

Chatbot dedykowany do wsparcia eksploatacji małych i średnich oczyszczalni ścieków

Chatbot dedicated to supporting the operation of small and medium-sized wastewater treatment plants

MICHAŁ OKTAWIEC, PAWEŁ LICZNAR, KRZYSZTOF JAN CHMIELOWSKI, BARBARA ELŻBIETA CHMIELIŃSKA, ROBERT MALIK, ŁUKASZ HOŁOWACZ, ANDRZEJ OSIŃSKI, RAFAŁ BIRECKI, GRAŻYNA PILARCZYK, MICHAŁ LIPIŃSKI

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.02.06

W pracy przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem technologii modeli językowych do budowy niskokosztowego chatbota, dedykowanego do wspomagania operatorów małych i średnich oczyszczalni ścieków. Celem badań było przygotowanie narzędzia w postaci specjalistycznego chatbota przydatnego w codziennej pracy operatora. Prototyp chatbota opracowano jako aplikację webową napisaną w języku JavaScript, z zaimplementowaną funkcjonalnością GPT-3.5-Turbo w języku Python. Lokalizacja chatbota dla wybranej oczyszczalni polegała na wczytaniu do modelu danych, takich jak np.: instrukcja eksploatacji oczyszczalni ścieków, dokumentacja techniczno-rozruchowa urządzeń oraz szeregi czasowe parametrów eksploatacyjnych, wyeksportowane uprzednio z systemu SCADA. Elementarną korzyścią wynikającą z implementacji chatbota był szybki dostęp do precyzyjnej informacji interesującej operatora, zwłaszcza w sytuacjach awaryjnych. Ponadto chatbot wykazał duży potencjał w zakresie prezentacji danych gromadzonych w systemie SCADA, a także prowadzenia ich podstawowych analiz statystycznych.

Słowa kluczowe: chatbot; oczyszczalnia ścieków; eksploatacja; generatywna sztuczna inteligencja; duże modele językowe (LLM); GPT-3.5-Turbo; system SCADA; analiza danych eksploatacyjnych

This paper presents the results of research on applying language model technologies to develop a low-cost chatbot to support operators of small- and medium-sized wastewater treatment plants. The aim of the study was to prepare a tool in the form of a specialized chatbot useful in the operator's day-to-day work. A chatbot prototype was developed as a web application written in JavaScript, with GPT-3.5-Turbo functionality implemented in Python. Localization of the chatbot for a selected treatment plant involved loading the model with data such as the plant's operation manual, technical and commissioning documentation of equipment, and time series of operational parameters previously exported from the SCADA system. The primary benefit of implementing the chatbot was rapid access to precise information relevant to the operator, especially in emergency situations. In addition, the chatbot demonstrated significant potential to present data collected from the SCADA system and to perform basic statistical analyses of these data.

Keywords: chatbot; wastewater treatment plant; operation/maintenance; generative artificial intelligence; large language models (LLMs); GPT-3.5-Turbo; SCADA system; operational data analysis

Wstęp

Zgodnie z danymi prezentowanymi przez Państwowe Gospodarstwo Wodne „Wody Polskie” w dwudziestolecie 2003–2022 w ramach Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych (KPOŚK) w Polsce wybudowano 480 nowych oczyszczalni ścieków komunalnych i przeprowadzono 2450 inwestycji w zakresie modernizacji lub rozbudowy

takich obiektów [1]. W ramach aktualnej, szóstej aktualizacji KPOŚK, która zawiera wykaz planowanych inwestycji w zakresie wyposażenia aglomeracji o RLM $\geq 2\ 000$ w systemy kanalizacji zbiorczej oraz oczyszczalni ścieków, w okresie od marca 2021 r. do 31 grudnia 2027 r. zaplanowano wybudowanie kolejnych 60 nowych oczyszczalni ścieków oraz przeprowadzenie 978 innego typu inwestycji (modernizacji) w już istniejących oczyszczalniach [2].

Źródłem danych do oceny skali wyzwania oczyszczania ścieków w Polsce mogą być informacje Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) w Banku Danych Lokalnych, diskutowane szczegółowo przez Chmielowskiego [3]. W latach 1995–2022 nastąpił prawie trzykrotny przyrost liczby komunalnych oczyszczalni ścieków z 1220 do 3260 obiektów. W tym okresie wzrosła także efektywność oczyszczania ścieków. Dzięki wdrożeniu

Michał Oktawiec, ORCID: 0000-0003-3030-9829; michal.oktawiec@upwr.edu.pl, Paweł Licznar ORCID: 0000-0002-2559-5296, Autor korespondencyjny pawel.licznar@upwr.edu.pl – Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław; Krzysztof Jan Chmielowski ORCID: 0000-0001-9758-0854 – krzysztof.chmielowski@agh.edu.pl, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