowane są do separatora, w którym wyflukiwane są z piasku. Z piaskowników pionowych ścieki grawitacyjnie płyną do pompowni głównej, z której pompowane są do komory defosfatacji. Dalej ścieki przepływają do komór denitryfikacji i nityfikacji. Po przejściu przez komory osadu czynnego kierowane są do osadnika wtórnego, w którym następuje oddzielenie ścieków oczyszczonych od osadu czynnego. Osadnik wtórny radialny posiada objętość komory osadowej:  $V = 1112,0 \text{ m}^3$  przy powierzchni czynnej wynoszącej  $445,0 \text{ m}^2$ . Ścieki oczyszczone odprowadzane są do rzeki Młynówki, natomiast osad kierowany jest do komory stabilizacji tlenowej i zagęszczacza, o pojemności czynnej  $V_{cz} = 714 \text{ m}^3$ . Osad z tej komory jest następnie odprowadzany na prasę odwadniającą i po odwodnieniu wywożony w celu wykorzystania rolniczego bądź na składowisko komunalne.

Osady z oczyszczalni są wywożone do wsi Smarchowice Wielkie i tam wykorzystywane rolniczo. W 2004 roku na oczyszczalni powstało  $1092 \text{ m}^3$  ( $1110,24$  tony) osadu.

#### ➤ **Oczyszczalnia ścieków w Sieradzu**

Oczyszczalnia ścieków w Sieradzu jest oczyszczalnią mechaniczno-biologiczną z chemicznym strącaniem fosforu za pomocą koagulantu (PIX). Oczyszczalnia została zaprojektowana dla obliczeniowej ilości ścieków  $Q_{dsr} = 15000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ; obecnie doprowadzanych jest ok.  $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

Doprowadzone grawitacyjnie ścieki dopływają do komory ujęcia rurami o średnicy  $DN = 1000 \text{ mm}$ , a następnie odpływają grawitacyjnie płytkim kanałem żelbetowym do budynku krat. Oczyszczalnia mechaniczna składa się z piaskownika wirowego i osadnika wstępnego o średnicy  $D = 24 \text{ m}$ . Ścieki pozbawione zawiesiny w osadniku wstępnym odpływają grawitacyjnie rurociągiem  $DN = 800 \text{ mm}$  do głównej komory czerpальной pompowni ścieków. Zasadnicze procesy eliminowania zanieczyszczeń odbywają się w części biologicznej. Komory biologiczne są podzielone na trzy strefy technologiczne: strefa biologicznej defosfatacji (beztlenowa), strefa denitryfikacji (niedotleniona), strefa nityfikacji (natleniona).

Z bloku komór biologicznych ścieki odpływają grawitacyjnie do komory rozdzielczej, a następnie do osadnika wtórnego ( $D = 36 \text{ m}$ ). Oczyszczone ścieki odprowadzane są przez stację pomiarową i komorę połączeniową do odbiornika – rzeki Warty.

Gospodarka osadami oparta jest na układzie fermentacji metanowej realizowanej w WKF-ach. Proces końcowego odwadniania przeprowadzany jest z zastosowaniem urządzeń mechanicznych i z dodatkiem koagulantu.

#### ➤ **Miejsko-gminna oczyszczalnia ścieków w Błazkach**

Miejsko-gminna oczyszczalnia ścieków w Błazkach przeznaczona jest do oczyszczania ścieków bytowych metodą mechaniczno-biologiczną, ze wspomaganiami usuwania fosforu (PIX). Oczyszczalnia przeznaczona jest na potrzeby ok. 4500 mieszkańców.



Przyjmuje ona ścieki doprowadzane systemem kanalizacji oraz ścieki dowożone transportem asenizacyjnym. Maksymalny dobowy dopływ ścieków to  $Q_{d_{max}} = 1066 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Ścieki dowożone oraz dopływające siecią kanalizacyjną, po podczyszczeniu, doprowadzane są do komory rozdzielczej reaktorów wielofunkcyjnych. Ścieki dopływają do kraty gęstej schodkowej i piaskownika poziomo-wirowego, umieszczonego w komorze rozdzielczej reaktora wielofunkcyjnego. W komorze tej ścieki pozbawione zanieczyszczeń mineralnych mieszane są z osadem czynnym recykulowanym. Mieszanina ścieków i osadu trafia najpierw do komory ciśnieniowej, gdzie w warunkach wysokiego obciążenia zachodzi redukcja węgla organicznego i denitryfikacja azotu azotanowego.

Kolejna faza biologicznego oczyszczania ścieków przebiega w komorze beciśnieniowej. W czasie fazy tlenowej zawartość obu komór – ciśnieniowej i beciśnieniowej – mieszana jest i napowietrzana sprężonym powietrzem. Gdy ilość ścieków w komorze oczyszczania osiągnie odpowiedni poziom lub też upłynie czas napowietrzania, wstrzymany zostaje dopływ sprężonego powietrza do reaktora. Rozpoczyna się wówczas cykl sedymentacji. Dopływające do komory ciśnieniowej ścieki gromadzone są w reaktorze, powodując powolne i stopniowe podwyższanie się poziomu w obu komorach oczyszczania. Po osiągnięciu poziomu maksymalnego oraz zadowalającej sedymentacji osadu zdekantowane ścieki oczyszczone w sposób swobodny lub wymuszony przelewają się do koryt zbiorczych i dalej odpływają kanałem zrzutowym do odbiornika. W momencie gdy poziom cieczy w komorze ciśnieniowej osiągnie poziom minimalny, rozpoczyna się napełnianie reaktora i kolejny cykl biochemicznego oczyszczania ścieków. Usuwanie fosforu wspomagane jest preparatem PIX.

Osad nadmierny po mechanicznym odwodnieniu i przebadaniu może być zagospodarowywany przyrodniczo lub wywożony na składowisko przystosowane do tego typu odpadów.

### ➤ **Miejska mechaniczno-biologiczno-chemiczna oczyszczalnia ścieków w Brzegu**

Miejska mechaniczno-biologiczno-chemiczna oczyszczalnia przeznaczona jest do oczyszczania ścieków bytowych, poprodukcyjnych, wód opadowych, jak również ścieków garbarskich (na oczyszczalni jest wydzielony odrębny ciąg technologiczny do ich podczyszczenia). Ścieki z procesu odchromiania, po zmieszaniu z pozostałymi ściekami z garbarni, kierowane są na podczyszczalnię ścieków przemysłowych. Mechaniczna oczyszczalnia ścieków garbarskich zlokalizowana jest w części na terenie zakładu Garbarnia Brzeg S.A. (odtłuszczownik, krata i pompownia) i na terenie miejskiej oczyszczalni ścieków (zbiorniki wyrównawcze i osadniki).

Mechaniczne oczyszczanie ścieków realizowane jest w oparciu o kratę, piaskownik, i osadnik wstępny. Ścieki z lewobrzeżnej części miasta kierowane są do budynku krat wyposażonego w kratę rzadką o prześwicie 50 mm. Krata gęsta, o prześwicie między prętami 6 mm, oraz piaskownik i separator piasku zabezpieczają syfon (pod Odrą) przed zamuleniem. Ścieki z garbarni oraz z terenu tzw. „wyspy” przepływają przez urządzenie wyposażone w kratę mechaniczną z prasą i kratę ręczną (awaryjną). Zlokalizowano tu także punkt zlewny ścieków dowożonych wozami asenizacyjnymi. Ścieki kierowane są do zbiorczej przepompowni ścieków, stąd do piaskownika, a następnie do osadników wstępnych. Dalej przepływają do bloków, gdzie następuje biologiczne oczyszczanie, które

realizowane jest w oparciu o trójfazowy osad czynny A2/O – BARDENPHO z komorą predenitryfikacji, wspomagany przez symultaniczne, interwencyjne strącanie fosforanów za pomocą PIX-u. Podstawowe parametry technologiczne reaktora to:

- wiek osadu:  $W_o = 14$  d,
- stężenie biomasy osadu czynnego: ok.  $3,4 \text{ kg s.m.}\cdot\text{m}^{-3}$ ,
- obciążenie osadu ładunkiem:  $BZT_5 = 0,12 \text{ kg BZT}_5\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$

PIX dawkowany jest interwencyjnie do układu w komorze odpływowej, skąd ścieki spływają grawitacyjnie rurociągiem DN = 1100 mm do osadników wtórnych. Osad wydzielony w osadnikach jest zawracany, poprzez komorę predenitryfikacji, przed komorę osadu czynnego, do komory dopływowej, a osad nadmierny kierowany jest do zbiornika zagęszczania osadu.

W zbiorniku grawitacyjnego zagęszczania osadów rozdzielono osady garbarskie od wstępnych i wtórnych nadmiernych, ze względu na znaczącą zawartość pierwiastków i substancji utrudniających procesy beztlenowej stabilizacji przewidzianej w etapie III. Osad garbarski kierowany jest po zagęszczaczu bezpośrednio na prasę odwadniającą, a osady komunalne z zagęszczacza grawitacyjnego przepływają przez taśmowy mechaniczny zagęszczacz, po czym kierowane są do dwóch wydzielonych komór zagęszczacza, a dalej na prasy odwadniające i do stabilizacji chemicznej wapnem. Następnie osad kierowany jest na plac kompostowania, gdzie jest mieszany ze słomą, po czym wywożony do rolniczego wykorzystania. W roku 2004 na oczyszczalni powstało 2729,51 ton osadów ściekowych.

#### ➤ **Oczyszczalnia ścieków w Bolesławcu**

Oczyszczalnia przeznaczona jest dla potrzeb miasta Bolesławca i przyjmuje ścieki z miasta i wsi gminy Bolesławiec. Zasilana jest ściekami komunalnymi i przemysłowymi. W ciągu doby przez oczyszczalnię przepływa i zostaje oczyszczone ponad  $10\,000 \text{ m}^3$  ścieków, które dopływają do oczyszczalni systemem kanalizacji grawitacyjnej. Po usunięciu ze ścieków zanieczyszczeń stałych na kracie mechanicznej, płyną one do piaskowników, gdzie następuje oddzielenie zanieczyszczeń mineralnych, a następnie kierowane są na kratę gęstą. Z dna piaskowników zanieczyszczenia pompuje się do separatora piasku, w którym z piasku wyplukiwane są części organiczne. Następnie ścieki przepływają do osadników wstępnych (pojemność czynna:  $V_{cz} = 1800 \text{ m}^3$ ), z których kierowane są do komory mieszania. Dalej trafiają do bloków technologicznych, składających się ze strefy beztlenowej (denitryfikacji), strefy tlenowej (nitryfikacji) i osadnika wtórnego. W oczyszczalni przewidziano możliwość usuwania związków fosforu za pomocą preparatu PIX. W osadniku wtórnym (pojemność czynna:  $V_{cz} = 1221 \text{ m}^3$ ) następuje oddzielenie ścieków oczyszczonych od osadu czynnego. Po oddzieleniu ścieki oczyszczone odprowadzane są do rzeki Bóbr, natomiast osad kierowany jest do zagęszczania.

Osad odprowadzany jest do stacji odwadniania, gdzie następuje jego odwodnienie i higienizacja. Do stacji trafia również osad prefermentowany pochodzący z otwartych komór fermentacyjnych. Ze stacji odwadniania zhigienizowany osad trafia na składowisko osadu.

Powstający w procesie oczyszczania ścieków osad, Decyzją Wojewody Jeleniogórskiego (z dnia 14.10.1998 r.), a następnie Decyzją Starostwa Powiatowego w Bolesławcu (z dnia 18.01.2000 r.), został dopuszczony do stosowania w rolnictwie. Jako na-

wóz organiczno-wapienny uzyskał pozytywną opinię Instytutu Nawozów Sztucznych w Puławach. Analizy składu osadu wykonuje Instytut Ochrony Środowiska, oddział we Wrocławiu [142]. Osad ten wykorzystywany w rolnictwie spełnia kilka istotnych funkcji:

- koryguje kwaśny odczyn gleby;
- jest źródłem składników organicznych, które są niezbędne dla zachowania odpowiedniej struktury gleby;
- dostarcza roślinom podstawowych składników odżywczych oraz makro- i mikroelementów w ilościach porównywalnych z obornikiem (poza potasem, który należy uzupełniać, np. w postaci nawozów mineralnych).

### ➤ Wrocławska oczyszczalnia ścieków Janówek

Wrocławska Oczyszczalnia Ścieków jest oczyszczalnią mechaniczno-biologiczną z chemicznym wspomaganie usuwania związków fosforu. Doprowadzane są do niej ścieki ogólnospławne. Ścieki są oczyszczane mechanicznie na kratkach, w piaskowniku i osadniku wstępnym. Tak oczyszczone dopływają do dwóch bloków biologicznych, które podzielone są na dwie części mogące pracować niezależnie od siebie. Każdy z ciągów składa się z:

- komory rozdziału ścieków – gdzie następuje rozdział ścieków na poszczególne ciągi i do odpowiednich stref (część do strefy nityfikacji osadu, gdzie trafia całość osadu recyrkulowanego, a pozostała część bezpośrednio do strefy defosfatacji);
- komory denityfikacji osadu – gdzie doprowadzany jest osad recyrkulowany i część ścieków oczyszczonych mechanicznie; w warunkach beztlenowych następuje tu częściowa fermentacja osadu i wydzielanie się pewnej ilości lotnych kwasów tłuszczowych (LKT), niezbędnych do biologicznego usuwania związków biogenych, a zwłaszcza azotu;
- komory defosfatacji – gdzie w warunkach beztlenowych następuje uwalnianie fosforu przez komórki bakteryjne; uwolniony fosfor pobierany jest przez osad czynny w warunkach tlenowych, w strefie nityfikacji;
- komory denityfikacji ścieków – gdzie w warunkach anoksydacyjnych następuje rozkład azotanów (recyrkulowanych z komory nityfikacji) do azotu i tlenu, które uwalniane są do atmosfery;
- komory nityfikacji – wyposażonej w ruszt napowietrzający drobnopęcherzykowy, gdzie następuje utlenianie amoniaku do azotanów oraz usuwanie ze ścieków związków węgla, a także pobór fosforu uwolnionego wcześniej w strefie defosfatacji.

Z bloku biologicznego ścieki kierowane są do czterech osadników wtórnych, gdzie następuje oddzielenie zawiesiny osadu czynnego od ścieków. Oczyszczone ścieki przez kanał wylotowy kierowane są do odbiornika – do rzeki Odry [141].

Część osadową oczyszczalni tworzą:

- pompownia osadu nadmiernego, części pływających i osadu zagęszczonego do WKF lub awaryjnego zbiornika osadu;
- zagęszczacze osadu wstępnego i osadu przefermentowanego;
- zamknięte Wydzielone Komory Fermentacji (WKF);
- prasy filtracyjne do odwadniania osadu wraz z obiektami nawapniania i ewakuacji osadu.

Zatrzymany osad trafia do pompowni, skąd osad nadmierny tłoczony jest do budynku zagęszczania mechanicznego, a osad recykulowany trafia z powrotem do bloku biologicznego. Zagęszczony osad nadmierny tłoczony jest do zamkniętych wydzielonych komór fermentacji (WKF), gdzie w temp. 38°C następuje jego stabilizacja i wytwarzanie gazu fermentacyjnego. Podczas fermentacji osad jest mieszany (mechanicznie i za pomocą pomp recykulacyjnych).

Przefermentowany osad trafia do zagęszczaczy grawitacyjnych, skąd pobierany jest do mechanicznego odwadniania. Następnie, odwodniony i higienizowany, odwożony jest do miejsc jego ostatecznego wykorzystania. Na oczyszczalni wyodrębniony jest też ciąg technologiczny do odzyskiwania gazu.

Gospodarka osadami oparta jest na układzie fermentacji metanowej realizowanej w WKF-ach. Osady są składowane na lagunach, a następnie wywożone na składowiska specjalnie do tego celu przystosowane.

## 4.2. Metodyka opracowania wyników badań

W ciągu całego okresu badań wybrano reprezentatywne próby osadów ściekowych i poddano je analizie fizykochemicznej, mikrobiologicznej, i helmintologicznej. Przeprowadzone badania składu osadów ściekowych z analizowanych oczyszczalni oraz ocenę możliwości ich wykorzystania na cele nieprzemysłowe wykonano zgodnie z metodami referencyjnym określonymi w załączniku nr 4 i 5 do RMŚwOK [108].

Wyniki pomiarów fizykochemicznych, biologicznych, zostały poprzedzone omówieniem wykorzystywanej do badań metodyki w dalszych rozdziałach niniejszej pracy.

Równoległe przeprowadzono określenie parametrów dynamicznych, a w szczególności pomiarów reologicznych.

### ➤ Metodyka pomiarów wiskozymetrycznych

#### 1. Metodyka opracowania wyników

W pomiarach wykorzystano wiskozymetr VT550 firmy Haake o wirującym cylindrze wewnętrznym [117, 118, 119]. Jest to urządzenie pozwalające na pomiar naprężenia stycznego  $\tau$  przy różnych wartościach pseudoprędkości deformacji  $G_p$ . Zastosowany wiskozymetr rotacyjny zapewnia uzyskanie jednorodnego pola naprężeń w szczelinie pomiarowej, a po uzyskaniu warunków pełnego ścinania umożliwia wykonywanie ciągłych pomiarów zależności  $\tau = f(G_p)$ . Wiskozymetr wyposażony jest w dwa cylindry współosiowe o różnych średnicach. Wykorzystano system pomiarowy MV1 o szerokości szczeliny pomiarowej 0,96 mm. Badania wiskozymetryczne przeprowadzono zgodnie z metodyką podaną przez Kempnińskiego [45].

Pomiary wiskozymetryczne wymagają zapewnienia następujących warunków [83]:

- przepływu laminarnego,
- przepływu izotermicznie ustalonego,
- braku poślizgu,
- niezależności naprężeń stycznych od czasu ścinania – mierzona mieszanina powinna być reostabilna.

Reologiczne własności osadów ściekowych oparto na modelach układów reostabilnych, zakładających niezależność naprężeń stycznych od czasu ścinania. Założenie to zakłada brak tiksotropii w zakresie badanych koncentracji wagowych, spowodowane efektem homogenizacji wywołanej pracą mieszadeł i pomp, niszczącej strukturę wewnętrzną osadów ściekowych [45]. W przypadku pomiarów wiskozymetrycznych cieczy o cechach nienewtonowskich otrzymujemy tzw. pseudokrzywe płynięcia, tj. zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi a pozorną prędkością deformacji. Prawidłowe wyznaczenie parametrów reologicznych polega na transformacji pseudokrzywych płynięcia, uzyskanych bezpośrednio z pomiarów wiskozymetrycznych, na rzeczywistą krzywą płynięcia za pomocą równania Kriegera, Elroda i Marona oraz Šveca. Szczegółowy opis metodyki badań wiskozymetrycznych zarówno dla wiskozymetrów rotacyjnych, jak i rurowych, podano w pracach Parzonki [71, 72, 74], i Kempnińskiego [45, 46, 47].

## 2. Dobór modelu reologicznego

Po obliczeniu rzeczywistych gradientów prędkości deformacji przystąpiono do wyznaczania parametrów reologicznych. Istnieją dwie możliwości doboru modelu reologicznego:

- metoda grafo-analityczna – zaproponowana przez Parzonkę,
- metoda analityczna – zaproponowana przez Czabana.

W niniejszej pracy dobór matematycznej postaci modelu reologicznego oraz wyznaczenie parametrów reologicznych dokonano metodą analizy statystycznej rzeczywistych krzywych płynięcia według metodyki zaproponowanej przez Czabana [19].

### 4.3. Badania fizykochemiczne i bakteriologiczne analizowanych osadów

W rozdziale tym zaprezentowano omówienie wyników badań fizykochemicznych i bakteriologicznych osadów w końcowym etapie przeróbki, z uwzględnieniem zakresu oraz metod analitycznych [36].

#### ➤ Charakterystyka ogólna osadów

Do analizy wykorzystano nieodwodnione osady z siedmiu oczyszczalni ścieków komunalnych. Osady pobierane były z prawie całego ciągu technologicznego. Szczególną uwagę poświęcono próbom pobieranym z komór osadu czynnego oraz z osadnika wtórnego. Analizowano również próby osadu przed i po stabilizacji.

Badane osady charakteryzowała jednorodna struktura, odczyn lekko alkaliczny oraz stosunkowo niska zawartość substancji organicznych. Posiadały one specyficzny zapach osadowy. Barwa osadu po stabilizacji – ciemnoszara; osad przed stabilizacją był nieznacznie ciemniejszy.

- a) W celu określenia charakterystyki fizycznej osadów wykonano następujące oznaczenia:
- gęstość właściwa cząstek stałych  $\rho_s$ ,
  - wilgotność naturalna osadu  $W_n$ ,

- koncentracja wagowa  $C_s$ ,
- gęstość mieszaniny  $\rho_m$ ,
- zawartość części organicznych  $R$ .

Gęstość właściwą osadu czynnego  $\rho_s$  oraz wilgotność naturalną  $W_n$  wyznaczono w laboratorium Instytutu Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, zgodnie z normą PN-88/B-04481.

Wilgotnością  $W_n$  nazywamy stosunek masy wody  $m_w$ , zawartej w danej próbce osadu, do masy szkieletu gruntowego  $m_s$ . Wyznaczamy ją wzorem:

$$W_n = m_w \cdot m_s^{-1} \quad (3)$$

Wilgotność naturalna  $W_n$  pozwala na określenie wagowej koncentracji naturalnej osadu  $C_{s,n}$  według poniższej formuły:

$$C_{s,n} = 1 \cdot (1 + W_n)^{-1} \quad (4)$$

Koncentrację wagową mieszaniny  $C_s$  określono każdorazowo dla badanej próbki jako stosunek masy składnika suchego  $m_s$  do masy mieszaniny  $m_m$ :

$$C_s = m_s \cdot m_m^{-1} \quad (5)$$

Formuła wiążąca koncentrację wagową  $C_s$  z gęstością  $\rho_m$  i gęstością właściwą  $\rho_s$  jest następująca:

$$C_s = \frac{\rho_s \cdot (\rho_m - \rho_w)}{\rho_m \cdot (\rho_s - \rho_m)} \quad (6)$$

- Analiza granulometryczna badanych osadów wykonana została w Katedrze Biologii i Mikrobiologii Żywności na Wydziale Nauk o Żywności Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Umożliwia ona określenie rozmiaru i rozkładu cząstek. Badaniem objęto próby:
  - osadu nadmiernego,
  - osadu czynnego.
- Struktura osadu została przedstawiona za pomocą zdjęć skaningowych, które wykonane zostały w Pracowni Mikroskopii Elektronowej Wydziału Biologii i Hodowli Zwierząt Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Wykonano zdjęcia skaningowe dla prób:
  - osadu nadmiernego,
  - osadu czynnego.
- Analizę mikrobiologiczną i parazytologiczną wykonano w Zakładzie Biologii i Ekologii Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej zgodnie z metodyką (ATV) przyjętą do określenia mikroorganizmów w osadach ściekowych. W ramach badań określono:
  - obecność bakterii chorobotwórczych z rodzaju *Salmonella*;
  - liczbę żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris* sp., *Trichuris* sp., *Toxocara* sp. w kg s.m.;
  - skład gatunkowy w próbach osadu czynnego.

- e) Analizy chemiczne komunalnych osadów ściekowych wykonane zostały w Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej we Wrocławiu. Badania wykonano zgodnie z obowiązującym RMOŚwOK [108]. W przypadku braku określonej metodyki referencyjnej korzystano z wytycznych IUNG-owskich. Charakterystyka chemiczna obejmuje następujące oznaczenia:
- odczynu pH,
  - zawartości suchej masy w %
  - zawartości substancji organicznej w % s.m.,
  - zawartości azotu ogólnego, w tym azotu amonowego w % s.m.,
  - zawartości fosforu ogólnego w % s.m.,
  - zawartości wapnia i magnezu w % s.m.,
  - zawartości metali ciężkich: ołowiu, kadmu, chromu, miedzi, niklu, rtęci i cynku, w reprezentatywnej próbce osadu ściekowego, metodą spektrometrii absorpcji atomowej po mineralizacji mocnymi kwasami w  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  s.m.

### ➤ Charakterystyka fizyczna

Koncentracja wagowa osadu nadmiernego zmieniała się w przedziale od  $C_s = 1,14$  do 6,56%, natomiast dla prób osadów pochodzących z komór biologicznych od  $C_s = 1,06$  do 5,73%. Gęstość mieszaniny zmieniała się w przedziale od  $\rho_m = 1002$  do  $1015 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Najwyższa wartość wilgotności naturalnej dla osadu czynnego wynosiła  $W_n = 42122,22\%$  (próba pochodząca z oczyszczalni ścieków w Brzegu), zaś najniższa – 507,5% (próba pochodząca z oczyszczalni ścieków w Błaszczkach). W przypadku osadu nadmiernego wilgotność naturalna wynosiła od  $W_n = 4260,7\%$  (próba pochodząca z oczyszczalni ścieków w Brzegu) do  $W_n = 9578,61\%$  (próba pochodząca z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu). Zestawienie tabelaryczne określonych parametrów fizycznych dla wybranych oczyszczalni ścieków przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2  
Table 2

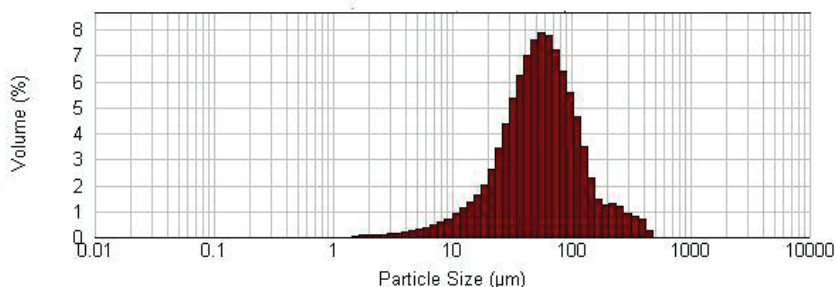
Zestawienie parametrów fizycznych osadu czynnego  
List of physical parameters of activated sludge

$\rho_s$	$W_n$	$R$	$C_s$
$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	%	%	%
Osady z oczyszczalni ścieków w Sieradzu Sludge from waste-water treatment plant in Sieradz			
1638,4	8231,9	46,48	1,22
Osady z oczyszczalni ścieków w Błaszczkach Sludge from waste-water treatment plant in Blaszkzi			
1557,7	507,5	53,58	1,64
Osady z oczyszczalni ścieków w Brzegu Sludge from waste-water treatment plant in Brzeg			
–	42122,2	68,33	2,30
Osady z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy Sludge from waste-water treatment plant in Olesnica			
1657,5	13530,8	64,795	0,73

### ➤ Analiza granulometryczna

Do pomiarów rozkładu wielkości cząstek naturalnych w osadach został wykorzystany granulometr laserowy Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments Ltd. Urządzenie to poprzez jednostkę optyczną analizuje rozproszenie światła na cząstce, a następnie w oparciu o teorię Mie oraz model Fraunhofera oblicza wielkość cząstki na podstawie światła na niej rozproszonego [121]. Wyniki pomiarów są prezentowane jako histogram pozwalający ocenić rozkład uziarnienia osadów.

Histogram wyświetla wynik jako klasy, każda kolumna przedstawia przedział wielkości cząstek, wysokość kolumny przedstawia odsetek próbki, która mieści się w tym przedziale. Krzywa częstotliwości jest wyliczana poprzez różniczkowanie pola pod krzywą [121]. Wartość szczytowa pokazuje, jak dobrze wyliczone zostały dane w stosunku do danych z pomiaru. Poniżej przedstawiono krzywą granulometryczną dla osadu nadmiernego pochodzącego z oczyszczalni w Oleśnicy (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowa krzywa granulometryczna dla osadu nadmiernego  
Fig. 1. An example of activated sludge grain size curve

Interpretacja histogramu:

Dla założonego współczynnika refrakcji 0,1 wartość szczytowa wynosi 0,382% i jest wartością poniżej 1%, co oznacza, że współczynnik refrakcji został dobrany prawidłowo [121]. Statystyki rozkładu są obliczane z wyniku, przy użyciu pochodnych średnic  $d$ , i jest to metoda określania średniej i innych danych rozmiaru cząstki:

- $d_{50}$  (średnia średnica masy) jest to rozmiar w mikrometrach, od którego 50% próbki jest mniejsza, a 50% próbki jest większa;
- $d_{10}$  jest to rozmiar w mikrometrach, poniżej którego znajduje się 10% próbki;
- $d_{90}$  to rozmiar w mikrometrach, poniżej którego znajduje się 90% próbki.

Uziarnienie oraz kształt cząstek mają istotny wpływ na własności reologiczne osadów ściekowych. Skład granulometryczny jest trudny do ustalenia, gdyż kłaczk podczas przepływu zmieniają swoją wielkość i kształt a łącząc się ze sobą, tworzą układy dyspersyjne. Jednakże maksymalne wymiary cząstek wbudowanych w strukturę kłaczek stanowią kryterium jednorodności osadu [95].



Tabela 3  
Table 3

Zestawienie wyników analizy granulometrycznej  
The list of grain size analyses results

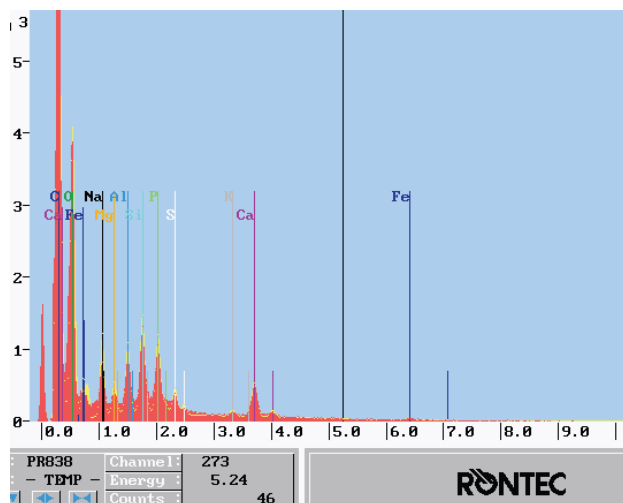
d <sub>10</sub>	d <sub>50</sub>	d <sub>90</sub>
μm	μm	μm
Osady z wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek Sludge from waste-water treatment plant in Wrocław „Janówek”		
53,981	135,397	258,119
Osady z oczyszczalni ścieków w Namysłowie Sludge from waste-water treatment plant in Namysłów		
16,854	47,802	116,682
Osady z oczyszczalni ścieków w Brzegu Sludge from waste-water treatment plant in Brzeg		
19,663	54,065	120,077
Osady z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu Sludge from waste-water treatment plant in Bolesławiec		
14,628	38,089	79,515
Osady z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy Sludge from waste-water treatment plant in Olesnica		
18,67	52,708	131,059

W tabeli 3 podano określone wielkości cząstek dla prób z wybranych oczyszczalni ścieków. Wielkość cząstek (średnia średnica masy) analizowanych prób osadu nadmiernego wahała się w granicach od 38,089 do 135,397 μm. Występujące wielkości pozwalają zakwalifikować osady ściekowe do frakcji pyłowych. Jak widać, zróżnicowanie składu granulometrycznego cząstek zdecydowanie zależy od rodzaju dopływających ścieków.

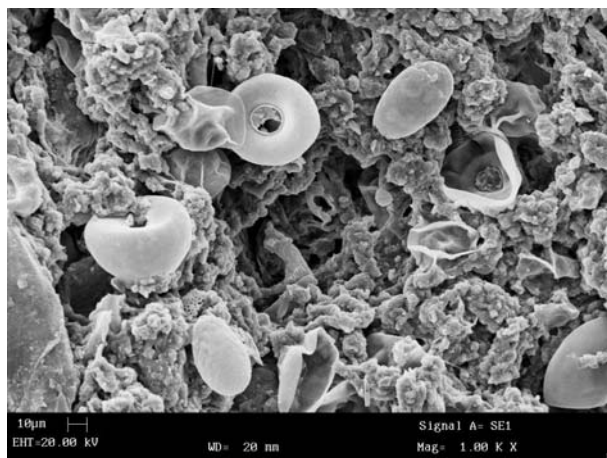
### ➤ **Badania skaningowe**

W celu określenia struktury analizowanych osadów wykonano zdjęcia za pomocą mikroskopu skaningowego LEO 435 VP firmy LEO (Zeiss+Leica). Urządzenie to pozwala przy użyciu przystawki rentgenowskiej, na oznaczenie składu pierwiastkowego badanej próby. Umożliwia ono oznaczenie pierwiastków, gdy ich zawartość jest większa od 0,01%.

W mikroskopach skaningowych wiązka elektronów bombarduje próbkę, część elektronów ulega rozproszeniu, a część wnika do wnętrza próbki, powodując emisję wtórnych elektronów. Pod wpływem wiązki elektronów próbka emituje różne sygnały (m.in. elektrony wtórne, elektrony wstecznie rozproszone, charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie), które są rejestrowane za pomocą odpowiednich detektorów, a następnie przetwarzane na obraz próbki lub widmo promieniowania rentgenowskiego [122, 123, 124]. Badania skaningowe pozwalają na przedstawienie budowy wewnętrznej elementów składowych komórki biologicznej i bakterii. Poniżej przedstawiono przykładową mikroanalizę powierzchniową dla osadu nadmiernego z oczyszczalni ścieków w Namysłowie (rys. 2).



Koncentracja pierwiastków



Odwzorowanie morfologii

Rys. 2. Mikroanaliza powierzchniowa  
Fig. 2. Surface microanalysis

Mikroanaliza punktowa składu chemicznego osadu nadmiernego umożliwiła określenie zawartości pierwiastków wchodzących w skład analizowanych prób. Do najważniejszych z nich zalicza się tlen i zawartość tego pierwiastka wynosiła O = 44, 65%.

Tlen wchodzi m.in. w skład wody, która jest elementem składu komórki bakteryjnej jak również stanowi środowisko reakcji biochemicznych. Węgiel jest z kolei podstawowym pierwiastkiem związków organicznych i jego zawartość wynosi C = 34, 84%. Ponadto w skład białek będących podstawowym związkiem budującym skład komórkowy wchodzi pierwiastki takie jak wapń (Ca = 1,99%), fosfor (P = 3,68%), potas

(K = 0,29%), siarka (S = 1,59%), sód (Na = 4,91%), magnez (Mg=1,43%) i żelazo (Fe = 0,31%). Oprócz tego składnikami analizowanej próby były: glin (Al. = 2,68%) i krzem (Si = 3,63%).

### ➤ Mikrobiologia

Osad czynny jest kłaczkowatym skupiskiem bakterii i pierwotniaków, które na drodze biochemicznej usuwają ze ścieków zanieczyszczenia. W skład mikroflory osadu czynnego wchodzi bakterie heterotroficzne i pierwotniaki (*Vorticella*, *Carchesium*, *Operularia*), często występują ameby, wiciowce i orzęski (*Ciliata*) [3]. Zanieczyszczenia organiczne są absorbowane na powierzchni kłaczek i mineralizowane.

Dobra sedymentacja osadu występuje, gdy w osadzie czynnym dominują następujące grupy mikroorganizmów: orzęski z nóżkami, wolno pływające orzęski, oraz gdy występują już w mniejszych ilościach wrotki, wiciowce i ameby. Dobrze pracujący osad zawiera w swoim składzie dużą ilość pierwotniaków z rodzaju *Vorticella* i *Opercularia*, oraz *Aspidisca costata*. O przebiegu procesów biochemicznego oczyszczania decydują warunki środowiskowe (napowietrzanie, wiek osadu), jak również skład gatunkowy osadu [3, 15, 29, 56, 62]. Badania mikroskopowe mają na celu ustalenie określonych bakterii zooglealnych, nitkowatych, pierwotniaków i grzybów. Obserwacje mikroskopowe pozwalają przewidzieć wyniki badań chemicznych, gdyż występowanie odpowiedniego rodzaju pierwotniaków jest skorelowane z wartościami BZT<sub>5</sub> [66].

Wyniki mikroskopowej analizy prób osadu czynnego przedstawiono w tabeli 4, natomiast zdjęcia przykładowego składu gatunkowego osadu czynnego – na fotografiach 1 i 2.

W analizowanych osadach stwierdzono również obecność trytonu w postaci ziaren piasku, resztek liści, naczyń przewodzących roślin iglastych i liściastych, włókien konopnych, włókien bawełnianych, mięsnych oraz resztek piór ptasich.

Osady pochodzące z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu (próba 1) charakteryzowały się ziemistą barwą, zapachem typowym dla osadu, a skład gatunkowy świadczył o dość dobrej pracy osadu czynnego. Próba 2 (osady pochodzące z oczyszczalni ścieków w Brzegu) również charakteryzowała się składem gatunkowym świadczącym o dobrej pracy osadu czynnego, dowodziła tego dość liczna obecność pierwotniaków. Nielicznie występowały bakterie nitkowate, jednak taka ilość może polepszać proces sedymentacji osadu czynnego. Rozproszone kłaczki świadczą o dobrym natlenieniu osadu. W próbie pochodzącej z oczyszczalni z Brzegu oznaczono również pojedyncze okazy sinic z rodzaju *Anabaena* – nietypowe dla osadu czynnego. Osady z wrocławskiej oczyszczalni ścieków *Janówek* (próba 3) posiadały barwę ziemistą, zapach typowy dla osadu czynnego, dość klarowny supernatant oraz skład gatunkowy świadczący o dość dobrej pracy osadu. W osadach pochodzących z oczyszczalni ścieków w Namysłowie (próba 4) i Oleśnicy (próba 5) obecne były także nieliczne okrzemki z rodzaju *Synedra* i *Melosira* oraz *Oscillatoria* – nietypowe dla osadu czynnego. W próbie pochodzącej z oczyszczalni ścieków w Namysłowie (próba 4) o dość dobrej pracy osadu świadczył skład gatunkowy, zwłaszcza obecność grupy orzęsków. Osad z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy (próba 5) również charakteryzował się składem gatunkowym potwierdzającym dość dobrą pracę osadu mimo licznie występujących bakterii nitkowatych, które mogą mieć wpływ na słabą sedymentację osadu czynnego.

Przykładowa analiza mikrobiologiczna osadu czynnego  
An example of microbiology analyses of activated sludge

Badany parametr Speciment test	Próba 1 Sample 1	Próba 2 Sample 2	Próba 3 Sample 3	Próba 4 Sample 4	Próba 5 Sample 5
Kłaczkowy osadu Floccule	Rozproszone Diffused	Lekko zbrylone Little aggregated	Zbrylone Aggregated	Rozproszone Diffused	Lekko zbrylone Little aggregated
Bakterie zooglealne Zooglea species	<i>Zooglea ramigera</i> – liczne	<i>Zooglea ramigera</i> – liczne	<i>Zooglea ramigera</i> – liczne	<i>Zooglea ramigera</i> – liczne	<i>Zooglea ramigera</i> – liczne
Bakterie nitkowate Bacteria filamentous species	Niezbyt liczne**	Bardzo liczne	Dość liczne	Niezbyt liczne	Bardzo liczne
Korzenionóżki Amoeba species	<i>Amoeba proteus</i> *** – nieliczne	<i>Amoeba proteus</i> – nieliczne	<i>Amoeba proteus</i> – nieliczne	<i>Amoeba proteus</i> – niezbyt liczne	<i>Amoeba proteus</i> – nieliczne
<i>Rhizopoda</i>	<i>Amoeba guttula</i> **** – dość liczne	<i>Amoeba guttula</i> – nieliczne	<i>Amoeba guttula</i> – liczne	<i>Amoeba guttula</i> – dość liczne	<i>Amoeba limax</i> – nieliczne
	<i>Arcella vulgaris</i> – nieliczne	<i>Arcella vulgaris</i> **** – bardzo liczne	<i>Arcella vulgaris</i> – bardzo liczne	<i>Arcella vulgaris</i> – bardzo liczne	<i>Arcella vulgaris</i> – niezbyt liczne
		<i>Diphlugia</i> sp. – nieliczne	<i>Centropyxis</i> sp. – nieliczne	<i>Diphlugia</i> sp. – nieliczne	<i>Diphlugia</i> sp. – nieliczne
		– dość liczne	– liczne	– liczne	– dość liczne
		<i>Euglena granulata</i>			<i>Euglena viridis</i>
Wiciowce z rodzaju <i>Bodo</i>		– nieliczne			– nieliczne
<i>Euglenophyta</i>					
Orzęski – <i>Ciliata</i>					
Wolno pływające Free-floating	<i>Loxodes rostrum</i> – nieliczne	<i>Loxodes rostrum</i> – niezbyt liczne	<i>Loxodes rostrum</i> – niezbyt liczne	<i>Loxodes rostrum</i> – niezbyt liczne	<i>Loxodes rostrum</i> – niezbyt liczne
					<i>Chilodon cocullulus</i> – niezbyt liczne

Tabela 4 cd.  
Table 4 cont.

1	2	3	4	5	6
Petzające po kłaczkach Floccule creeping	<i>Aspidisca costata</i> – niezbyt liczne	<i>Oxyricha sp.</i> – nieliczne	<i>Aspidisca costata</i> – dość liczne	<i>Aspidisca costata</i> – liczne	<i>Aspidisca costata</i> – nieliczne
			<i>Euplotes patella</i> – nieliczne		
		<i>Aspidisca costata</i> – nieliczne	<i>Euplotes patella</i> – nieliczne		
		<i>Vorticella mikrostoma</i> – nieliczne	<i>Vorticella campanula</i> – nieliczne	<i>Vorticella campanula</i> – niezbyt liczne	<i>Vorticella campanula</i> – niezbyt liczne
		<i>Carchesium epistylis</i> – dość liczne	<i>Carchesium epistylis</i> – nieliczne	<i>Vorticella mikrostoma</i> – nieliczne	<i>Vorticella mikrostoma</i> – liczne
Orzęski – Osiadłe			<i>Cothurniacyathus</i> – nieliczne	<i>Rabdostyla ovum</i> – sporadycznie <sup>Δ</sup>	<i>Carchesium epistylis</i> – dość liczne
		Nie stwierdzono <sup>ΔΔ</sup>	Nie stwierdzono	<i>Acineta flava</i> – sporadycznie	Nie stwierdzono
		Nie stwierdzono	Nie stwierdzono	Nie stwierdzono	Nie stwierdzono
Wymoczki ssące <i>Suctorina</i>	Nie stwierdzono <sup>ΔΔ</sup>	Nie stwierdzono	Nie stwierdzono	<i>Rotifer vulgaris</i> – nieliczne	<i>Rotifer vulgaris</i> – sporadycznie
Nicienie <i>Nemathoda</i>	Nie stwierdzono	Nie stwierdzono	<i>Rotifer vulgaris</i> – nieliczne	<i>Rotifer vulgaris</i> – nieliczne	<i>Rotifer vulgaris</i> – sporadycznie
Wrotki <i>Rotatoria</i>	<i>Rotifer vulgaris</i> – liczne	<i>Rotifer vulgaris</i> – dość liczne	<i>Rotifer vulgaris</i> – nieliczne	<i>Rotifer vulgaris</i> – nieliczne	<i>Rotifer vulgaris</i> – sporadycznie

\* liczne – many, \*\* niezbyt liczne – not many, \*\*\* nieliczne – quite many, \*\*\*\* dość liczne – plenty, <sup>Δ</sup>sporadycznie – sporadically, <sup>ΔΔ</sup>nie znaleziono – not found

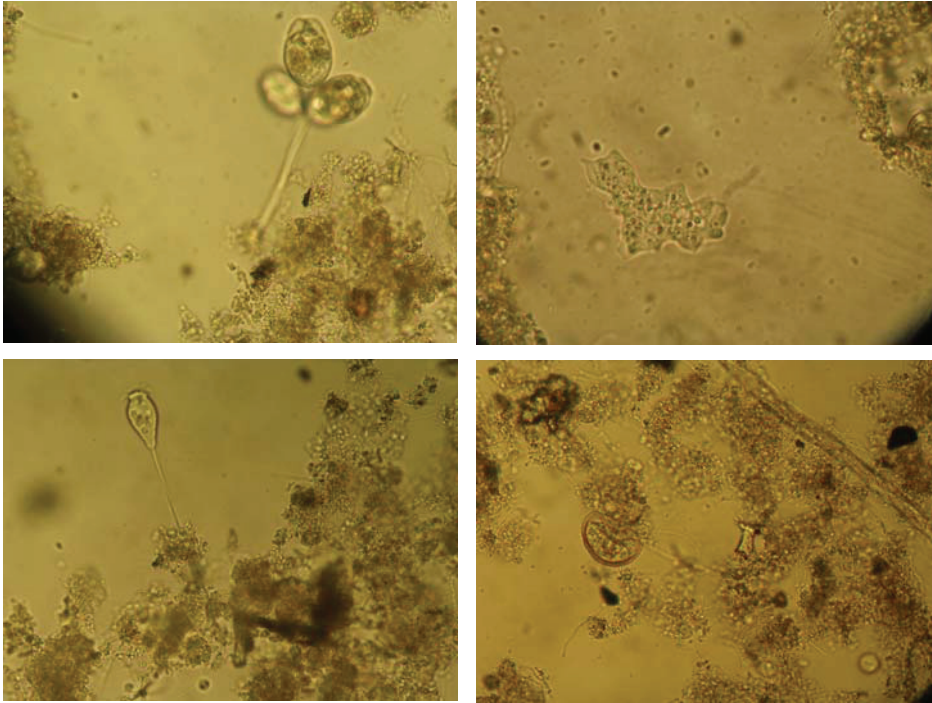
Próba 1 – osad czynny pochodzący z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu – Sample 1 – activated sludge from waste-water treatment plant in Bolesławiec

Próba 2 – osad czynny pochodzący z oczyszczalni ścieków w Brzegu – Sample 2 – activated sludge from waste-water treatment plant in Brzeg

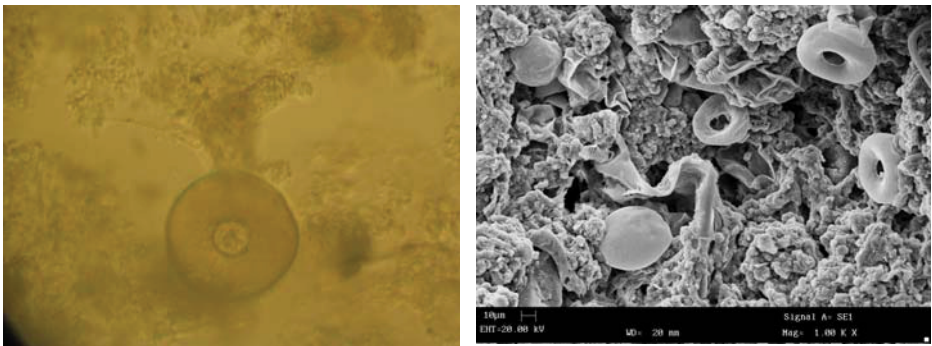
Próba 3 – osad czynny pochodzący z oczyszczalni ścieków we Wrocławiu-Janówek – Sample 3 – activated sludge from waste-water treatment plant in Wrocław-Janówek

Próba 4 – osad czynny pochodzący z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy – Sample 4 – activated sludge from waste-water treatment plant in Oleśnica

Próba 5 – osad czynny pochodzący z oczyszczalni ścieków w Namysłowie – Sample 5 – activated sludge from waste-water treatment plant in Namysłow



Fot. 1. Przykładowy skład gatunkowy osadu czynnego  
 Photo 1. An example of activated sludge constitution species



Fot. 2. Przykładowe zdjęcia korzenionózki *Arcella* sp.  
 Photo 2. An example of microbiology survey – *Arcella* species.

Osady ściekowe, oprócz pożądaných własności glebotwórczych, mogą zawierać bakterie chorobotwórcze, wirusy, robaki pasożytnicze, grzyby i pierwotniaki.

Z uwagi na zagrożenie, jakie niosą ze sobą te osady, jednym z kryteriów decydujących o ich przydatności do dalszego wykorzystania są badania mikrobiologiczne i helmintologiczne.

Duża ilość organizmów patogennych, które mogą znajdować się w osadach ściekowych, uniemożliwia oznaczenie wszystkich gatunków uznanych za niebezpieczne z punktu widzenia sanitarnego, dlatego też ustalono listę mikroorganizmów wskaźnikowych [9, 18]. Do takich organizmów zalicza się bakterie z rodzaju *Salmonella* oraz żywe jaja pasożytów jelitowych z rodzaju *Ascaris*, *Trichuris* i *Toxocara*. Warunki jakie muszą być spełnione przy wykorzystaniu osadów, zostały określone przez RMOŚwOK [108].

Analizie mikrobiologicznej i helmintologicznej poddano osad czynny oraz osad nadmierny. Zakres prac obejmował wykonanie w każdym z badanych osadów oznaczenia obecności bakterii z rodzaju *Salmonella* oraz wykonanie badań określających liczebność jaj pasożytów jelitowych z rodzaju *Ascaris*, *Trichuris* i *Toxocara*.

Analizy polegające na wyizolowaniu z badanych próbek bakterii z rodzaju *Salmonella* prowadzono na podłożu wybiórczo-różnicującym, stosując technikę wstępnego namnażania na podłożu bulionowym z seleninem wg Leifsona. Bakterie izolowano na podłożach różnicująco-wybiórczych SS i Rambach oraz przeprowadzono potwierdzenie wyników badaniem biochemicznym. Do identyfikacji szczepów wykorzystano testy API 20E. Dodatkowo, określono również miano bakterii z rodzaju *Salmonella*.

Określenie liczby żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris* sp., *Trichuris* sp., *Toxocara* polegało na izolacji żywych jaj z reprezentatywnej próbki osadu, przez wstrząsanie lub mieszanie, płukanie z zastosowaniem wirowania oraz flotację, a następnie wykonanie badania mikroskopowego.

Z analizy mikrobiologicznej wynika, że osad przed higienizacją nie może być stosowany w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne, ze względu na obecność bakterii z rodzaju *Salmonella*. Natomiast skład gatunkowy świadczy o dobrej pracy osadu czynnego. Zestawienie przykładowej analizy helmintologicznej umieszczono w tabeli 5.

W tabeli 6 przedstawiono wyniki analizy helmintologicznej dla prób osadu pochodzących z wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek.

W próbie osadu kierowanego do WKF stwierdzono jaja z rodzaju *Ascaris* ( $10 \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m. osadu) oraz potencjalną obecność *Ascaris lumbricoides*, natomiast osad kierowany z WKF do hali pras charakteryzował się obecnością bakterii z rodzaju *Salmonella*. W procesie fermentacji metanowej następuje stabilizacja osadów i większość jaj pasożytów obumiera. Jednak, jak widać w tab. 6, w osadzie po procesie stabilizacji odnotowano obecność bakterii z rodzaju *Salmonella*. Ilość ta jest znacznie mniejsza w stosunku do wprowadzonej do reaktora. Przed wykorzystaniem osadu niezbędna jest zatem higienizacja osadu, którą najczęściej przeprowadza się za pomocą tlenku wapnia.

Tabela 5  
Table 5

Przykładowa analiza helmintologiczna  
An example of parasitic worm analysis

Oczyszczalnia Waste-water treatment plant	Jaja pasożytów jelitowych: <i>Acaris</i> sp., <i>Trichuris</i> sp., <i>Toxocara</i> sp. Intestine endoparasite ovum: <i>Acaris</i> sp., <i>Trichuris</i> sp., <i>Toxocara</i> sp	Bakterie z rodzaju <i>Salmonella</i> Pathogenic bacteria: <i>Salmonella</i>	Miano bakterii rodzaju <i>Salmonella</i> <i>Coli</i> titre
Próba 1 w Bolesławcu Sample 1 from Boleslawiec	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	0,08 g s.m.
Próba 2 w Brzegu Sample 2 from Brzeg	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	0,3 g s.m.
Próba 3 w Janówku Sample 3 from Janowek	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	0,16 g s.m.
Próba 4 w Oleśnicy Sample 4 from Olesnica	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	0,18 g s.m.
Próba 5 w Namysłowie Sample 5 from Namyslow	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	0,16 g s.m.

Tabela 6  
Table 6

Przykładowa analiza helmintologiczna dla osadu we wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek  
An example of parasites worm for Wrocław waste water treatment plant – Janowek

Osad Sludge	Jaja pasożytów jelitowych <i>Acaris</i> sp. <i>Trichuris</i> sp. <i>Toxocara</i> sp. Intestine endoparasite ovum: <i>Acaris</i> sp. <i>Trichuris</i> sp. <i>Toxocara</i> sp.	Bakterie z rodzaju <i>Salmonella</i> Pathogenic bacteria: <i>Salmonella</i>	Miano bakterii z rodzaju <i>Salmonella</i> <i>Coli</i> titre
nadmierny excess sludge	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	0,30 g s.m.
osad kierowany do WKF sludge moved to digestion chamber	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	1,22 g s.m.
osad kierowany do hali pras sludge moved to filter press	nie stwierdzono not found	wyizolowano isolated	0,80 g s.m



➤ **Analiza fizykochemiczna**

Do analizy fizykochemicznej wykorzystano osady z pięciu oczyszczalni ścieków. Skład osadów jest zmienny i zależy od rodzaju ścieków do nich dopływających. Unieszkodliwianie osadów w rolnictwie jest możliwe, gdy zawartość metali ciężkich i szkodliwych substancji w osadach nie stanowi zagrożenia dla środowiska.

**a. Zmienna zawartość metali ciężkich w trakcie analizowanego okresu**

Badanie zawartości metali ciężkich w osadach ściekowych przeprowadzono w dwóch seriach. Pierwszą serię traktowano jako podstawową (1), a drugą określano jako potwierdzającą (2). Ilości metali ciężkich dla reprezentatywnych prób osadów zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Table 7

Zawartość metali ciężkich w analizowanych próbach osadu ściekowego  
Variable contents of heavy metals analysed samples

Lp.	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Hg
mg·kg <sup>-1</sup> s.m.							
oczyszczalnia ścieków w Bolesławcu waste-water treatment plant in Boleslawiec							
1	126,90	521,80	5,12	2,56	850,00	347,40	0,27
2	417,40	1174,00	49,70	1,24	14,20	17,90	0,47
oczyszczalnia ścieków we Wrocławiu Janówek waste-water treatment plant Wrocław „Janówek”							
1	453,00	2600,00	69,30	4,00	28,00	248,00	0,20
2	252,50	1421,00	35,50	2,63	32,80	208,40	0,63
oczyszczalnia ścieków w Namysłowie waste-water treatment plant in Namyslow							
1	564,60	3632,60	88,40	12,24	42,85	4951,00	0,37
2	287,50	1129,50	39,90	5,69	13,90	435,00	0,23
oczyszczalnia ścieków w Oleśnicy waste-water treatment plant in Olesnica							
1	183,80	1246,80	33,20	5,79	17,80	773,30	1,25
2	649,70	4051,50	160,60	11,68	48,19	5307,00	0,50
oczyszczalnia ścieków w Brzegu waste-water treatment plant in Brzeg							
1	121,60	939,80	19,30	1,49	16,00	104,40	2,00
2	85,40	555,50	21,30	3,84	0,42	74,70	0,91
Wartości dopuszczalne wg RMŚwOK. z dnia 1.08.2002 r. Admissible value according to Polish Regulation of the Minister of Environmental Protection							
a.	800	2500	500	10	100	500	5
b.	1200	3500	1000	25	200	1000	10
c.	2000	5000	1500	50	500	2500	25

a. – w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne – in agriculture or reclamation

b. – do rekultywacji terenów na cele nierolne – landfill reclamation

c. – pozostałe grunty – other ground

Osady pochodzące z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy nie nadają się do rolniczego wykorzystania z uwagi na zbyt dużą zawartość metali ciężkich. W tym przypadku norma dotycząca zawartości chromu została dwukrotnie przekroczona. Próby z oczyszczalni ścieków z Namysłowa, Janówka i Bolesławca w serii podstawowej przekroczyły obowiązujące normy. Jedynie w osadach pochodzących z oczyszczalni ścieków w Brzegu nie zostały przekroczone ilości podane w RMSwOK. Najczęściej w analizowanych osadach przewyższały wartości określone dla zastosowania osadów ściekowych w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne. Dotyczy to głównie chromu, jak również cynku i kadmu.

### b. Zmienność metali ciężkich w ciągu technologicznym

Analizie poddano próby osadu po biologicznym oczyszczeniu (po reaktorach biologicznych), osadu kierowanego do WKF oraz osadu odprowadzanego z komór fermentacyjnych i kierowanych do hali pras. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabelach 8, 9.

Tabela 8  
Table 8

Zawartość wybranych parametrów w ciągu technologicznym  
Variable contents waste water technology process

Nr	pH	sucha masa total solids	subst. organ. organic matter	N <sub>NH4</sub>	N og	P	Ca	Mg
		% s.m.	% s.m.	% s.m.	% s.m.	% s.m.	% s.m.	% s.m.
osad nadmierny – excess sludge								
próba 1	6,4	0,54	0,38	1,48	6,30	<0,06	2,41	<0,03
próba 2	6,4	0,75	0,48	1,07	6,67	<0,06	2,40	<0,03
osad kierowany do procesu fermentacji metanowej – sludge moved to digestion chamber								
próba 1	4,7	4,53	3,12	0,64	3,82	<0,06	1,70	<0,03
próba 2	5,2	5,63	4,04	1,55	5,28	2,31	1,63	<0,03
osad po procesie fermentacji metanowej – sludge moved to filter press								
próba 1	7,2	3,74	2,10	2,99	6,31	4,28	2,03	1,02
próba 2	6,9	2,77	1,69	3,50	6,57	3,25	1,75	<0,03

1 – Próba pochodząca z wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek – 1 – Sample from waste-water treatment plant in Wrocław „Janówek”

2 – Próba pochodząca z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu – 2 – Sample from waste-water treatment plant in Bolesławiec

W osadach po biologicznym oczyszczeniu, kierowanych do komór fermentacyjnych, odnotowano spadek pH i zawartości azotu ogólnego.

Osady kierowane z komór fermentacyjnych do hali pras charakteryzują się wyższym pH oraz wyższą zawartością azotu amonowego (N<sub>NH4</sub>) i azotu ogólnego (N<sub>og</sub>), natomiast mają mniejszą suchą masę ogólną i suchą masę organiczną. W przypadku osadów pochodzących z oczyszczalni w Bolesławcu osad nadmierny charakteryzuje się mniejszą zawartością metali ciężkich niż osad czynny pochodzący z reaktorów biologicznych. W osadach kierowanych z komór fermentacyjnych do hali pras odnotowano wzrost zawartości niklu i rtęci.

Tabela 9  
Table 9

Zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych w ciągu technologicznym  
The content of heavy metal in sludge in waste water technology process

Nr.	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Hg
mgkg <sup>-1</sup> s.m							
osad nadmierny – excess sludge							
próba 1	133,30	268,50	111,10	2,77	18,50	18,50	0,04
próba 2	453,00	2600,00	69,30	4,00	28,00	248,00	0,20
osad kierowany do procesu fermentacji metanowej – sludge moved to digestion chamber							
próba 1	488,90	1977,00	75,00	1,98	45,25	201,70	0,50
próba 2	417,40	1174,00	49,70	1,24	14,20	17,90	0,47
osad po procesie fermentacji metanowej – sludge moved to filter press							
próba 1	871,00	2834,00	85,50	1,87	91,10	315,50	0,95
próba 2	404,30	1054,00	21,60	0,72	17,30	12,60	0,87

Próba 1 – pochodzi z wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek – Sample 1 – from waste-water treatment plant in Wrocław „Janówek”

Próba 2 – pochodzi z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu – Sample 2 – from waste-water treatment plant in Bolesławiec

Osady z oczyszczalni ścieków Janówek kierowane do komór fermentacyjnych charakteryzowały się większą zawartością miedzi, ołowiu, niklu i rtęci. Osad kierowany do hali pras posiadał również większą zawartość cynku, ołowiu, niklu i rtęci w porównaniu z osadem nadmiernym.

W WKF następuje uwolnienie znaczących ilości metali ciężkich z osadu. Analiza ilości metali zawartych w osadach wykazała, że metale ciężkie podlegają akumulowaniu w osadach przefermentowanych. Powyższe wnioski wymagają jeszcze dalszych badań celem potwierdzenia przedstawionych obserwacji.

W próbie osadu kierowanego do WKF-u (próba pochodząca z oczyszczalni ścieków Janówek) stwierdzono również obecność jaj pasożytów jelitowych — jaja rodzaju *Ascaris* (10 na kg s.m. osadu) oraz potencjalną obecność *Ascaris lumbricoides*. Widać zatem, że osad kierowany do komór fermentacyjnych był zmieszany z osadem surowym. Takie stwierdzenie usprawiedliwia również większe stężenia metali ciężkich.

Osad pochodzący z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu został dopuszczony do stosowania w rolnictwie [142], a jednak z prezentowanych danych wynika, że nie nadaje się on do wykorzystania rolniczego z uwagi na znacznie przekroczoną normę dotyczącą niklu (850 mg na 1000 g s.m.). Przekroczone normy metali ciężkich mogą jednak wynikać z prac modernizacyjnych trwających podczas pobierania prób do analiz. Na oczyszczalni w Bolesławcu i Oleśnicy trwały prace budowlane.

**c. Zawartość składników nawozowych w analizowanych osadach  
– ocena nawozowa**

O glebotwórczej i nawozowej wartości osadów decyduje zawartość substancji organicznej, azotu, fosforu, mikroelementów, a także składników szkodliwych. Zawartość składników nawozowych w osadach ściekowych przedstawiono w tabeli 10.

Zawartość azotu ogólnego w analizowanych osadach jest znacznie większa niż w nawozach organicznych. Badania te potwierdzają analizy przeprowadzone przez Sikorskiego [85]. Osad czynny świeży i zagęszczony zawiera więcej azotu niż próby osadu surowego odwodnionego mechanicznie, czy odwodnionego na poletkach lub odwodnionego mechanicznie i przefermentowanego [64].

Analizowane próby dotyczą osadów nieodwodnionych. Analizę przeprowadzono dwukrotnie w ciągu roku. Próby pobierane na początku okresu badawczego określono jako próba 1, natomiast próby pobierane przed zakończeniem badań jako próba 2 (tab. 10).

Tabela 10  
Table 10

Zawartość składników nawozowych w badanych osadach ściekowych  
The content of fertilizer in analysed sludge

Oznaczenie próby Sample	Sucha masa ogólna Dry substance	Sucha masa organiczna Organic dry substance	Azot ogólny Total Nitrogen	Fosfor ogólny Total Phosphorus	Wapń Calcium	Magnez Magnesium
	%	% s.m.	% s.m.	% s.m.	% s.m.	% s.m.
Osady z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu Sludge from waste-water treatment plant in Boleslawiec						
1	0,39	0,27	6,67	3,33	1,54	0,77
2	0,75	0,48	6,67	<0,06	2,4	<0,03
Osady z oczyszczalni ścieków we Wrocławiu Janówek Sludge from waste-water treatment plant in Wrocław „Janówek”						
1	0,76	0,48	5,66	5,53	1,58	1,05
2	0,54	0,38	6,3	<0,06	2,41	<0,03
Osady z oczyszczalni ścieków w Brzegu Sludge from waste-water treatment plant in Brzeg						
1	2,34	1,5	5,6	4,7	<0,11	<0,03
2	1,34	0,84	5,3	3,85	1,49	0,71
Osady z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy Sludge from waste-water treatment plant in Olesnica						
1		0,93	7,37	2,19	2,26	0,71
2	3,97	2,44	3,99	2,52	2,8	0,8
Osady z oczyszczalni ścieków w Namysłowie Sludge from waste-water treatment plant in Namyslow						
1		1,01	7,01	2,11	2,04	0,61
2	3,8	2,67	4,86	2,63	<0,11	0,78

Z powyższych danych wynika, że zawartość fosforu w badanych osadach również jest dużo większa niż ilości podawane w literaturze [61, 103] dla nawozów organicznych. Tylko w dwóch przypadkach (osad z oczyszczalni w Bolesławcu i we Wrocławiu – próba 2) zależność ta jest niepotwierdzona. Generalnie, zawartość wapnia podobnie jak fosforu jest większa niż w nawozach organicznych [61, 103].

Jednakże w przypadku prób pochodzących z oczyszczalni w Bolesławcu i we Wrocławiu (próba 2) odnotowano bardzo niską zawartość tych pierwiastków ( $P < 0,06 \text{ mg} < 0,03$ ), natomiast próba 1 zawierała zdecydowanie większą zawartość fosforu i magnezu, niż próba 2. Wartości te (próba 1) wykazują, że jest dużo więcej fosforu i wapnia niż ilości podawane w literaturze dla nawozów organicznych.

W badanych osadach występują większe ilości azotu, wapnia, fosforu i magnezu, przy niskiej zawartości substancji organicznej. Nawozową dawkę osadu określa się głównie według zawartości azotu. Stwierdzono, że obecność składników nawozowych w analizowanych osadach jest korzystna dla ich przyrodniczego wykorzystania.

## 5. Reologiczna charakterystyka osadów ściekowych

### 5.1. Badania reologicznych własności osadów ściekowych

Badania reologicznych właściwości osadów i zawiesin dokonywane są na podstawie pomiarów krzywych płynięcia oraz na ich aproksymacji za pomocą optymalnego modelu reologicznego. Opis cieczy nienewtonowskich, jakimi są osady ściekowe, nie może opierać się na modelu Newtona, ponieważ w określonych warunkach ciśnienia i temperatury lepkość osadów nie jest wielkością stałą, lecz zmienia się w zależności od prędkości deformacji. „Lepkość” w tym przypadku opisują parametry reologiczne modelu [104]. Określenie parametrów reologicznych osadu ściekowego polega na wyznaczeniu pseudokrzywej płynięcia  $\tau = f(G_p)$  w całym przedziale ruchu laminarnego. Otrzymane z badań pseudokrzywe płynięcia przedstawiają zależności między naprężeniem stycznym  $\tau$  a pozorną prędkością deformacji  $G_p$  i służą do oceny reologicznego zachowania się badanych osadów.

Przedmiotem badań była charakterystyka osadów ściekowych – wstępnego, nadmiernego oraz pochodzącego z komór napowietrzania, określenie charakterystyki płynięcia powyższych osadów oraz poszukiwanie korelacji pomiędzy parametrami reologicznymi a koncentracją wagową i rodzajem osadu. Postuluje się również wykorzystanie parametrów reologicznych jako podstawy do projektowania instalacji pompowo-rurowych ciągów technologicznych typowych oczyszczalni ścieków. Reologiczne charakterystyki osadów ściekowych mogą być pomocne przy doborze:

- 1) układów pompowo-rurowych,
- 2) urządzeń odwadniających.

Znajomość cech reologicznych, takich jak „lepkość” i próg płynięcia, jest bardzo istotna w przypadku oczyszczalni ścieków, zwłaszcza w projektowaniu parametrów hydrotransportu, jak również określaniu parametrów leżakowania, rozsiewania i odwadniania.

W celu określenia optymalnego modelu reologicznego zapewniającego najlepszą aproksymację krzywych płynięcia osadów ściekowych porównano podstawowe modele reologiczne. Na podstawie przeprowadzonych badań wiskozymetrycznych przyjęto podstawowy model ruchu osadów ściekowych odpowiedni ciału plastyczno-lepkemu. Najczęściej wykorzystywanym modelem do opisu cech reologicznych mieszanin plastyczno-lepkich jest dwuparametrowy model Bingham, jednak w pracach Kempieńskie-go, Czabana i Honey’ a zasugerowano wykorzystanie modeli trzyparametrowych.

Kempiński analizował cechy reologiczne gnojownicy za pomocą modelu Vočadlo [44, 45, 49], natomiast Czaban wykorzystywał dodatkowo uogólniony model Cassona [19] i Herschela-Bulkley'a. Honey stosował model Herschela-Bulkley'a dla osadów ściekowych [37].

Podstawy metodyki pomiarów reologicznych oraz reologii osadów organicznych przedstawiono w pracach Parzonki [71, 74]. Wybór metody badań oraz typu i zakresu pomiaru wiskozymetru zależy od właściwości fizycznych, chemicznych i reologicznych osadów oraz od charakteru prowadzonych badań [71, 95].

Wielu badaczy analizowało własności reologiczne osadów ściekowych pod kątem ustalenia metodyki wykonywania pomiarów osadów biologicznie czynnych [4, 63, 78, 106]. Wyniki analiz nie są jednak jednoznaczne. Generalnie, do pomiarów reologicznych stosuje się wiskozymetry kapilarne i rurowe, rotacyjne typu stożek-płytką, rotacyjne o cylindrach współosiowych typu Couette'a-Hatscheka, w którym obraca się cylinder zewnętrzny, oraz typu Couette'a-Searle'a z obracającym się cylindrem wewnętrznym. Charakterystyczną cechą wiskozymetrów jest nieliniowy rozkład prędkości [71, 72, 74, 75].

W przypadku osadów ściekowych przyjęto, że najlepsze rezultaty daje pomiar za pomocą wiskozymetrów rotacyjnych. Głównymi zaletami tego typu wiskozymetru są: prostota pomiaru oraz niewielkie ilości osadu potrzebne do jego przeprowadzenia. Wiskozymetry o cylindrach współosiowych muszą być tak dobrane, aby szczelina pomiarowa ( $R_2 - R_1$ ) była co najmniej od 10 do 20 razy większa od cząstek fazy stałej [72]. Dla osadów ściekowych warunek ten jest możliwy do spełnienia przez wiskozymetry typu Couette'a-Searle'a o wielkości szczeliny około 1 mm.

Charakterystyka reologiczna osadu polega na:

- przeprowadzeniu wiskozymetrycznych pomiarów pseudokrzywych płynięcia  $\tau(G_p)$  za pomocą wiskozymetru o dwóch cylindrach współosiowych;
- transformacji otrzymanych pseudokrzywych płynięcia na rzeczywiste krzywe płynięcia (za pomocą równania Kriegera, Elroda, i Marona oraz Šveca);
- doborze optymalnego modelu reologicznego;
- ustaleniu wpływu koncentracji wagowej ( $C_s$ ) osadu ściekowego na wartości parametrów reologicznych modelu;
- określeniu koncentracji granicznej ( $C_{s,gr}$ ), rozgraniczającej newtonowskie i nienewtonowskie zachowanie osadu.

W monografii podjęto próbę ustalenia metody pomiarów wiskozymetrycznych dla osadów ściekowych. Pomiary przeprowadzano w tych samych warunkach. Badania wiskozymetryczne miały na celu:

- 1) określenie reologicznych właściwości osadów przez pomiar krzywych płynięcia,
- 2) ustalenie wpływu koncentracji osadów i temperatury na wartość parametrów reologicznych.

### ➤ Opis stanowiska badawczego

Pomiary wiskozymetryczne przeprowadzono za pomocą wiskozymetru rotacyjnego typu VT550 firmy Haake (fot. 3). Poniżej zaprezentowano podstawowe dane techniczne dla systemu pomiarowego MV1:

- promień  $R_1 = 20,04$  mm,
- wysokość  $L = 60$  mm,
- zewnętrzny cylinder, promień  $R_2 = 21$  mm,
- stosunek promieni  $R_2/R_1 = 1,05$ ,
- szczelina pomiarowa  $R_2 - R_1 = 0,96$  mm,
- objętość próbki =  $34$  cm<sup>3</sup>.



Fot. 3. Stanowisko pomiarowe  
Photo 3. Work station

## 5.2. Wyniki badań wiskozymetrycznych

Materiał do badań stanowiły osady pobrane z następujących miejsc w ciągu technologicznym oczyszczalni ścieków:

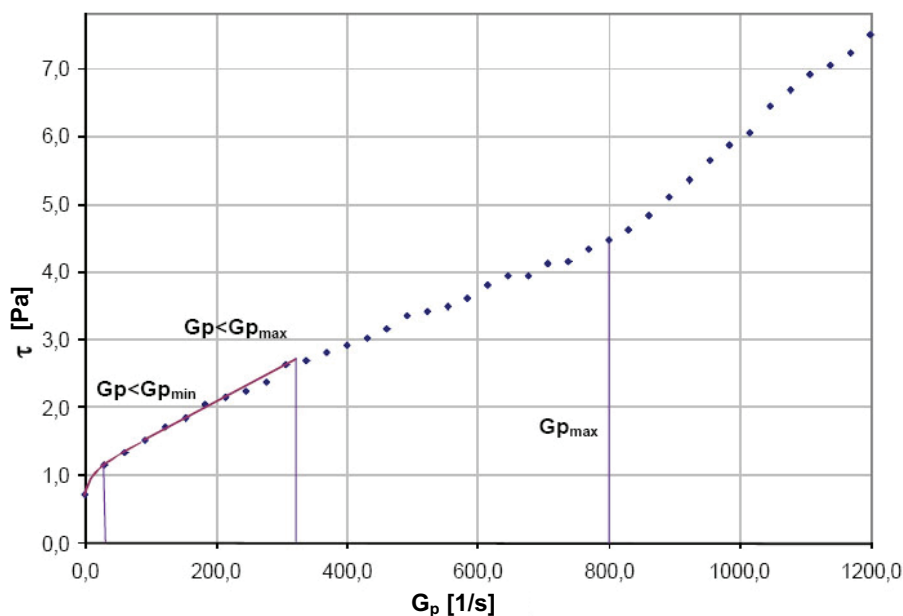
- 1) osad wstępny (surowy) kierowany do WKF,
- 2) osad nadmierny kierowany do dalszego unieszkodliwiania,
- 3) osad recykulowany,
- 4) osad bezpośrednio pobrany z komór napowietrzania.

Serie pomiarów wiskozymetrycznych wykonano dla szeregu różnych koncentracji wagowych  $C_s$ , otrzymywanych w wyniku odwodnienia próby wyjściowej o naturalnej koncentracji. Pomiary prowadzono w temperaturze otoczenia, tj. ok.  $20^{\circ}\text{C}$ , a zmiana temperatury w trakcie badań wynosiła około  $1^{\circ}\text{C}$ . Próbki osadów ściekowych po wykonaniu pomiarów wiskozymetrycznych każdorazowo suszono w temp.  $105^{\circ}\text{C}$  przez 24 godz. celem wyznaczenia koncentracji wagowych.



### 5.2.1. Określenie metodyki pomiarów

Dla pierwszej serii badań osadu ściekowego o koncentracji wagowej  $C_s$  ok. 1,8% dokonano pomiarów pseudokrzywej płynięcia dla zmiennego zakresu pozornej prędkości deformacji  $G_p$ . Maksymalne wartości  $G_p$  zawarte były w przedziale  $G_p = 300 \div 1200 \text{ s}^{-1}$ . Przeprowadzone badania miały na celu ustalenie pozornej maksymalnej prędkości deformacji  $G_{pmax}$ , ograniczającej od góry strefę laminarnego przepływu w szczelinie wiskozymetru rotacyjnego. Zdaniem wielu autorów [75, 95], przekroczenie dopuszczalnej maksymalnej prędkości deformacji  $G_{pmax}$  powoduje widoczne odchylenie pseudokrzywej płynięcia od wcześniejszego przebiegu. Analiza przebiegu pseudokrzywych płynięcia  $\tau(G_p)$  (rys. 3) wskazuje, że laminarny przepływ osadu w szczelinie wiskozymetru rotacyjnego występuje w zakresie pseudoprędkości deformacji nieprzekraczającej  $G_{pmax} = 800 \text{ s}^{-1}$  [51].

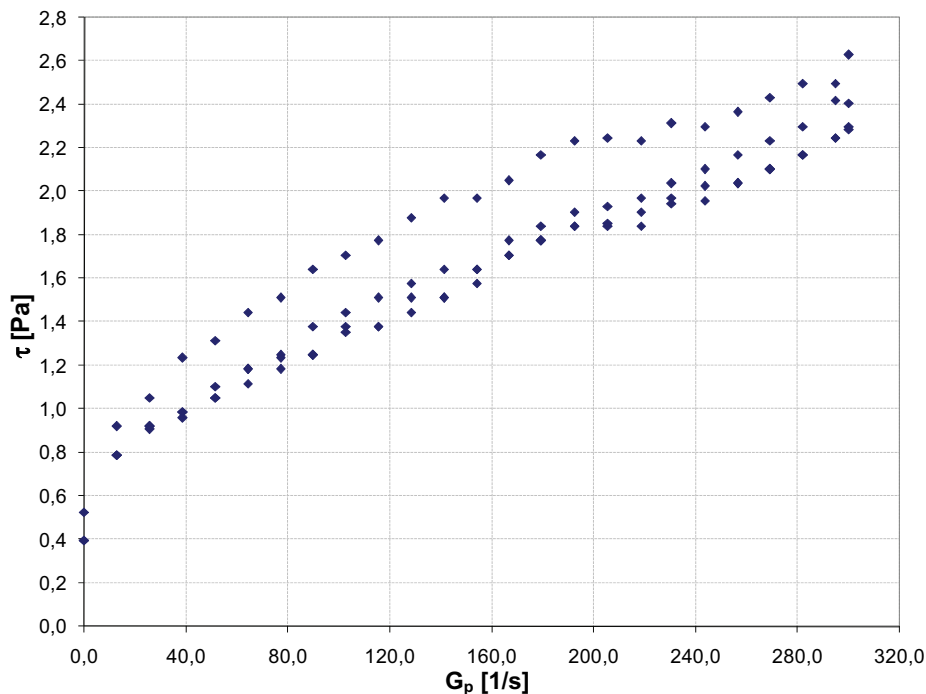


Rys. 3. Pseudokrzywa płynięcia dla osadu czynnego w szerokim zakresie pseudoprędkości deformacji

Fig. 3. The pseudo-curves of flow for activated sludge in wide range of pseudoflow

Obliczenie dolnej i górnej wartości prędkości deformacji  $G_{pmax}$ ,  $G_{pmin}$ , ograniczającej zakres liniowy pomiarów wiskozymetrycznych, przeprowadzono porównawczo dla ciała plastyczno-lepkiego Binghama, zgodnie z metodyką podaną przez Sozańskiego [95]. Określony w ten sposób liniowy zakres pomiarów wiskozymetrycznych badanego osadu czynnego zawiera się w tym przypadku w przedziale  $G_{pmin} = 8,85 \text{ s}^{-1}$ ,  $G_{pmax} = 687,15 \text{ s}^{-1}$ . Górną pseudoprędkość deformacji  $G_{pmax}$  obliczono z uwzględnie-

niem wirów Taylora. W analizowanych oczyszczalniach ścieków, przy transporcie rurowym osadów, stosuje się średnice rur w przedziale od 0,2 do 1,0 m. Dla powyższych średnic i przyjętych prędkości roboczych (od  $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $7,64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) – pseudoprędkości deformacji  $G_p = 8 V \cdot D^{-1}$  będą zmieniać się w przedziale  $G_p = 2,45 \div 305,73 \text{ s}^{-1}$ . Wartości pseudoprędkości deformacji  $G_p$  występujące w praktyce znajdują się w zakresie laminarnego przepływu w szczelinie wiskozymetru rotacyjnego. Na podstawie przeprowadzonej powyżej analizy do dalszych badań reologicznych przyjęto maksymalne pseudoprędkości deformacji  $G_{p\max}=300 \text{ s}^{-1}$  (rys. 4).

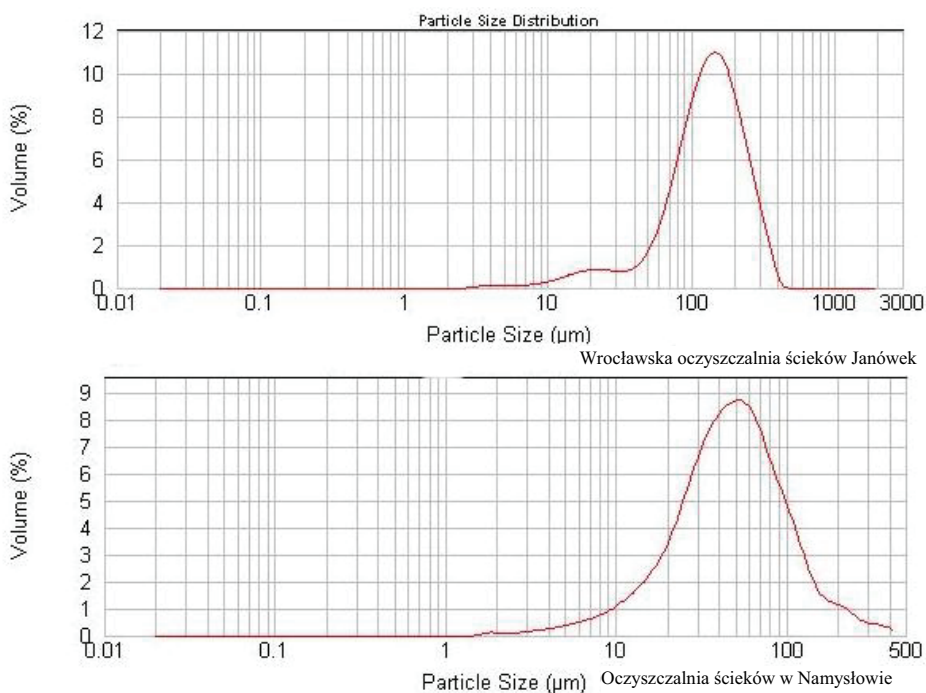


Rys. 4. Pseudokrzywa płynięcia dla osadu czynnego  
 Fig. 4. Measured pseudo-curves of flow for activated sludge

Zaproponowano następującą metodykę pomiarową, umożliwiającą pomiar pseudokrzywych płynięcia osadu czynnego biologicznie. Pomiar przeprowadzono w czterech seriach. Pierwszą serią rozpoczęto od prędkości deformacji  $G_p = 300 \text{ s}^{-1}$ , stopniowo zmniejszając prędkość deformacji do zera; następną serią rozpoczynano od 0, zwiększając prędkość do  $300 \text{ s}^{-1}$ . Kolejne serie przeprowadzono analogicznie, jak pierwszą i drugą. Analizę opierano na punktach pomiarowych otrzymanych z ostatniej serii pomiarowej. Taka metodyka pomiarów ma na celu zniszczenie struktury wewnętrznej badanych osadów ściekowych (rozpoczęcie pomiaru od maksymalnych prędkości deformacji  $G_p$ ). Powyższe serie pomiarowe mają na celu obserwację zmienności przebiegu pomiaru

wraz z upływem czasu. Przebieg trzeciej i czwartej serii pomiaru o zbliżonym przebiegu krzywych płynięcia świadczy o reostabilnym pomiarze wiskozymetrycznym. Takie postępowanie uzasadnione jest względami praktycznymi, gdzie zmianę struktury wewnętrznej uzyskuje się przy zastosowaniu pomp wirowych, niezbędnych w instalacjach pompowo-rurowych, stosowanych w ciągu technologicznym oczyszczalni ścieków.

Na rysunku 8 zaprezentowano dwie krzywe granulometryczne osadu nadmierne-go. Pierwsza krzywa dotyczy prób pochodzących z wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek (o średniej średnicy masy  $d_{50} = 135,397 \mu\text{m}$ ). Drugą krzywą otrzymano z analizy próby pochodzącej z oczyszczalni ścieków w Namysłowie (o średniej średnicy masy  $d_{50} = 47,802 \mu\text{m}$ ). Pomiary wykonywano za pomocą wiskozymetru rotacyjnego o szerokości szczeliny 0,96 mm. Jak widać (rys. 5), zastosowany system pomiarowy spełnia powyższy warunek i pozwala na prawidłowe ustalenie krzywych płynięcia.

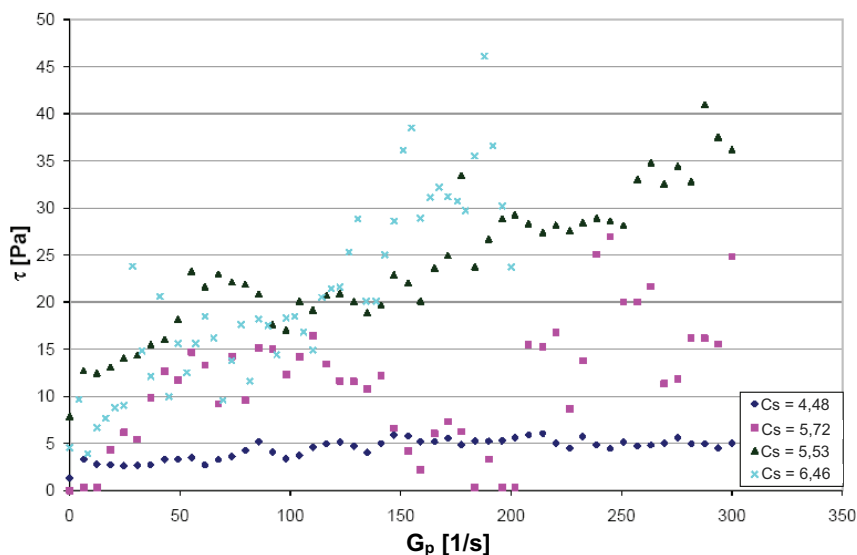


Rys. 5. Przykładowe krzywe granulometryczne dla osadu nadmierne-go  
 Fig. 5. An example of grain size curves for sewage sludge

## 5.2.2. Charakterystyki płynięcia poszczególnych typów osadów

### ➤ Osad wstępny

Przy pomiarach wiskozymetrycznych osadów wstępnych występują duże odchylenia naprężeń stycznych  $\tau$  od zadanych pseudoprędkości deformacji  $G_p$ , dlatego nie można jednoznacznie obliczyć parametrów reologicznych. Odchylenia te są prawdopodobnie spowodowane obecnością części o większych średnicach, powodujących klinowanie cylindra. Agregacja cząstek i sedimentacja na dno cylindra powoduje błędy w pomiarach. Kolejne serie również nie dały możliwości poprawnej analizy. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy wykres pseudokrzywych płynięcia dla osadu wstępnego pochodzącego z oczyszczalni ścieków w Brzegu. Wyniki pomiarów z pozostałych oczyszczalni nie różnią się od zaprezentowanych poniżej.



Rys. 6. Przykładowa krzywa dla osadu wstępnego  
Fig. 6. An example of curves for sewage sludge

Badania te potwierdzają wyniki zaprezentowane przez Battisoniego [4], który proponuje – przed rozpoczęciem pomiarów – przesianie analizowanych próbek na sitach. Pomiar osadu wstępnego stanowi tło dla pomiarów osadu czynnego i nadmiernego.

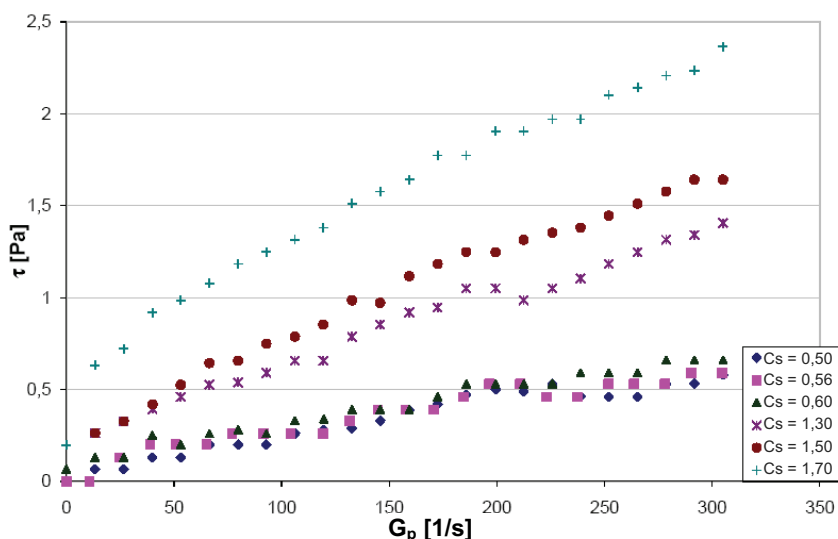
### ➤ Osad czynny

Do analizy pobrano próby osadu czynnego z siedmiu oczyszczalni ścieków. Próby pobrano bezpośrednio z komory napowietrzania. Badania wykonano dla szeregu róż-

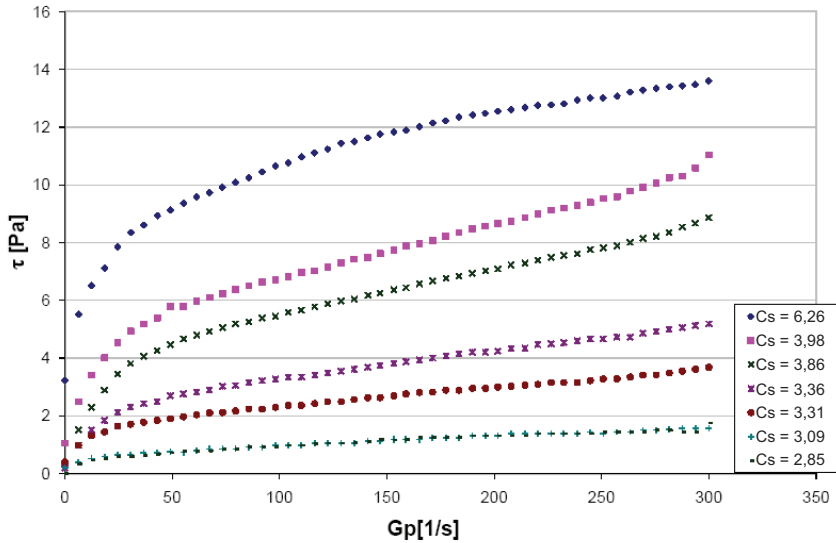
nych koncentracji wagowych ( $C_s$ ) osadu czynnego, otrzymanych w wyniku zagęszczania próby wyjściowej o koncentracji naturalnej. Przykładowy kształt pseudokrzywych płynięcia został przedstawiony na rysunku 7. Zaprezentowany przykład zależności  $\tau = f(C_s)$  pochodzi z oczyszczalni ścieków w Namysławie (koncentracja naturalna  $C_s = 0,50\%$ ). W pozostałych oczyszczalniach koncentracje naturalne wynoszą od  $C_s = 0,47\%$  (oczyszczalnia ścieków w Bolesławcu) do  $C_s = 1,39\%$  (oczyszczalnia ścieków w Sieradzu). Natomiast w tabeli 11 zaprezentowano przygotowane serie pomiarów dla koncentracji wagowych od 1,06 do 5,73% dla poszczególnych oczyszczalni.

### ➤ Osad nadmierny

Pomiary wiskozymetryczne przeprowadzono również dla szeregu różnych koncentracji wagowych ( $C_s$ ) otrzymanych z odwodnienia próby wyjściowej. Do analizy pobrano próby osadu nadmiernego z siedmiu oczyszczalni ścieków. Na rysunku 8 zaprezentowano przykładowe pseudokrzywe płynięcia dla osadu nadmiernego ( $C_s = 2,85 \div 6,26\%$ ), pochodzące z oczyszczalni ścieków w Namysławie. Natomiast w tabelach 12, 13, przedstawiono przygotowane zakresy koncentracji wagowych od 1,14 do 6,56% dla poszczególnych oczyszczalni. Podobne wyniki odnotowano dla prób osadów pobranych z komory zagęszczania osadów.



Rys. 7. Pseudokrzywa płynięcia dla osadu czynnego z oczyszczalni ścieków w Namysławie  
 Fig. 7. Measured pseudo-curves of flow for various concentrations of activated sludge originating from waste water treatment plant in Namyslaw



Rys. 8. Pseudokrzywa płynięcia dla osadu nadmiernego z oczyszczalni ścieków w Namysłowie  
 Fig. 8. Measured pseudo-curves of flow for various concentrations of sludge originating from waste water treatment plant in Namyslow

### 5.2.3. Transformacja otrzymanych pseudokrzywych płynięcia na rzeczywiste krzywe płynięcia

Wybór matematycznej postaci modelu reologicznego poprzedzono transformacją otrzymanych z pomiarów pseudokrzywych płynięcia  $\tau(G_p)$  na rzeczywiste krzywe płynięcia  $\tau(G)$ , za pomocą równania Kriegera, Marona, Elroda oraz Šveca [19].

$$G = G_p \cdot \left( k_1 + k_2 \cdot (m-1) + k_3 \left[ (m-1)^2 + 0,4343 \cdot \frac{dm}{d \log \tau} \right] \right) \quad (7)$$

$$m = \frac{d \log G_p}{d \log \tau} \quad (7a)$$

$$k_1 = \frac{1-\alpha^{-1}}{2} \left( 1 + \frac{1}{\ln S} + \frac{\ln S}{3} \right) \quad (7b)$$

$$k_2 = \frac{1-\alpha^{-1}}{2} \left( 1 + \frac{2}{3} \ln S \right) \quad (7c)$$

$$k_3 = \frac{1-\alpha^{-1}}{6} \ln S \quad (7d)$$

$$\alpha = \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \quad (7e)$$

$$S = \left( \frac{R_2}{R_1} \right) = \alpha^{\frac{1}{2}} \quad (7f)$$

gdzie:

$m$  – nachylenie stycznej w danym punkcie,

$k_1, k_2, k_3$  – stałe viskozymetru rotacyjnego,

$R_1$  – promień cylindra wewnętrznego viskozymetru rotacyjnego,

$R_2$  – promień cylindra zewnętrznego viskozymetru rotacyjnego.

#### 5.2.4. Dobór optymalnego modelu reologicznego

Do aproksymacji otrzymanych pseudoreogramów osadu ściekowego, gdzie występuje wyraźny próg płynięcia  $\tau_0$  (po przekroczeniu którego następuje początek płynięcia osadu) i zmienna lepkość plastyczna  $\eta_{pl}$ , niezbędny jest model trzyparametrowy [19, 37, 45]. Dobór modelu reologicznego przeprowadzono w oparciu o wyznaczone rzeczywiste krzywe płynięcia, zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Czabana [19]. Do opisu właściwości reologicznych przyjęto uogólniony model Herschela-Bulkley'a, który ma następującą postać:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot G^n \quad \text{dla } \tau > \tau_0 \quad (8)$$

$$\tau = 0 \quad \text{dla } \tau < \tau_0$$

Model ten upraszcza się do dwuparametrowego modelu Ostwalda de Waele'a, kiedy próg płynięcia  $\tau_0 = 0$ . Zjawisko takie obserwujemy przy upraszczaniu się struktury wewnętrznej mieszaniny wraz ze zmniejszaniem się koncentracji wagowej  $C_s$ .

Określone parametry reologiczne dla badanych osadów ściekowych zestawiono w poniższych tabelach. Dla osadu czynnego w tabeli 11, a dla osadu nadmiernego w tabelach 12, 13.

Tabela 11  
Table 11

Zestawienie parametrów reologicznych i koncentracji granicznej dla prób osadu czynnego  
Dependence of gravimetric concentration  $C_s$  and critical concentration  $C_{s,gr}$  for activated sludge

Koncentracja wagowa $C_s$ Gravimetric concentration	$\tau_0$	k	n	$C_{s,gr1}$	$C_{s,gr2}$
%	Pa	Pa·s <sup>n</sup>	–	%	%
Oczyszczalnia ścieków w Błazkach – Waste-water treatment plant in Błazki					
1,06	0,00	0,008	1,050		
1,64	0,13	0,040	0,770		
1,65	0,00	0,034	0,780		
1,94	3,94	0,078	0,690		
2,18	0,53	0,006	1,030		
2,53	4,67	0,206	0,690	1,18	0,97
Oczyszczalnia ścieków w Sieradzu – Waste-water treatment plant in Sieradz					
1,39	0,00	0,025	0,710		
1,45	0,07	0,014	0,770		
1,57	0,08	0,095	0,600		
2,14	0,00	0,528	0,600		
3,32	0,99	0,649	0,510	1,32	0,10
Oczyszczalnia ścieków w Oleśnicy – Waste-water treatment plant in Oleśnica					
1,29	0,11	0,0111	0,809		
1,66	0,07	0,0724	0,560		
2,08	0,13	0,1324	0,548		
2,32	0,33	0,2292	0,488		
3,59	0,79	1,0021	0,440	1,35	0,51
Oczyszczalnia ścieków w Brzegu – Waste-water treatment plant in Brzeg					
1,15	0,00	0,0423	0,544		
1,21	0,00	0,0086	0,804		
1,28	0,00	0,0692	0,476		
1,43	0,00	0,0541	0,575		
1,52	0,00	0,0512	0,586		
1,67	0,00	0,0637	0,551		
1,86	0,00	0,1333	0,471		
2,03	0,00	0,1733	0,481		
2,34	0,00	0,2825	0,446		
3,06	0,00	0,8148	0,382		
3,48	0,00	0,7294	0,729		
4,27	0,00	2,0346	0,388		
4,91	0,00	1,6200	0,470		
5,73	0,00	2,106	0,500		0,99
Oczyszczalnia ścieków w Bolesławcu – Waste-water treatment plant in Bolesławiec					
1,43	0,20	0,111	0,563		
1,69	0,33	0,216	0,507		
1,99	0,60	0,389	0,474		
2,36	0,67	0,673	0,445		
3,27	2,63	0,810	0,515	1,42	0,10



Tabela 12

Table 12

Zestawienie parametrów reologicznych i koncentracji granicznej dla prób osadu nadmiernego  
Dependence of gravimetric concentration  $C_s$  and critical concentration  $C_{s,gr}$  for recirculated sludge

Koncentracja wagowa $C_s$ Gravimetric concentration	$\tau_0$	k	n	$C_{s,gr1}$	$C_{s,gr2}$
%	Pa	Pa·s <sup>n</sup>	–	%	%
Wrocławska oczyszczalnia ścieków Janówek – Waste-water treatment plant in Wrocław Janówek					
1,14	0,04	0,076	0,847		
1,93	0,32	0,143	0,545		
2,22	0,66	0,291	0,504		
2,82	2,02	1,175	0,434	0,58	0,77
Oczyszczalnia ścieków w Brzegu – Waste-water treatment plant in Brzeg					
1,22	0,13	0,055	0,590		
1,29	0,06	0,008	0,539		
1,46	0,13	0,082	0,550		
2,08	0,24	0,117	0,572		
2,28	0,25	0,139	0,557		
2,33	0,33	0,194	0,538		
2,58	0,46	0,317	0,493		
2,86	0,59	0,364	0,491		
3,12	0,79	0,474	0,498		
3,38	1,51	0,741	0,465		
3,87	1,97	0,878	0,493		
5,30	3,90	2,458	0,483	1,24	–
Oczyszczalnia ścieków w Oleśnicy – Waste-water treatment plant in Oleśnica					
1,45	0,06	0,089	0,514		
1,71	0,06	0,095	0,554		
2,06	0,13	0,247	0,473		
2,67	0,59	0,535	0,445		
3,58	0,81	1,049	0,467		
5,59	1,89	0,505	0,804	1,17	0,74
Oczyszczalnia ścieków w Bolesławcu – Waste-water treatment plant in Bolesławiec					
2,00	0,20	0,1569	0,524		
2,09	0,33	0,353	0,482		
2,10	0,39	0,429	0,457		
2,39	0,79	0,4469	0,460		
2,50	0,55	0,8438	0,432		
3,33	2,76	0,7252	0,527	1,50	–
Oczyszczalnia ścieków w Rostocku – Waste-water treatment plant in Rostock					
2,40	0,35	0,1695	0,534		
2,60	1,18	0,1387	0,594		
2,90	1,31	0,3205	0,520		
3,00	1,43	0,2302	0,549		
3,11	1,67	0,2049	0,565		
3,46	2,37	0,3459	0,535		
3,68	6,22	2,1591	0,412		
3,95	9,00	1,2588	0,488		
4,48	11,21	1,3500	0,486	2,40	0.1

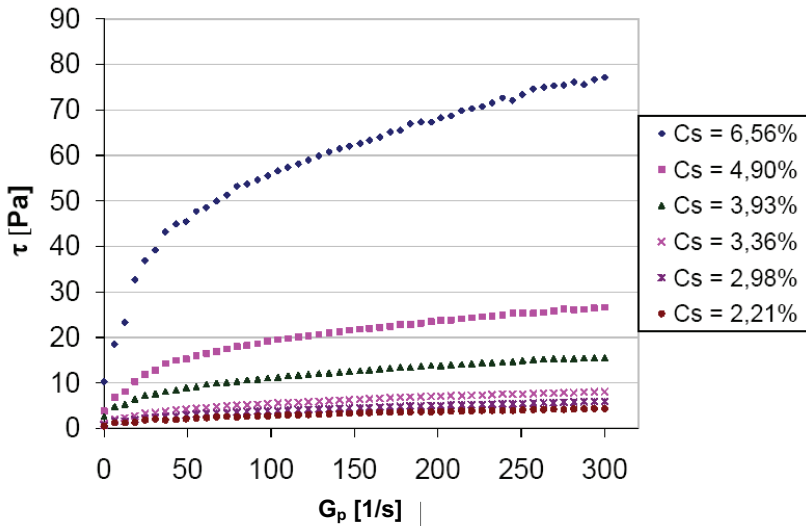
Tabela 13  
Table 13

Zestawienie parametrów reologicznych i koncentracji granicznej dla prób osadu nadmiernego  
Dependence of gravimetric concentration  $C_s$  and critical concentration  $C_{s,gr}$  for recirculated sludge

Koncentracja wagowa $C_s$ Gravimetric concentration	$\tau_0$	k	n	$C_{s,gr1}$	$C_{s,gr2}$
%	Pa	Pa·s <sup>n</sup>	–	%	%
Oczyszczalnia ścieków w Namysłowie – Waste-water treatment plant in Namyslow					
próba pobrana do analizy – 12.09.03 – sample taken to analysis – 12.09.2003					
3,05	0,07	0,107	0,462		
3,09	0,13	0,085	0,444		
3,31	0,33	0,294	0,376		
3,36	0,20	0,496	0,372		
3,86	0,26	0,847	0,359		
3,98	1,00	1,008	0,352		
4,80	3,88	1,915	0,353		
6,26	3,22	1,642	0,326	3,08	0.10
próba pobrana do analizy – 12.10.03 – sample taken to analysis – 12.10.2003					
3,36	0,79	1,602	0,365		
4,11	1,96	1,071	0,421		
4,67	2,34	1,278	0,430		
5,87	6,04	3,883	0,375		
6,00	6,70	10,033	0,313	2,79	–
próba pobrana do analizy – 13.11.2003 – sample taken to analysis – 13.11.2003					
3,78	1,03	0,634	0,350		
4,09	0,13	1,329	0,392		
4,57	2,30	1,766	0,380		
4,93	1,31	1,565	0,409		
5,91	2,96	4,342	0,391	2,80	–
próba pobrana do analizy – 04.12.03 – sample taken to analysis – 04.12.2003					
2,21	0,40	0,245	0,454		
2,98	0,89	0,472	0,441		
3,36	1,26	0,674	0,434		
3,93	2,03	1,135	0,424		
4,90	4,05	2,543	0,407		
6,56	10,33	7,883	0,376	1,64	–

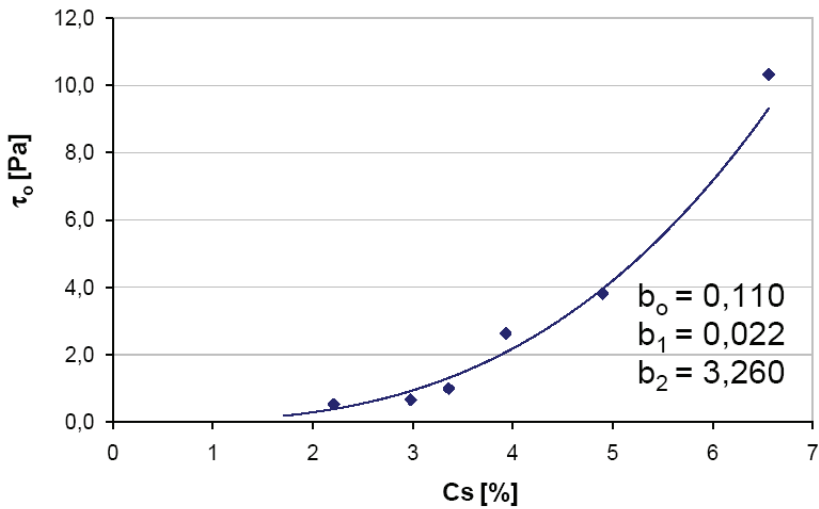
### 5.2.5. Zmienność parametrów reologicznych w funkcji koncentracji

Na rysunkach 9–12 przedstawiono przykładową zmienność parametrów reologicznych w funkcji koncentracji dla osadu nadmiernego pochodzącego z oczyszczalni w Namysłowie. Zgodnie z metodyką badań wiskozymetrycznych wyznaczono parametry reologiczne trzyparametrowego modelu Herschela-Bulkley'a  $\tau_0$ ,  $k$ ,  $n$  dla każdej próby osadu ściekowego (tab. 12). Wyniki pomiarów wskazują, że w zakresie analizowanych koncentracji wagowych  $C_s = 2,21 \div 6,65\%$ , występuje próg płynięcia  $\tau_0$ .



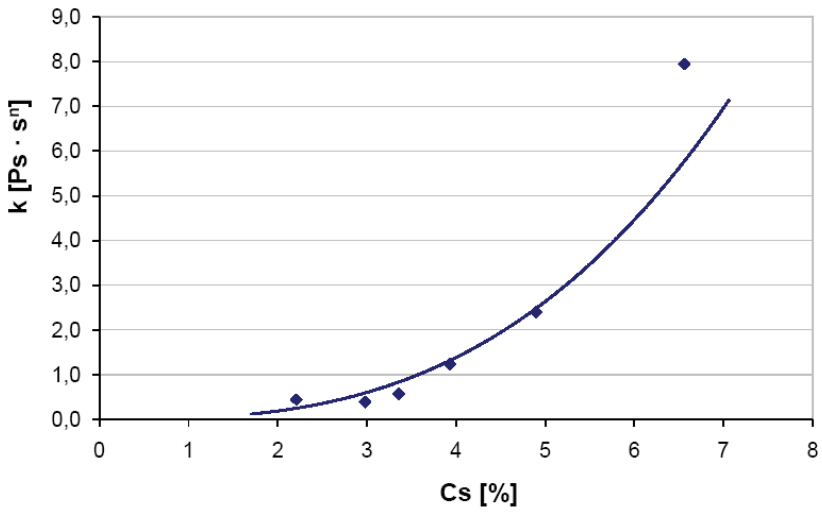
Rys. 9. Pseudokrzywa płynięcia osadu nadmiernego z oczyszczalni ścieków w Namysłowie dla różnych koncentracji wagowych

Fig. 9. Pseudo-flow curve for various sludge weight concentrations

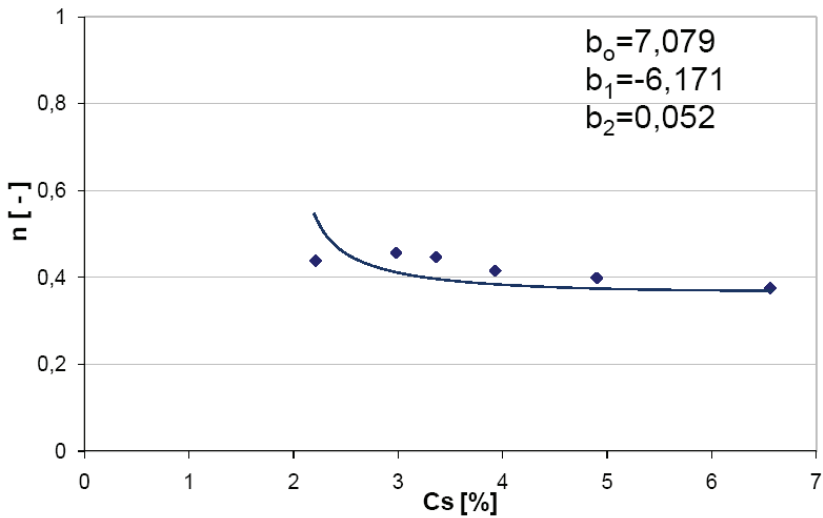


Rys. 10. Zależność  $\tau_0 C_s$  dla modelu Herschela-Bulkley'a

Fig. 10. Dependence  $\tau_0 C_s$  for Herschel-Bulkley model



Rys. 11. Zależność  $k$   $C_s$  dla modelu Herschela-Bulkley'a  
 Fig. 11. Dependence  $k$   $C_s$  for Herschel-Bulkley model

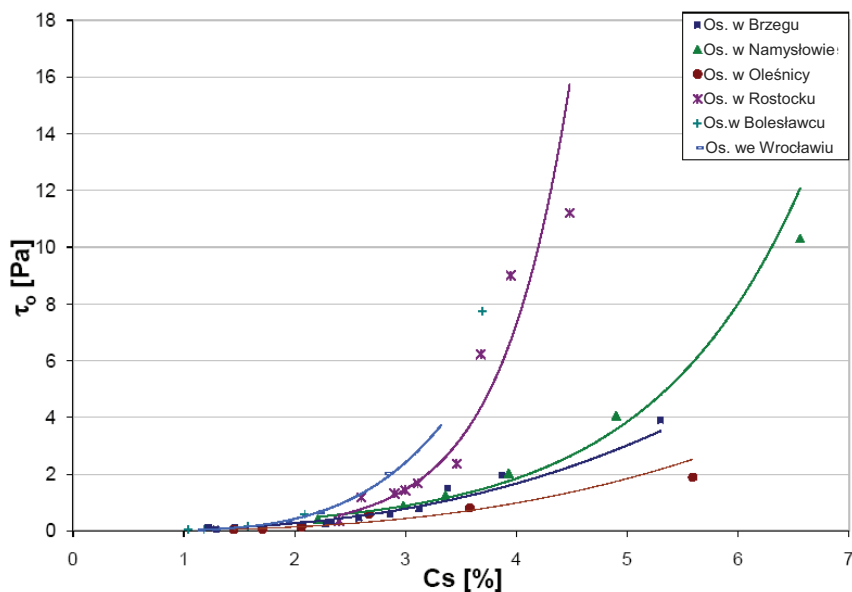


Rys. 12. Zależność  $n$   $C_s$  dla modelu Herschela-Bulkley'a  
 Fig. 12. Dependence  $n$   $C_s$  for Herschel-Bulkley model

Badania wiskozymetryczne dla szeregu koncentracji wagowych  $C_s$  osadów ściekowych (tab. 11, 12, 13) umożliwiają określenie wpływu koncentracji wagowej na wartości parametrów reologicznych [52]. Wyniki opracowania przedstawiono w formie wykresów zależności  $\tau_0 = f(C_s)$ ,  $k = f(C_s)$ , oraz  $n = f(C_s)$ . Jak widać (rys. 13, 14, 15), parametry reologiczne zależą wyraźnie od koncentracji wagowej  $C_s$ . Zależność ta jest następująca:

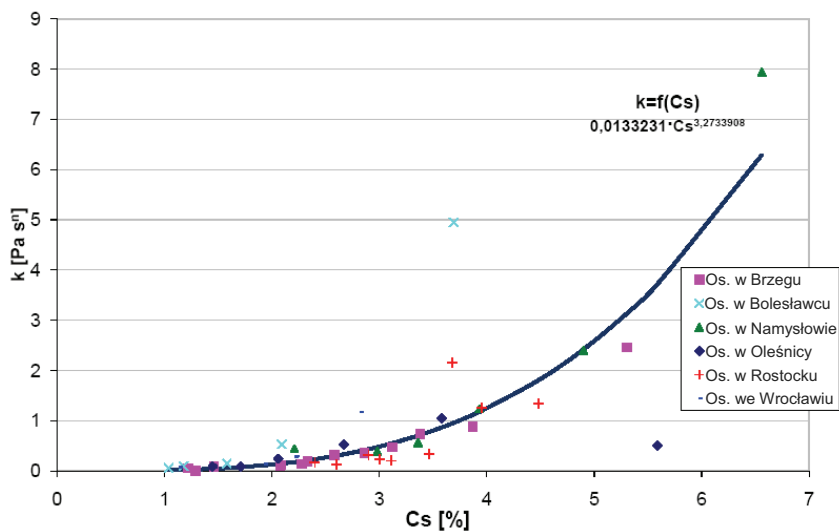
1. Próg płynięcia  $\tau_0$  i współczynnik sztywności  $k$  rosną wraz ze wzrostem koncentracji  $C_s$ .
2. Liczba strukturalna  $n$  wykazuje tendencję malejącą wraz ze wzrostem koncentracji wagowej  $C_s$ .

Na rysunkach 13, 14, 15 przedstawiono wykresy zbiorcze zależności parametrów reologicznych od koncentracji wagowej dla osadu nadmiernego pochodzącego z omawianych oczyszczalni ścieków. Dodatkowo dołączono wyniki pomiarów dla osadu pochodzącego z oczyszczalni w Rostocku. Analizując zależność  $\tau_0 = f(C_s)$ , zaobserwować można tendencję rozproszenia punktów pomiarowych w zakresie większych koncentracji wagowych  $C_s$  (rys. 16). Taka tendencja świadczy o bardzo wyraźnym wpływie koncentracji wagowej na próg płynięcia  $\tau_0$ . Nie można jednoznacznie przyjąć wartości progu płynięcia  $\tau_0$ , otrzymanych z pomiarów na jednej oczyszczalni w celu wykorzystania ich do obliczeń na innej oczyszczalni ścieków. Sugeruje to, że pomiary progu płynięcia  $\tau_0$  powinny być wykonywane indywidualnie dla każdej oczyszczalni ścieków.

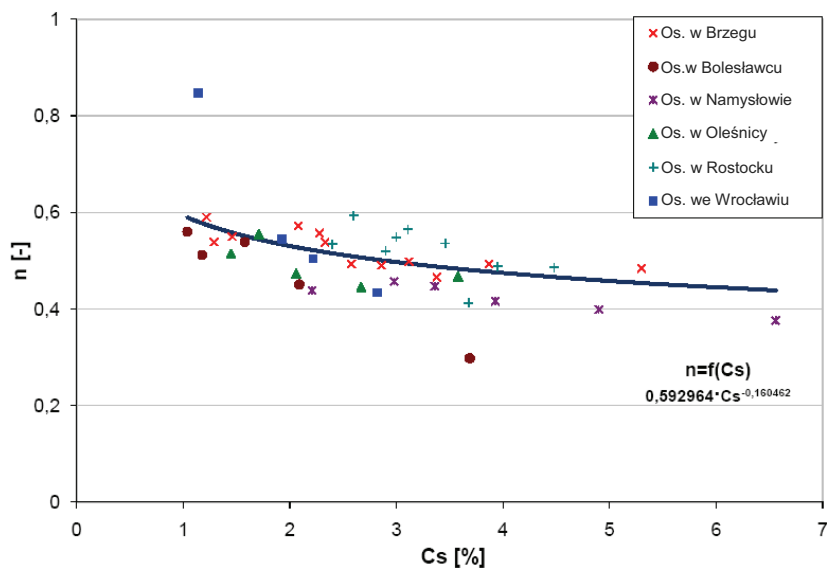


Rys. 13. Wykres zależności  $\tau_0 = f(C_s)$

Fig. 13. Dependence of flow yield stress on concentration for Herschel-Bulkley model



Rys. 14. Wykres zależności  $k = f(C_s)$   
 Fig. 14. Dependence of rigidity coefficient on concentration for Herschel-Bulkley model



Rys. 15. Wykres zależności  $n = f(C_s)$   
 Fig. 15. Dependence of structural number on concentration for Herschel-Bulkley model

Natomiast w przypadku zależności  $k = f(C_s)$  i  $n = f(C_s)$  punkty pomiarowe z różnych oczyszczalni ścieków tworzą wyraźny związek korelacyjny, który określono, korzystając z metody najmniejszych kwadratów jako funkcję aproksymującą:

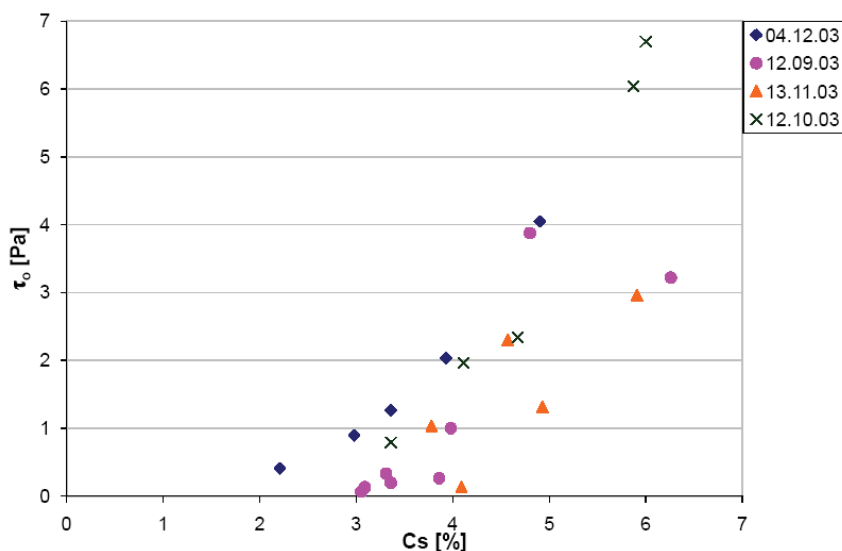
$y = a_1 \cdot x^{a_2}$ . Wartości parametrów  $a_1, a_2$  dla powyższych zależności wynoszą odpowiednio:

- dla  $k = f(C_s)$ :  $a_1 = 0,013332$ ,  $a_2 = 3,273391$
- dla  $n = f(C_s)$ :  $a_1 = 0,592964$ ,  $a_2 = -0,160462$

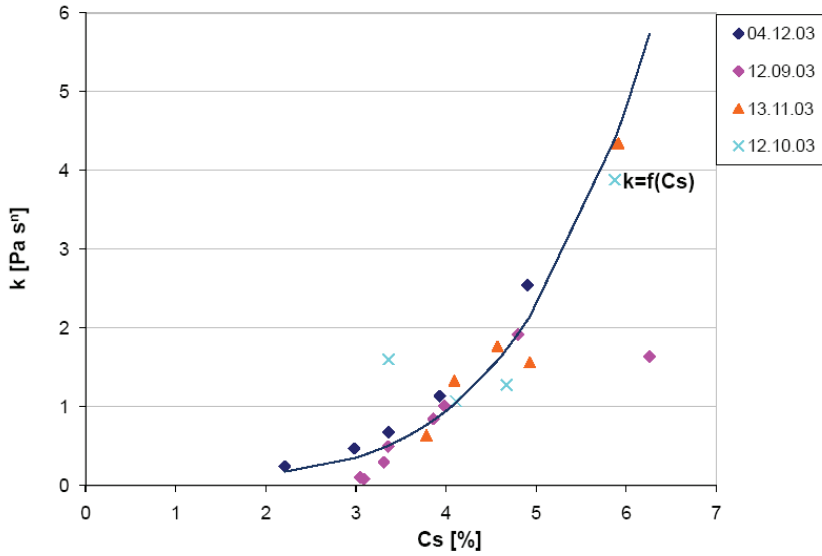
Znajomość opisu matematycznego tych związków pozwala na stwierdzenie, że otrzymane wyniki mogą być wykorzystane do przybliżonego określenia parametrów reologicznych  $k$  i  $n$  dla osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni o podobnej technologii i rodzaju oczyszczanych ścieków.

### 5.2.6. Zmienność parametrów reologicznych w funkcji czasu pobierania prób do analiz

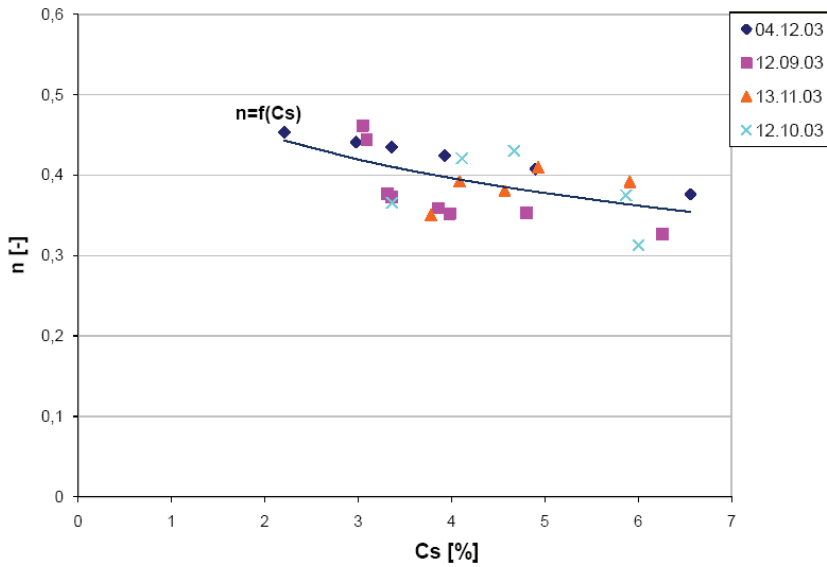
Na rysunkach 16, 17, 18 przedstawiono przykładowe zestawienie pomiarów osadu nadmiernego z oczyszczalni ścieków w Namysłowie dla prób pobieranych do analiz w różnych okresach czasu.



Rys. 16. Wykres funkcji  $\tau_0 = f(C_s)$  w zależności od daty pobierania prób  
 Fig. 16. Dependence of yield stress  $\tau_0$  for Herschel-Bulkley model on sampling



Rys. 17. Wykres funkcji  $k = f(C_s)$  w zależności od daty pobierania prób  
 Fig. 17. Dependence of rigidity coefficient  $k$  for Herschel-Bulkley model on sampling



Rys. 18. Wykres funkcji  $n = f(C_s)$  w zależności od daty pobierania prób  
 Fig. 18. Dependence of structural number  $n$  for Herschel-Bulkley model on depending on sampling



Dla osadu ściekowego o koncentracjach od  $C_s = 2,21\%$  do  $C_s = 6,56\%$  obliczono miarę dyspersji, która dla progę płynięcia wynosi 11,877, dla współczynnika sztywności  $k = 9,277$ , natomiast dla liczby strukturalnej  $n$  wartość ta równa jest 1,921. Maksymalną zmianę parametru  $\tau_0$  zanotowano dla osadów pobranych w dniach 04.12.03 i 12.09.03. Współczynnik zmienności dla zależności  $k = f(C_s)$  oraz  $n = f(C_s)$  wynosi 489,90, natomiast w przypadku zależności  $\tau_0 = f(C_s)$  wartość ta liczy 658,404. Przyjęto, iż wartość współczynnika zmienności dla zależności  $\tau_0 = f(C_s)$  jest zbyt duża i uniemożliwia ona zastosowanie zależności korelacyjnych. Punkty pomiarowe na wykresach zależności  $k = f(C_s)$  oraz  $n = f(C_s)$  tworzą związek korelacyjny, który również aproksymowano funkcją:  $y = a_1 \cdot x^{a_2}$ . Obliczone wartości współczynników  $a_1, a_2$ , wynoszą odpowiednio:

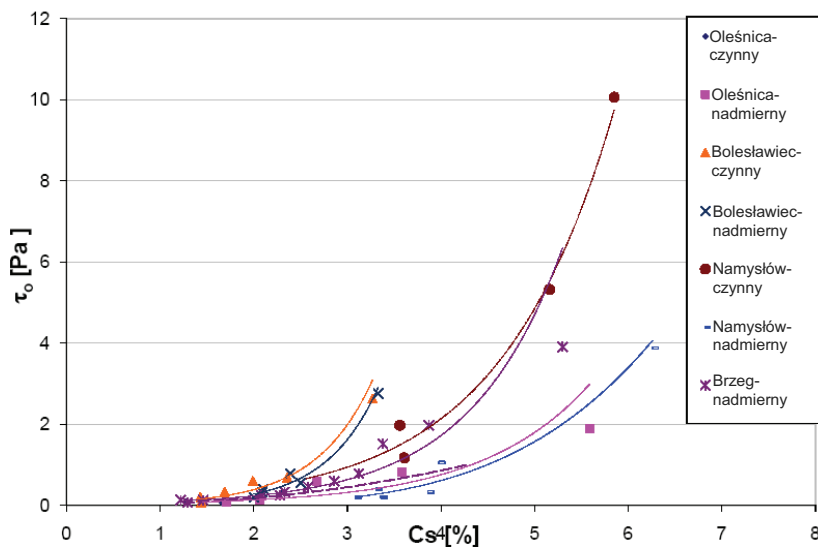
- 1) dla zależności  $k = f(C_s)$ :  $a_1 = 0,00303$ ,  $a_2 = 4,11926$
- 2) dla zależności  $n = f(C_s)$ :  $a_1 = 0,529856$ ,  $a_2 = -0,212202$

Obliczone wartości współczynników funkcji aproksymującej są inne, niż te, które otrzymano z analizy wykresów zbiorczych. Uzyskane z pomiarów dane aproksymowano również funkcjami powstałymi z analizy wykresów zbiorczych. Stosując zaproponowane funkcje  $0,01333231 \cdot C_s^{3,2733908}$ , w przypadku zależności  $k = f(C_s)$ , oraz  $0,592964 \cdot C_s^{-0,160462}$  dla zależności  $n = f(C_s)$  popełnia się błąd, który wynosi odpowiednio: średni błąd względny dla  $k = f(C_s)$  liczy 16,75%, natomiast dla  $n = f(C_s)$  wartość ta wynosi 8,0%. Resztkowa suma kwadratów odchyłeń dla zależności  $k = f(C_s)$  ma 11,8%, a dla zależności  $n = f(C_s)$  wynosi 4,0%. Pomiary te wskazują na wyraźną zmienność parametrów reologicznych wraz z czasem ich pobierania. Wykonując pomiar tego samego rodzaju osadu (z tej samej oczyszczalni) w różnym okresie czasu, obserwujemy istotne zmiany w charakterystykach ich płynięcia, a co za tym idzie, otrzymujemy różne parametry reologiczne [65]. Zmiany te można powiązać ze zmianą gęstości i uwodnienia analizowanych osadów, co spowodowane jest różnorodnością dopływających ścieków na oczyszczalnię. Dopływ ten cechuje bowiem dobową zmienność ładunków zanieczyszczeń w doprowadzanych ściekach. Pomiary reologiczne powinno się więc wykonywać łącznie z innymi parametrami technologicznymi.

### 5.2.7. Porównanie parametrów reologicznych osadu czynnego i osadu nadmiernego w badanym zakresie koncentracji

Na rysunkach 19, 20, 21 przedstawiono przykładowe wykresy zależności parametrów reologicznych otrzymanych z pomiarów osadu nadmiernego oraz osadu czynnego.

Jak widać, liczba strukturalna  $n$  osadu nadmiernego dla prób pochodzących z oczyszczalni ścieków w Bolesławcu, Oleśnicy i Brzegu jest wyższa niż liczba strukturalna  $n$  dla osadu czynnego. Natomiast w przypadku prób pochodzących z oczyszczalni ścieków w Namysłowie zależność ta nie potwierdza się. Współczynnik sztywności  $k$  dla osadu nadmiernego (próby pochodzące z oczyszczalni ścieków w Brzegu i Oleśnicy) jest minimalnie wyższy od współczynnika sztywności  $k$  osadu czynnego (w badanym zakresie koncentracji). W przypadku oczyszczalni z Namysłowa i Bolesławca próg płynięcia  $\tau_0$  dla osadu czynnego był nieco wyższy niż dla osadu nadmiernego. Osady z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy nie potwierdzają tej zależności, natomiast próby osadu czynnego z oczyszczalni ścieków w Brzegu analizowano za pomocą dwuparametrowego modelu Ostwalda de Waele'a. Badania te wymagają dalszych prac celem uzyskania jednoznacznych zależności. Otrzymane z pomiarów dane dotyczące osadu czynnego aproksymowano również funkcjami powstałymi z analizy wykresów zbiorczych, uzyskanych z analizy zależności dla osadu nadmiernego. Stosując zaproponowane funkcje  $0,01333231 \cdot C_s^{3,2733908}$ , w przypadku zależności  $k = f(C_s)$ , oraz  $0,592964 \cdot C_s^{-0,160462}$  dla zależności  $n = f(C_s)$  popełnia się błąd, który wynosi odpowiednio: średni błąd względny dla  $k = f(C_s)$  to 5,40%, natomiast dla  $n = f(C_s)$  wartość ta wynosi 0,76%.



Rys. 19. Wykres zależności  $\tau_0 = f(C_s)$  dla osadu czynnego i nadmiernego  
 Fig. 19. The dependence of yield stress  $\tau_0 = f(C_s)$  for activated sludge and sludge diagram



### 5.2.8. Określenie koncentracji granicznej

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wiskozymetrycznych dokonano transformacji pseudokrzywych płynięcia w rzeczywiste krzywe płynięcia, a następnie dobrano odpowiedni model reologiczny i określono parametry reologiczne.

Kolejnym krokiem było określenie dla badanej serii osadów koncentracji granicznej  $C_{s,gr}$  na podstawie zależności  $\tau_0 = f(C_s)$  oraz  $n = f(C_s)$ , zgodnie z metodyką podaną przez Czabana [19]. Koncentracja graniczna stanowi jeden z podstawowych parametrów reologicznych, rozgraniczający newtonowskie i nienewtonowskie zachowanie się mieszaniny. Powyżej koncentracji granicznych osad ma własności ciała nienewtonowskiego, a przy koncentracjach poniżej koncentracji granicznych wykazuje własności ciała newtonowskiego. Koncentracja graniczna  $C_{s,gr1}$  wynika z warunku  $\tau_0 = 0$ , natomiast  $C_{s,gr2}$  z równości  $n = 1$ . Jako koncentrację graniczną  $C_{s,gr}$  przyjmuje się wartość mniejszą spośród określonych koncentracji granicznych  $C_{s,gr1}$  i  $C_{s,gr2}$ .

Koncentrację graniczną obliczono zgodnie z metodyką podaną przez Czabana [19]. Dla modelu Herschela-Bulkley'a koncentrację graniczną oblicza się według następujących wzorów:

$$C_{s,gr1} = \left( -\frac{b_0}{b_1} \right) \left( \frac{1}{b_2} \right) \quad (9)$$

$$C_{s,gr2} = \left( \frac{1-b_0}{b_1} \right) \left( \frac{1}{b_2} \right) \quad (9a)$$

W tabelach 11, 12, 13 przedstawiono obliczone koncentracje graniczne. Określone koncentracje graniczne wykazują dla większości badanych osadów ściekowych  $C_{s,gr1} > C_{s,gr2}$ . Wyjątek stanowią osady pochodzące z oczyszczalni ścieków w Brzegu, które zachowują się jak ciało pseudoplastyczne (brak progu płynięcia ( $\tau_0$ ), oraz osad z wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek ( $C_{s,gr1} < C_{s,gr2}$ ).

Analiza wyników obliczeń koncentracji granicznej wskazuje, że:

- a) Osady komunalne zachowują się jak ciało Herschela-Bulkley'a powyżej koncentracji granicznej  $C_{s,gr1}$ , natomiast poniżej tej koncentracji ich zachowanie opisane jest za pomocą modelu Ostwalda de Waele'a. Przykładowo, dla oczyszczalni ścieków w Namysłowie, w zakresie koncentracji wagowych  $C_s$  od 2,21 do 6,56%, osad powyżej koncentracji  $C_{s,gr1} = 1,64\%$  zachowuje się jak ciało Herschela-Bulkley'a, natomiast poniżej tej koncentracji zachowanie osadu opisane jest modelem Ostwalda de Waele'a, aż do koncentracji bliskiej zero (brak możliwości obliczenia  $C_{s,gr2}$ ).
- b) Osady komunalne powyżej koncentracji  $C_{s,gr1}$  zachowują się jak ciało Herschela-Bulkley'a, poniżej koncentracji  $C_{s,gr1}$  zachowują się jak ciało pseudoplastyczne Ostwalda de Waele'a do  $C_{s,gr2}$ , natomiast poniżej koncentracji  $C_{s,gr2}$  zachowują się jak ciecze newtonowskie. Przykładowo, dla osadu pochodzącego z oczyszczalni ścieków w Oleśnicy (w zakresie koncentracji 1,29–3,59%) określono graniczną koncentrację wagową  $C_{s,gr1} = 1,35\%$ . Poniżej tej koncentracji model trzyparametrowy

- Herschela-Bulkley'a upraszcza się do modelu Ostwalda de Waele'a, natomiast poniżej koncentracji granicznej  $C_{s,gr2} = 0,51\%$  osad zachowuje się jak ciało Newtona.
- c) Osad czynny z oczyszczalni ścieków w Brzegu zachowuje się powyżej koncentracji granicznej  $C_{s,gr2} = 0,987\%$  jak ciało pseudoplastyczne, a poniżej tej koncentracji – jak ciało Newtona.
  - d) Osad z wrocławskiej oczyszczalni ścieków Janówek zachowuje się powyżej koncentracji granicznej  $C_{s,gr2} = 0,77\%$  jak ciało Herschela-Bulkley'a, natomiast w przedziale koncentracji  $C_{s,gr2} < C_s < C_{s,gr1} = 0,58\%$  osad zachowuje się nadal jak ciało plastyczno-lepkie opisane dwuparametrowym modelem Bingham'a. Poniżej koncentracji granicznej  $C_{s,gr1} = 0,58\%$  mieszanina zachowuje się jak ciało Newtona.

### 5.2.9. Wpływ temperatury na wartości parametrów reologicznych

Zachowanie osadów ściekowych charakteryzuje się silną zależnością od temperatury, koncentracji cząstek stałych oraz od zawartości części organicznych. Punkt przejścia ze strefy newtonowskiej do nienewtonowskiej przesuwa się wraz ze wzrostem temperatury. Z większości publikowanych prac wynika również, że lepkość pozorną płynu nienewtonowskiego maleje zwykle ze wzrostem temperatury [45, 73, 95]. Wstępną ocenę wpływu temperatury na parametry reologiczne osadów ściekowych przeprowadzono na podstawie pomiarów wiskozymetrycznych dla osadów pochodzących z oczyszczalni w Rostocku. Stwierdzono znaczący wpływ temperatury  $t$  na parametry reologiczne  $\tau_0$  i  $k$  w zakresie badanych temperatur  $t = 20\text{--}30^\circ\text{C}$  [50].

Zmienność parametrów reologicznych badanego osadu ściekowego, dla koncentracji  $C_s = 4,55\%$ , od temperatury  $t$  jest następująca: próg płynięcia  $\tau_0$  oraz współczynnik sztywności  $k$  maleje, jednocześnie ze wzrostem temperatury rzędu 20–25%, natomiast liczba strukturalna  $n$  nie ulega znaczącej zmianie. Wpływ temperatury zwiększa się ze wzrostem koncentracji  $C_s$  [50].

## 6. Analiza błędów pomiarowych

Wykonując pomiary za pomocą wiskozymetru rotacyjnego (VT550) należy zapewnić odpowiednie warunki, aby wyeliminować możliwe błędy pomiarowe. Lepkość wyliczana jest ze wzoru wiążącego naprężenie ścinające z szybkością ścinania i definiujemy ją jako:  $\eta = \tau \cdot G_p$ . Parametry potrzebne do określenia lepkości to:  $\tau = A \cdot Md$  i  $G = M \cdot \Omega$ . Współczynniki  $A$  i  $M$  związane są z geometrią wybranego układu pomiarowego.

Parametrami mającymi istotny wpływ na pomiar lepkości są: temperatura, ciśnienie, czas ścinania, jak również wielkość napięcia elektrycznego. Mierzony moment obrotowy powinien być wytwarzany wyłącznie przez opór próbki cieczy ścinanej w dokładnie określonych szczelinach pomiarowych. Dokładność pomiaru zadanego naprężenia ścinającego oraz mierzonego momentu obrotowego jest niezwykle istotna w przypadku pomiarów wiskozymetrycznych. Naprężenie ścinające jest wyliczane z momentu obrotowego  $M_d$  wytwarzanego na wale wirnika przez silnik asynchroniczny  $M_d = p \cdot I$  ( $p$  – współczynnik proporcjonalności,  $I$  – natężenie prądu).

Wpływ na wartość mierzonej lepkości ma dokładność określenia [83]:

- zadanego momentu obrotowego,
- zadanej prędkości wirnika (odkształcenie i prędkość kątowna),
- wymiarów geometrycznych,
- zadanej temperatury.

Wiskozymetry serii VT550 są komputerowo kalibrowane. Powtarzalność pomiarów momentu obrotowego wynosi  $\pm 1 \mu\text{Nm}$ . Prędkość wirnika jest kontrolowana za pomocą generatora tachometrycznego, połączonego silnikiem napędowym.

Małe szybkości ścinania mają olbrzymi wpływ na dokładność pomiaru [73, 83]. Błędna interpretacja wyników wiązać się może ze złym ustawieniem zera na skali naprężenia ścinającego, zwłaszcza w zakresie niskich szybkości ścinania. Wiskozymetr VT550 pozwala na automatyczne zerowanie przed przystąpieniem do pomiarów. Wykorzystując wiskozymetry typu Searle'a, należy uwzględnić efekty brzegowe [104]. Nadmierna objętość próbki może powodować błędy w pomiarze, zwłaszcza w przypadku dużych prędkości obrotowych silnika. Siła odśrodkowa powoduje wyrzucanie zebranego w górnym zagłębieniu nadmiaru cieczy do szczeliny pomiarowej. W efekcie, objętość cieczy poddawanej ścinaniu wzrasta, a co za tym idzie – wzrasta mierzony moment obrotowy. Próby niejednorodne podczas pomiarów mogą wykazywać czasowe fluktuacje zmierzonego naprężenia ścinającego. Zjawisko to określone jest jako tłumienie. Dokładny pomiar lepkości wymaga ustalenia równowagi między szybkością ścinania a powstałym naprężeniem ścinającym.

Lepkość jest silnie zależna od zmian temperatury. Poddanie próbki silnemu ścinaniu powoduje, że energia ścinania zostaje przetworzona na ciepło, podnosząc temperaturę próbki.

Zmiany fizyczne mierzonych próbek, takie jak rozdział faz w zawiesinach, jest również przyczyną błędów pomiarowych. Jeśli krzywa płynięcia wykazuje nagłe odchylenie od tendencji stopniowego wzrostu, można założyć pojawienie się zaburzenia wynikłego z rozdziału faz. Sedymentacja cząstek prowadzi do zależnego czasowo spadku lepkości. Założeniem pomiarów z wykorzystaniem viskozymetrów rotacyjnych jest zachowanie przepływu laminarnego. Przy dużych szybkościach ścinania następuje wyraźne odchylenie pseudokrzywej płynięcia od wcześniejszego przebiegu, świadczące o zmianie charakteru przepływu w szczelinie viskozymetru z laminarnego na turbulentny. Zmiana warunków przepływu może wywołać błędy pomiarowe do 30% wartości mierzonej lepkości.

Rozmiar szczeliny pomiarowej ma również wpływ na dokładność pomiaru lepkości. Szybkość ścinania na powierzchni wirnika zmienia się wraz z wartością ilorazu promienia zewnętrznego do promienia wewnętrznego.

Wartość błędu sumarycznego ( $\eta_{abs}$ ) wynika z błędów cząstkowych:

- a) błąd zadanego momentu obrotowego – 0,5%,
- b) błąd zadanej prędkości wirnika – 0,5%,
- c) błąd wynikający z wymiarów geometrycznych – 0,5%,
- d) błąd zadanej temperatury może być utrzymany na poziomie ok. 0,5%.

$$\Delta\eta_{abs} = \frac{1}{G_p} \cdot \Delta\tau + \frac{\tau}{G_p^2} \cdot \Delta G_p + d\eta / dI \cdot \Delta I + \eta / dt \cdot \Delta t \quad (10)$$

gdzie:

$\eta$  – lepkość mieszaniny,

$G_p$  – dokładność zadanej szybkości ścinania,

$\tau$  – dokładność zadanego momentu obrotowego,

$I$  – dokładność wymiarów geometrycznych,

$t$  – dokładność zadanej temperatury.

Jak wynika z powyższego równania, dominującym parametrem wpływającym na dokładność pomiarów jest błąd pomiaru szybkości ścinania. W celu ułatwienia obliczenia błędów pomiarowych dostępne są pakiety programów umożliwiających określenie sumarycznego błędu. W publikacji Gebharda Schramma znajduje się tabelaryczne zestawienie dokładności pomiarów, w zależności od zastosowanego układu pomiarowego [83]. Przykładowo, dla cieczy o lepkości 100,00 [mPas], po uwzględnieniu możliwych błędów cząstkowych i przy 200 [obr · min<sup>-1</sup>], wartość błędu sumarycznego wynosi 2,4%, natomiast przy 50 [obr · min<sup>-1</sup>] wynosi 9,5%.

## 7. Podsumowanie i wnioski

Komunalne osady ściekowe mogą być wykorzystane na cele nieprzemysłowe, gdy nie zostały przekroczone normatywne ilości metali ciężkich i substancji toksycznych, jak również gdy ich stan sanitarny pozwala na zastosowanie w wybranym kierunku zagospodarowania. Oceny możliwości zagospodarowania analizowanych osadów dokonano w oparciu o obowiązujące przepisy prawne. Osady z badanych oczyszczalni ścieków charakteryzowały się korzystnymi właściwościami chemicznymi, zawartością materii organicznej, makroskładników oraz wykazywały znaczące własności nawozowe. Charakteryzowały się jednak dużą zmiennością zawartości metali ciężkich (najczęściej normy dotyczące ilości cynku, chromu, i kadmu były przekroczone). Przeprowadzone analizy sanitarne potwierdzają konieczność higienizacji osadu przed ich nieprzemysłowym wykorzystaniem.

Parametry fizyczne, takie jak gęstość właściwa cząstek stałych, gęstość mieszaniny, wilgotność naturalna, zawartość cząstek organicznych, skład granulometryczny oraz koncentracja charakteryzowały się zmiennością. Realizacja oraz wybór odpowiedniego sposobu utylizacji osadu ściekowego może następować po dokonaniu oceny parametrów fizycznych, chemiczno-biologicznych oraz reologicznych. Pełna charakterystyka osadów ściekowych pozwala na podjęcie decyzji o sposobie ich utylizacji oraz na prawidłowe projektowanie i eksploatację ciągów technologicznych oczyszczalni ścieków.

Praca zawiera analizę możliwości rolniczego zagospodarowania osadów ściekowych w oparciu o wyznaczoną charakterystykę płynięcia. Charakterystykę osadu ściekowego przeprowadzono na podstawie laboratoryjnych badań wiskozymetrycznych z użyciem wiskozymetru rotacyjnego typu Couette'a-Searle'a.

Osad ściekowy jest dwufazową mieszaniną dyspersyjną, która w zależności od koncentracji wykazuje różne wartości progu płynięcia  $\tau_0$ . Bardzo rzadki osad zachowuje się jak ciecz newtonowska. W większości przypadków wzrost koncentracji powoduje zmianę charakteru osadu i determinuje ich nienewtonowskie zachowanie. Spośród przeanalizowanych modeli reologicznych (Newtona, Bingham, Vočadli, Ostwalda de Waele'a, Herschela-Bulkley'a) najlepszym do opisu zachowania się osadów ściekowych okazał się trzyparametrowy uogólniony model Herschela-Bulkley'a, ujmujący w sobie modele dwuparametrowe oraz model Newtona. W przypadku osadów czynnych o koncentracji  $C_s = 1,15-5,73\%$  wykorzystywano model Ostwalda de Waele'a. Model ten był również przydatny w przypadku osadów ściekowych w zakresie koncentracji  $C_s = 0,47-1,50\%$ . W pozostałych przypadkach osadów ściekowych, zwłaszcza osadu nadmiernego, wykorzystywano uogólniony model Herschela-Bulkley'a. Osady nadmierne w zakresie badanych koncentracji zachowują się jak ciała plastyczno-lepkie z charakterystycznym progiem płynięcia  $\tau_0$ . Stwierdzono, że koncentracja wagowa jest ważnym czynnikiem determinującym zakres ruchu laminarnego przy przepływie



osadów ściekowych w rurociągach. Przeprowadzone badania laboratoryjne upoważniają do postawienia następujących wniosków:

1. Badania parametrów fizycznych potwierdzają dużą zmienność jakości osadów powstających podczas procesu oczyszczania ścieków. Analizowane osady charakteryzowały się wysokim uwodnieniem i zmienną koncentracją. Określone parametry fizyczne osadów ściekowych zmieniały się w szerokim zakresie. Dotyczy to zarówno gęstości cząstek ( $\rho = 1557,7 - 1657,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), jak również średniej średnicy masy ( $d_{50} = 38,089 - 135,397 \text{ }\mu\text{m}$ ). Wilgotność naturalna osadów zmieniała się w granicach  $W_n = 507,5\% - 42122,22\%$  (dla osadu czynnego) oraz  $W_n = 4260,7 - 9578,61\%$  (dla osadu nadmiernego).

2. Zawartość metali ciężkich w analizowanych osadach przekraczała wartości określone dla zastosowania osadów ściekowych w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne. Dotyczyło to głównie chromu, jak również cynku i kadmu. Rozmieszczenie oznaczanych metali ciężkich w ciągu technologicznym oczyszczalni ścieków było zróżnicowane. Stwierdzono również, że zawartość składników nawozowych w badanych osadach jest korzystna dla ich przyrodniczego wykorzystania. Skład fizykochemiczny osadów jest zmienny i zależy od rodzaju ścieków dopływających do oczyszczalni ścieków.

3. Z przeprowadzonych analiz mikrobiologicznych wynika, że badane osady ściekowe przed higienizacją nie mogą być stosowane w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne z uwagi na obecność bakterii z rodzaju *Salmonella*. Skład gatunkowy analizowanych prób osadu świadczy natomiast o dobrej pracy osadu czynnego, zapewniającego prawidłowy przebieg procesu oczyszczania.

4. Z charakterystyki reologicznej osadów ściekowych wynika, że mieszanina w warunkach ścinania w szczelinie wiskozymetru rotacyjnego, dla badanych koncentracji wagowych ( $C_s = 0,47 - 6,56\%$ ), zachowuje się jak ciecz reostabilna, niezależna od czasu ścinania.

5. Ustalono zależność parametrów reologicznych przyjętego modelu od koncentracji wagowych  $C_s$ ; próg płynięcia  $\tau_0$  i współczynnik sztywności  $k$  rosną, natomiast liczba strukturalna  $n$  maleje jednocześnie ze wzrostem koncentracji wagowej  $C_s$ .

6. Przeprowadzone badania potwierdzają, iż reologiczne zachowanie się osadu ściekowego uzależnione jest od wagowej koncentracji granicznej  $C_{s,gr}$ . Dla koncentracji wagowych  $C_s < C_{s,gr}$  osad ściekowy zachowuje się jak ciecz newtonowska, natomiast dla koncentracji wagowych  $C_s > C_{s,gr}$  – jak ciecz nienewtonowska o własnościach ciała plastyczno-lepkiego, z charakterystycznym progiem płynięcia  $\tau_0$ , lub jak ciecz pseudoplastyczna.

7. Koncentracja graniczna  $C_{s,gr}$ , rozgraniczająca newtonowskie i nienewtonowskie zachowanie osadu ściekowego, zmienia się (w zakresie analizowanych koncentracji) w przedziale  $C_{s,gr2} = 0,1 - 0,99\%$  w zależności od rodzaju osadu ściekowego. Osady komunalne powyżej koncentracji  $C_{s,gr1}$  zachowują się jak ciało Herschela-Bulkley'a, poniżej koncentracji  $C_{s,gr1}$  do  $C_{s,gr2}$  zachowują się jak ciało pseudoplastyczne Ostwalda de Waele, natomiast poniżej koncentracji  $C_{s,gr2}$  zachowują się jak ciecze newtonowskie. Koncentracja graniczna  $C_{s,gr}$  rozgraniczająca newtonowskie i nienewtonowskie zachowanie osadu zależy wyraźnie od rodzaju osadu ściekowego.

8. Korelacji pomiędzy parametrami reologicznymi a pozostałymi badanymi parametrami nie odnaleziono i tematyka ta wymaga dalszych badań. Dotyczy to zwłaszcza własności mikrobiologicznych. Natomiast na wykresach zbiorczych zależności parametrów reologicznych od koncentracji  $C_s$ , dla każdej z omawianych oczyszczalni ścieków, zaobserwowano występowanie związku korelacyjnego w przypadku funkcji  $k = f(C_s)$  oraz  $n = f(C_s)$ . Parametrem wymagającym jednak każdorazowo pomiaru jest próg płynięcia  $\tau_0$ .

## 8. Piśmiennictwo

- [1] Abu-Orf M. M., Dentel A.: 1997. Effect of mixing on rheological characteristics of conditioned sludge: full-scale studies, *Water Science and Technology*, Great Britainstr, 51–63.
- [2] Bandrowski J., Merta H., Ziolo J.: 2001. Sedymentacja zawiesin. Zasady i projektowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [3] Bartoszewski K., Bicz W., Dymaczewski Z., Jaroszyński T., Kujawa K. i in.: 1997. Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków, PZITS, Poznań.
- [4] Battistoni P.: 1997. Pre-treatment, measurement execution procedure and waste characteristics in the rheology of sewage sludges and the digested organic fraction of municipal solid wastes, *Water Science and Technology*, Great Britain, 33–43.
- [5] Beak B.: 2001. Sludge treatment and disposal, Environmental Protection Agency.
- [6] Behnke M., Sobociński Z.: 2006. Gospodarka komunalnymi osadami ściekowymi w Polsce – wymagania formalno-prawne i sposoby użytkowania, *Forum Eksploatatora*, 3/4, 13–16.
- [7] Bever J.: 1997. Zaawansowane metody oczyszczania ścieków: eliminacja azotu i fosforu, sedymentacja i filtracja, Oficyna Wydawnicza Projprzem-Eko, Bydgoszcz.
- [8] Bień J.: 2001. Osady ściekowe problem aktualny XII Konferencja Naukowo-Techniczna, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa-Ustroń.
- [9] Bień J.: 2002. Osady ściekowe. Teoria i praktyka, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- [10] Bień J., Matysiak B., Wystalska K.: 1999. Stabilizacja i odwadnianie osadów ściekowych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- [11] Bień J., Matysiak B., Bień J. D.: 2001. Wpływ dawki wybranych polielektrolitów na właściwości reologiczne osadów ściekowych, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 4/1, 27–39.
- [12] Bień J.B., Bień J.D., Matysiak B.: 2002. Gospodarka odpadami w oczyszczalniach ścieków, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- [13] Biernacka J., Pawłowska L.: 1994. Zagospodarowanie i wykorzystanie osadów z miejskich oczyszczalni ścieków, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- [14] Borkowska E.B.: 2001. Funkcjonalna i ładna – oczyszczalnia ścieków Zielonej Góry, *EkoTechnika*, 4/20.
- [15] Buck H.: 1999. Mikroorganizmy w osadzie czynnym, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Szczecin.

- [16] Buniak W., Hus S., Łomotowski J., Kempieński J., Wierzbicki K. i in.: 1997. Analiza dotychczasowych badań nad unieszkodliwianiem rolniczych odpadów produkcyjnych, w tym gnojowicy, Instytut Inżynierii Środowiska, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Wrocław, cz. I, cz. II.
- [17] Buraczewski G.: 1994. Biotechnologia osadu czynnego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [18] Butarewicz A.: 2005. Wykrywanie i określanie liczby żywych jaj helmintów w osadach z oczyszczalni ścieków województwa podlaskiego, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN.
- [19] Czaban S.: 1987. Wyznaczanie parametrów hydrotransportu rurowego reostabilnych mieszanin dwufazowych, Rozprawy, Zesz. Nauk. AR Wroc., Wrocław, Nr 60.
- [20] Czekąła J.: 2002a. Wybrane własności osadów ściekowych z oczyszczalni rejonu wielkopolski, *Acta Agrophysica* 70, Lublin, 75–82.
- [21] Czekąła J.: 2002b. Wybrane własności osadów ściekowych z oczyszczalni rejonu wielkopolski, *Acta Agrophysica* 70, Lublin, 83–90.
- [22] Czekąła J.: 2002c. Wybrane własności osadów ściekowych z oczyszczalni rejonu wielkopolski, *Acta Agrophysica* 70, Lublin, 91–99.
- [23] Czyżyk F.: 1974. Wyniki doświadczeń z nawożeniem pól ornych osadami ściekowymi, *Wiad. IMUZ* 22, 2–8.
- [24] Dadej W.: 2004. Gospodarka osadowa w oczyszczalni ścieków „Hajdów”, *EkoTechnika*, 3/31, 27–29.
- [25] Dentel S.K.: 1997. Evaluation and role of rheological properties in sludge management, *Water Science and Technology*, Great Britainstr. 1–9.
- [26] Debicki R.: 1990. Kształtowanie podstawowych elementów żyzności gleby niekonwencjonalnymi środkami nawozowymi, *Problemy Agrofizyki*, PAN Instytut Agrofizyki w Lublinie, Wrocław, Warszawa, Kraków, 62.
- [27] Dirkwager A.H., L’Hermite P.: 1988. Sewage sludge treatment and use. New developments, *Technologies Aspects and Environmental Effects*, Elsevier Applied Science, London-New York.
- [28] Drabent R.: 1994. Podstawy reologii, Skrypt Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie, Olsztyn.
- [29] Eikelboom D.H., van Buijsen H.J.J.: 1999. Podręcznik mikroskopowego badania osadu czynnego, Wydawnictwo Seidel-Przywiecki Sp. z o.o., Szczecin.
- [30] Ferguson J., Kembłowski Z.: 1995. Reologia stosowana płynów, Wydawnictwo MARCUS s.c., Łódź.
- [31] Forster C.F.: 2002. The rheological and physico-chemical characteristics of sewage sludges, *Enzyme and microbial technology*, Great Britain, 30, 340–345.
- [32] Fukas-Płonka Ł., Zielewicz-Madej E.: 2000. Stabilizacja osadów nadmiernych w procesie fermentacji metanowej, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 3/1–2, 37–48.
- [33] Gambuś F., Gorlach E.: 2001. Problemy zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi. przeciwdziałanie i łagodzenie skutków zanieczyszczenia gleb, *Aura*, 8, 10–12.

- [34] Haarhoff J., Bezuidenhout E.: 1999. Full-scale evaluation of activated sludge thickening by dissolved air flotation, *Water Science and Technology*, Great Britain, 153–165.
- [35] Hartmann L.: 1996. Biologiczne oczyszczanie ścieków, Instalator Polski, Warszawa.
- [36] Hermanowicz W.: 1976. Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków, Arkady, Warszawa.
- [37] Honey H., Pretorius W.: 2000. Laminar flow pipe hydraulics of pseudoplastic-thixotropic sewage sludge, *Water Science and Technology*, Great Britain, 19–26.
- [38] Imhoff K., Imhoff K.R.: 1996. Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
- [39] Janczukowicz W., Pesta J.: 2006. Rolnicze wykorzystanie osadów z komunalnych oczyszczalni ścieków na przykładzie województwa warmińsko-mazurskiego – możliwości i bariery, *Forum Eksploatatora*, 2/23.
- [40] Janosz-Ratajczyk M.: 2004. Komunalne osady ściekowe – podział, kierunki zastosowania oraz technologie przetwarzania, odzysk i unieszkodliwianie, Częstochowa, kwiecień.
- [41] Janosz-Ratajczyk M., Zakrzywska E., Włodarczyk-Makuła M., Tokarz I.: 2000. Zmiany zawartości WWA w osadach ściekowych podczas fermentacji metanowej z dodatkiem niejonowej substancji powierzchniowo czynnej, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 3/1–2, 49–62.
- [42] Kalisz L., Kazimierczuk M., Stałbut J.: 1999. Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych, Świnoujście.
- [43] Kembłowski Z.: 1973. Reometria płynów nienewtonowskich, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [44] Kempieński J.: 1999. Opory ruchu przy przepływie gnojowicy w rurociągach. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu „Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych”, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Augustów, 173–182.
- [45] Kempieński J.: 2000. Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka gnojowicy utylizowanej w rolnictwie., *Zesz. Nauk. AR Wroc., Rozprawy CLXIX*.
- [46] Kempieński J.: 2000a. Dimensionless criterion  $\chi$ (Regen) for plastic and viscous mixture flows in laminar flow zone. 10th International Conference on Transport & Sedimentation of Solid Particles, *Zesz. Nauk. AR Wroc., Konferencje XXVI*.
- [47] Kempieński J.: 2000b. Określenie krzywej płynięcia gnojowicy z uwzględnieniem poślizgu na ścianie rurociągu., *Zesz. Nauk. AR Wroc., Inżynieria Środowiska*.
- [48] Kempieński J.: 2001. Problematyka mieszania w dużych reaktorach i jego wpływ na skuteczność produkcji biogazu., *Zesz. Nauk. AR Wroc., Konferencje XXXIII*.
- [49] Kempieński J.: 2001. Flow characteristic of homogeneous mixture in laminar flow zone, *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Gdańsk, Vol XLVIII.

- [50] Kempiański J., Malczewska B.: 2004. The influence of temperature on rheological properties of sludge, 12th International Conference TRANSPORT AND SEDIMENTATION OF SOLID PARTICLES (T&S), Praga.
- [51] Kempiański J., Malczewska B.: 2004. Charakterystyka reologiczna osadów ściekowych, Zesz. Nauk. AR Wroc. Nr 482. Monografie 35, Zasoby i jakość wód, monografia pod red. L. Radczuk. 35–45.
- [52] Kempiański J., Malczewska B.: 2005a. Określenie modelu reologicznego osadów ściekowych, Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, 4(1), 1–9.
- [53] Kempiański J., Parzonka W.: 2001. Technologia utylizacji gnojowicy świńskiej z uwzględnieniem ochrony środowiska, Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. PAN, Wydział V Nauk Rolniczych, Leśnych i Weterynaryjnych, Warszawa, zeszyt 475.
- [54] Kępka T.: 1998. Kompostowanie komunalnych osadów ściekowych, Ekotechnika, 1/5, 16–17.
- [55] Klimiuk E., Łebkowska M.: 2004. Biotechnologia w ochronie środowiska, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [56] Klimowicz H.: 1989. Znaczenie mikrofauny przy oczyszczaniu ścieków osadem czynnym, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- [57] Korytkowski J.: 1995. Zagospodarowanie osadów ściekowych w świetle norm prawnych obowiązujących w krajach Unii Europejskiej i w Polsce, Materiały z konferencji, Zagospodarowanie osadów pościekowych – metody i technologie, Kiekrz.
- [58] Kowalski Z., Przewrocki P., Kulczycka J.: 2004. Możliwości ograniczenia wpływu osadów z oczyszczania ścieków komunalnych na środowisko, Eko-Technika, 3/31, 17–22.
- [59] Kuczewski K., Nowak I.: 2002. Oddziaływanie oczyszczalni roślinno-glebowej na wody podziemne, Zesz. Nauk. AR Wroc. nr 361. 70.
- [60] Kuczewski K., Paluch J.: 1997. Oczyszczanie ścieków bytowo-gospodarczych na terenach wiejskich w oczyszczalniach roślinno-glebowych, Zesz. Nauk. AR Wroc.
- [61] Kutera J.: 1990. Stan i technologie wykorzystania ścieków i gnojowicy w rolnictwie oraz spodziewane efekty w ochronie wód, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, PWRiL, Warszawa.
- [62] Lemmer H.: 2000. Przyczyny powstawania i zwalczanie osadu spęczniałego, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Szczecin.
- [63] Lotito V., Spinosa L., Minini G., Antonacci R.: 1997. The rheology of sewage sludge at different steps of treatment, Water Science and Technology, Great Britain, 79–87.
- [64] Łomotowski J., Szpindor A.: 1999. Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków, Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- [65] Malczewska B.: 2008. Sewage Sludge Rheological Properties Variability in Dependence of Drawing Sludge Samples at different times, Archives of Environmental Protection, 34, 4, 109–116.

- [66] Miksch K.: 2003. Nowe tendencje w biotechnologii ścieków i osadów ściekowych, Materiały konferencyjne V Zjazd kanalizatorów polskich POLKAN, Łódź.
- [67] Moeller G., Torres L.: 1997. Rheological characterization of primary and secondary sludges treated by both aerobic and anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 207–211.
- [68] Monteiro P.S.: 1997. The influence of anaerobic digestion process on the sewage sludges rheological behaviour, *Water Science and Technology*, Great Britain, 61–69.
- [69] Oleszkiewicz J., Kalinowska E.: 1998. Gospodarka osadami ściekowymi. Poradnik decydenta, LEM s.c, Kraków, Wydanie I.
- [70] Paluch J.: 1984. Oczyszczanie ścieków miejskich w środowisku glebowym, Akademia Rolnicza, Wrocław.
- [71] Parzonka W.: 1968. Teoria wiskozymetrów dla jednorodnych mieszanin gruntowo-wodnych, *Rozprawy Inżynierskie*, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska. Instytut Budownictwa Wodnego i Ziarnego, Wrocław, tom 16, z. 1, s. 69–99.
- [72] Parzonka W.: 1968. Charakterystyka laminarnego płynięcia cieczy nienewtonowskich za pomocą modelu reologicznego o trzech parametrach, *Rozprawy Inżynierskie*, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska. Instytut Budownictwa Wodnego i Ziarnego, Wrocław, tom 16, z. 3, s. 281–298 .
- [73] Parzonka W.: 1977. Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych, Skrypt Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- [74] Parzonka W.: Omelański A., 1970. Metoda pomiaru reologicznych charakterystyk i opis płynięcia homogenicznych mieszanin gruntowo-wodnych, *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Sanitarnej i Wodnej Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław.
- [75] Parzonka W., Wolski W.: 1968. Przybliżone określanie charakterystyk plastyczno-lepkiego płynięcia jednorodnych mieszanin gruntowo-wodnych za pomocą pojedynczego cylindra wiskotestera, *Archiwum Hydrotechniki*.
- [76] Pei-Shan Y., L.C.C., C.Y.C., WU Rome-Ming L.D.: 2001. Network strength and dewaterability of flocculated activated sludge, *Water Research*, 36, 539–550.
- [77] Podstawy oraz praktyka przeróbki i zagospodarowania osadów. Materiały międzynarodowego seminarium szkoleniowego: 1998. Wydawnictwo LEM s.c., Kraków.
- [78] Poitou A., Racineux G., Burlion N.: 1997. Identification and measurement of pastes rheological properties – effects of water dissociation, *Water Science and Technology*, Great Britain, 19–27.
- [79] Proff A., Lohmann J. H.: 1997. Calculation of pressure drop in the tube flow of sewage sludges with the aid of flow curves, *Water Science and Technology*, Great Britain, 27–33.
- [80] Reszel R.S., Głowacka A: 1999. Porównanie wpływu osadu ściekowego stabilizowanego wapnem i NPK na zawartość pierwiastków w glebie lekkiej i kukurydzy,

- Instytut Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, nr 18, 365–372.
- [81] Rosik-Dulewska C.: 2005. Podstawy gospodarki odpadami, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [82] Sanin F.D.: 2002. Effect of solution physical chemistry on the rheological properties of activated sludge, *Water Science and Technology*, Great Britain, 28, 207–211.
- [83] Schramm G.: 1998. Reologia. Podstawy i zastosowania, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań.
- [84] Shi F.N., Zheng X.F.: 2003. The rheology of flotation froths, *International Journal of mineral processing*, 69, 115–128.
- [85] Sikorski M., Wojarska-Maciejewska I.: 1997. Przeróbka i wykorzystanie osadów ściekowych na terenach wiejskich – cz. II, *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, 1, 18–20.
- [86] Siuta J.: 1995. Gleba – diagnozowanie stanu i zagrożenia, Wydawnictwo Instytutu Ochrony Środowiska, Warszawa.
- [87] Siuta J.: 1997. Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych. Materiały z II konferencji naukowo-technicznej, *Ekoinżynieria*, Puławy-Lublin- Jeziórko.
- [88] Siuta J.: 2001. Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych. ochrona i rekultywacja gruntów., *Materiały z IV Konferencji naukowo-technicznej, Ekoinżynieria*, Bydgoszcz.
- [89] Siuta J.: 2003. Rekultywacyjne i nawozowe użytkowanie odpadów organicznych. materiały z II Konferencji naukowo-technicznej, *Ekoinżynieria*, Warszawa.
- [90] Slatter P.T.: 1997. The rheological characterisation of sludges, *Water Science and Technology*, Great Britain, 9–19.
- [91] Slatter P.T.: 2004. The hydraulic transportation of thickened sludges, *Water Science and Technology*, Great Britain, 66–68.
- [92] Smilgin Z.: 2005. Kształtowanie reologicznych parametrów osadów ściekowych wykorzystywanych do biologicznego umacniania skarp, rozprawa doktorska, maszynopis, Instytut Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej we Wrocławiu.
- [93] Sozański M.M.: 1972. Reologia osadów ściekowych, *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, nr 15.
- [94] Sozański M.M.: 1976. Własności reologiczne uwodnionych osadów pokoagulacyjnych, *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, Nr 34.
- [95] Sozański M.M.: 1988. Charakterystyka laminarnego płynięcia osadów pokoagulacyjnych jako podstawa oceny parametrów ich transportu rurowego, *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, nr 28.
- [96] Sozański M.M., Kempa E., Grocholski K., Bień J.: 1997. The rheological experiment in sludge properties research, *Water Science and Technology*, Great Britain, 69–78.



- [97] Stańczyk E.: 1999. Kompostowanie i użytkowanie kompostu, Materiały z I Konferencji naukowo-technicznej „Przydatność kompostów osadowych do sporządzenia podłoża ogrodniczych”, Puławy-Warszawa.
- [98] Szetela R., Dymaczewski Z.: 2002. Modyfikacja obecnej postaci modelu osadu czynnego ASM 2d, Ochrona Środowiska, 1/84.
- [99] Szymańska-Pulikowska A.: 2003. Podstawy gospodarki odpadami, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Wrocław.
- [100] Tixier N., Guibaud G., Baudu M.: 2003. Determination of some rheological parameters for characterization of activated sludge, Bioresource Technology, 90, 215–220.
- [101] Urbaniak M.: 1997. Przerób i wykorzystanie osadów ze ścieków komunalnych, Katedra Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Ekologii Miast w Łodzi, Lublin-Łódź.
- [102] Wichmann K., Riehl A.: 1997. Mechanical properties of waterworks sludges shear strength, Water Science and Technology, Great Britain, 43–51.
- [103] Wierzbiński J.: 1963. Wykorzystywanie ścieków w rolnictwie i leśnictwie, PWRiL, Warszawa.
- [104] Wilkinson W. L.: 1960. Ciecze nienewtonowskie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [105] Wojnowska-Baryła I., Stachowiak D.: 1997. Systemy oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego, Akademia Rolniczo-Techniczna, Olsztyn.
- [106] Yen P.-S., Chen L., Chien C., Wu R.-M., Lee D.: 2002. Network strength and dewaterability of flocculated activated sludge, Water Research, 36, 539–550.
- [107] Zabłocki Z.: 1977. Wykorzystanie „przetrawionych” osadów pościelowych na terenach w użytkowaniu rolniczym w stanie Illinois, USA, Seminarium naukowo-techniczne, Szczecin.
- [108] Dz. U.02.134.1140 z dnia 27 sierpnia 2002 r. – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych.
- [109] Grunwald A.: Oczyszczalnie trzcinowe, czyli chrząszcz brzmi w trzcinie, 11.07.2006. <http://dom.gazeta.pl/Ladny-Dom/1,61611,2863193.html>
- [110] Karuga S.: Przegląd przepisów Unii Europejskiej w zakresie odpadów, w tym odpadów niebezpiecznych i specjalnych, 18.10.2007, [http://greenworld.serwus.pl/odpady\\_UE.pdf](http://greenworld.serwus.pl/odpady_UE.pdf),
- [111] Kwarcia A.: Roślinne oczyszczalnie ścieków, 11.02.2005, <http://www.chem.uw.edu.pl/people/AMyslinski/cw13/korzenie.html>
- [112] Mazur K., Filipek-Mazur B.: Produkcja i wartość nawozowa kompostów z terenu miasta Krakowa, 11.02.2004, <http://www.most.org.pl/ZB/inne/kompost/5.htm>
- [113] Muszyński P.: Energetyka jądrowa, 11.02.2005, <http://info.ellaz.pl/GazetaEl.nsf/>
- [114] Strona internetowa Głównego Urzędu Statystycznego, 12.10.2007, <http://www.stat.gov.pl>
- [115] Strony internetowe firmy Bio-Ecology services, 18.10.2007, <http://www.bio-ecology.pl/o9.html>

- [116] Strony internetowe firmy DBS Manufacturing, 18.10.2007,  
<http://www.dbsmfg.com>
- [117] Strona producenta wiskozymetrów rotacyjnych, 18.10.2007,  
<http://www.donserv.pl>
- [118] Strona producenta wiskozymetru VT550, 20.11.2005,  
<http://www.haake.de>
- [119] Strona polskiego przedstawiciela firmy Haake, 11.02.2005  
<http://www.rhl.poznan.pl>
- [120] Strony internetowe organizacji BHR Group, 18.10.2007,  
<http://www.bhrgroup.com>
- [121] Strona firmy produkującej granulometr laserowy, 20.11.2006,  
<http://www.malvern.com>
- [122] Instrukcja obsługi: LEO 1550 Scanning Electron Microscope, 20.11.2007  
<http://microlab.berkeley.edu/labmanual/chap8/8.42.html>
- [123] Strona internetowa firmy Zeiss Carl Zeiss SMT, 11.02.2005,  
<http://www.smt.zeiss.com>
- [124] Strony internetowe Pracowni mikroskopii skaningowej, 10.01.2006,  
<http://ultra.cto.us.edu.pl/kgmip/esem.htm>
- [125] Materiały informacyjne – Sewage Sludge Homepage, 20.10.2007,  
<http://www.ejnet.org/sludge>
- [126] Strony internetowe firmy Ekopolgrunt, 20.10.2005  
[http://www.ekopolgrunt.pl/www/referencje/referencje\\_olesnica.htm](http://www.ekopolgrunt.pl/www/referencje/referencje_olesnica.htm)
- [127] Strony internetowe: Environmental Protection Agency, 20.11.2007,  
<http://www.epa.gov>
- [128] Strony internetowe American Society of Civil Engineers, 11.02.2005,  
<http://www.pubs.asce.org>
- [129] Materiały informacyjne EPA: Pathogen Risk Assessment Methodology for Municipal Sewage Sludge Landfilling and Surface disposal, 10.01.2006,  
<http://www.p2pays.org/ref/07/06249.pdf>
- [130] Texas Environmental Profiles, Biosolids: By any other name, sludge, 11.02.2005,  
[http://www.texasep.org/html/wst/wst\\_2mtx\\_sldg.html](http://www.texasep.org/html/wst/wst_2mtx_sldg.html)
- [131] Materiały informacyjne Ministerstwa Ochrony Środowiska, 10.09.2006,  
<http://www.tnz.most.org.pl/2/imgw2.htm>
- [132] Materiały informacyjne Ministerstwa Środowiska, 10.09.2006,  
<http://www.otzo.most.org.pl/publikacje/hydro/fidrysiak.htm>
- [133] Materiały informacyjne Ministerstwa Środowiska, 11.02.2004,  
[http://www.mos.gov.pl/1materialy\\_informacyjne/raporty\\_opracowania/kodeks](http://www.mos.gov.pl/1materialy_informacyjne/raporty_opracowania/kodeks)
- [134] Materiały informacyjne Ministerstwa Środowiska, 11.02.2004,  
[http://www.mos.gov.pl/odpady/odpady\\_ulegajace\\_biodegradacji](http://www.mos.gov.pl/odpady/odpady_ulegajace_biodegradacji)
- [135] Materiały informacyjne Ministerstwa Środowiska, 11.02.2004,  
<http://www.most.org.pl/zb/inne/kompost2/austria.html>
- [136] Strona Zbigniewa Hałata, 20.11.2007
- [137] <http://www.halat.pl>
- [138] Strona Korneliusza Mikscha, 10.09.2006 ,  
[http://www.uan.de/projekte/RefMiksch\\_P.pdf](http://www.uan.de/projekte/RefMiksch_P.pdf)

- [139] Rebecca Renner, Sewage Sludge, Pros & Cons, Environmental Science & Technology V.34 - I.19 1oct00, 11.06.2006,
- [140] <http://www.mindfully.org/Pesticide/Sewage-Sludge-Pros-Cons.htm>
- [141] Publikacje hdwao, 10.09.2007,  
[http://www.publikacje.hdwao.pl/rodzaje\\_sciekow.php](http://www.publikacje.hdwao.pl/rodzaje_sciekow.php)
- [142] Serwis ekologiczny, 20.11.2007,
- [143] <http://greenworld.serwus.pl>
- [144] Strony internetowe Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji we Wrocławiu, 11.02.2004,
- [145] <http://www.mpwik.wroc.pl>
- [146] Strony internetowe Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Bolesławcu, 11.02.2005,
- [147] [http://www.pwik.boleslawiec.pl/oczyszczalnia\\_v2.htm](http://www.pwik.boleslawiec.pl/oczyszczalnia_v2.htm)
- [148] Materiały Informacyjne Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Rzeszowie, 11.02.2005,  
<http://www.wios.rzeszow.pl.html>

# ANALYSIS OF SELECTED PROPERTIES OF SEWAGE SLUDGE IN CONTEXT OF UTILISATION ABILITY

## S u m m a r y

The main purpose of the research was describing characteristics of the sewage sludge taking special attention for the rheological properties. Performed chemical research proved that the sewage sludge had favourable chemical properties – it contains organic matter and proved to be a good fertilizer.

Quantitative assessment of heavy metals content in the sludge demonstrated its significant variability (most commonly, the limits of the Zn, Cr and Cd were exceeded). Physical parameters, such as mass density of the solid fraction, mass density of the sludge, humidity, organic particles content, grain size composition and concentration varied depending on actual sewage inflow.

Performed microbiological analysis allowed to specify microbes present in the sludge and to draw conclusions about work of the activated sludge. In order to describe "viscosity" characteristics the investigation was executed using coaxial rotational viscometer. To approximate the flow curve, based on pseudo-flow curves resulting from the measurements, the 3-parameter Herschel-Bulkley model was applied. Analysed mass concentration varied in range  $C_s = 0.47\text{--}6.56\%$ . The relationship between rheological parameters ( $\tau_0$ ,  $k, n$ ) and mass concentration was described as well as the temperature influence. This in turn led to specifying the critical concentration delimitating Newtonian and non-Newtonian behaviour of a mixture.

The analysis of relationship of the rheological parameters and concentration was performed for each of described wastewater treatment plant separately as well as cumulatively. Correlation of functions  $k = f(C_s)$  and  $n = f(C_s)$  had been noticed in case of cumulative analysis. None the less, the parameter requiring measuring every time is yield stress.

**Key words:** rheology, sludge, flow curve, rheological parameters

# BADANIE WYBRANYCH WŁASNOŚCI OSADÓW ŚCIEKOWYCH W ŚWIETLE MOŻLIWOŚCI ICH UTYLIZACJI

## Streszczenie

Celem pracy było dokonanie charakterystyki osadów ściekowych ze szczególnym uwzględnieniem ich własności reologicznych. Badania składu chemicznego osadów ściekowych wykazały, że osady charakteryzują się korzystnymi właściwościami chemicznymi: zawartością materii organicznej oraz wykazywały pozytywne własności nawozowe. W pracy dokonano oceny ilościowej metali ciężkich oraz składników nawozowych w osadach ściekowych pod kątem ich przyrodniczego wykorzystania. Zawartość metali ciężkich w osadach cechowała duża zmienność (najczęściej normy dotyczące ilości Zn, Cr i Cd były przekroczone).

Parametry fizyczne, takie jak gęstość właściwa cząstek stałych, gęstość mieszaniny, wilgotność naturalna, zawartość cząstek organicznych, skład granulometryczny oraz koncentracja charakteryzowały się zmiennością zależną od dopływu ścieków na oczyszczalnię.

Przeprowadzona analiza mikrobiologiczna pozwoliła na scharakteryzowanie drobnoustrojów obecnych w osadzie oraz na wysunięcie wniosków dotyczących pracy osadu czynnego.

W celu określenia charakterystyki „lepkościowej” osadów przeprowadzono badania za pomocą wiskozymetru rotacyjnego. Do aproksymacji rzeczywistych krzywych płynięcia, określonych na podstawie otrzymanych z pomiarów pseudokrzywych płynięcia, wykorzystano 3-parametrowy uogólniony model reologiczny Herschela-Bulkley'a. Zakres analizowanych koncentracji wagowych wynosił  $C_s = 0,47-6,56\%$ . W pracy podano zależności parametrów reologicznych ( $\tau_0$ ,  $k$ ,  $n$ ) od koncentracji wagowych i temperatury. Określono również koncentrację graniczną rozgraniczającą newtonowskie i nienewtonowskie zachowanie się mieszaniny.

Analizę zależności parametrów reologicznych od koncentracji przeprowadzono dla każdej z omawianych oczyszczalni indywidualnie oraz dokonano porównania zbiorczego. W przypadku zbiorczego zestawienia zaobserwowano występowanie związku korelacyjnego dla funkcji  $k = f(C_s)$  oraz  $n = f(C_s)$ . Parametrem wymagającym każdorazowo pomiaru jest próg płynięcia  $\tau_0$ .

**Słowa kluczowe:** reologia, osady ściekowe, krzywa płynięcia, parametry reologiczne

## Załącznik 1

### *Stan formalno-prawny w zakresie zagospodarowania odpadów, w tym osadów ściekowych na dzień 1.09.2007.*

---

Przed wyborem jednego ze sposobów unieszkodliwiania konieczne jest uwzględnienie zakazów i ograniczeń, wynikających z obowiązujących ustaw i rozporządzeń wykonawczych:

1. Dz. U. 2001 nr 100 poz. 1085 z późn. zm. – Ustawa z dnia 27 lipca 2001 r. o wprowadzeniu ustawy – Prawo ochrony środowiska, ustawy o odpadach oraz o zmianie niektórych ustaw.
2. Dz. U. nr 62, poz. 628 – Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach w zakresie zakazu składowania odpadów występujących w postaci ciekłej, w tym odpadów zawierających wodę w ilości powyżej 95% masy całkowitej.
3. Dz. U. 2007 nr 147 poz. 1033 – Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu.
4. Dz. U. nr 16, poz. 78 z późn. zm. – Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów rolnych i leśnych w zakresie wymogów dotyczących rekultywacji terenów zdegradowanych.
5. Dz. U. Nr 134, poz. 1140 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych w zakresie wymogów, jakie muszą spełniać osady kierowane do wykorzystania przyrodniczego oraz grunty, na których osady te mogą być wykorzystywane.
6. Dz. U. 2003 nr 66 poz. 620 z późn. zm. – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 kwietnia 2003 r. w sprawie sporządzania planów gospodarki odpadami.
7. Dz. U. nr 132 poz. 622 z późn. zm. – Ustawa „O utrzymaniu czystości i porządku w gminach” z dnia 13 września 1996 r.
8. Dz. U. nr 9 poz. 43 z późn. zm. – Ustawa „O gospodarce komunalnej” z dnia 20. 12. 1996 r.
9. Dz. U. Nr 122, poz. 1055 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 lipca 2002 r. w sprawie rodzajów instalacji mogących powodować znaczne zanieczyszczenie poszczególnych elementów przyrodniczych albo środowiska jako całości.
10. Dz. U. Nr 37, poz. 339 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 marca 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów w zakresie wymagań dotyczących spalania osadów ściekowych i sposobów postępowania z powstałymi odpadami.
11. Dz. U. 2002 nr 37 poz. 339 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 marca 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów.
12. Dz. U. 2004 nr 128 poz. 1347 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 maja 2004 r. w sprawie warunków, w których uznaje się, że odpady nie są niebezpieczne.

13. Dz. U. 2005 nr 186 poz. 1553 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 7 września 2005 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu.
14. Dz. U. 2001 nr 112 poz. 1206 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów.
15. Dz. U. 2001 nr 152 poz. 1734 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2001 r. w sprawie zakresu informacji podawanych przy rejestracji przez posiadaczy odpadów zwolnionych z obowiązku uzyskiwania zezwoleń oraz sposobu rejestracji.
16. Dz. U. 2001 nr 152 poz. 1735 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2001 r. w sprawie rodzajów odpadów lub ich ilości, dla których nie ma obowiązku prowadzenia ewidencji odpadów, oraz kategorii małych i średnich przedsiębiorstw, które mogą prowadzić uproszczoną ewidencję odpadów.
17. Dz. U. 2002 nr 191 poz. 1595 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002 r. w sprawie rodzajów odpadów, które mogą być składowane w sposób nieselektywny.
18. Dz. U. 2002 nr 220 poz. 1858 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2002 r. w sprawie zakresu, czasu, sposobu oraz warunków prowadzenia monitoringu składowisk odpadów.
19. Dz. U. 2002 nr 236 poz. 1986 – Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 19 grudnia 2002 r. w sprawie zakresu i sposobu stosowania przepisów o przewozie drogowym towarów niebezpiecznych do transportu odpadów niebezpiecznych.
20. Dz. U. 2004 nr 1 poz. 2 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 22 grudnia 2003 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów.
21. Dz. U. 2004 nr 16 poz. 154 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 23 grudnia 2003 r. w sprawie rodzajów odpadów, których zbieranie lub transport nie wymagają zezwolenia na prowadzenie działalności.
22. Dz. U. 2006 nr 30 poz. 213 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 lutego 2006 r. w sprawie wzorów dokumentów stosowanych na potrzeby ewidencji odpadów.
23. Dz. U. 2006 nr 38 poz. 264 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 24 lutego 2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu.
24. Dz. U. 2006 nr 46 poz. 333 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 marca 2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie sporządzania planów gospodarki odpadami.
25. Dz. U. 2006 nr 49 poz. 356 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 marca 2006 r. w sprawie odzysku lub unieszkodliwiania odpadów poza instalacjami i urządzeniami.
26. Dz. U. 2006 nr 75 poz. 527 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 kwietnia 2006 r. w sprawie listy rodzajów odpadów, które posiadacz odpadów może przekazywać osobom fi-

zycznym lub jednostkom organizacyjnym niebędącym przedsiębiorcami, oraz dopuszczalnych metod ich odzysku.

27. M.P. 2006 nr 90 poz. 946 – Uchwała Rady Ministrów Nr 233 z dnia 29 grudnia 2006 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2010”.
28. Dz. U. 2006 nr 136 poz. 965 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 12 lipca 2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie rodzajów odpadów, których zbieranie lub transport nie wymagają zezwolenia na prowadzenie działalności.
29. Dz. U. 2007 nr 101 poz. 686 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 25 maja 2007 r. w sprawie zakresu informacji oraz wzorów formularzy służących do sporządzania i przekazywania zbiorczych zestawień danych.
30. Dz. U. 2007 nr 101 poz. 687 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 25 maja 2007 r. w sprawie warunków i zakresu dostępu do wojewódzkiej bazy danych dotyczącej wytwarzania i gospodarowania odpadami.
31. Dz. U. 2007 nr 101 poz. 688 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 25 maja 2007 r. w sprawie zasad sporządzania raportu wojewódzkiego.
32. Dz. U. 2007 nr 121 poz. 832 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 12 czerwca 2007 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu.
33. Dz. U. 2007 nr 133 poz. 930 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 lipca 2007 r. w sprawie niezbędnego zakresu informacji objętych obowiązkiem zbierania i przetwarzania oraz sposobu prowadzenia centralnej i wojewódzkiej bazy danych dotyczącej wytwarzania i gospodarowania odpadami.
34. Dz. U. 2007 nr 247 poz. 1841 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2007 r. w sprawie stwierdzania kwalifikacji w zakresie gospodarowania odpadami.
35. Dz. U. 2008 nr 23 poz. 136 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 stycznia 2008 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie rodzajów odpadów, których zbieranie lub transport nie wymagają zezwolenia na prowadzenie działalności.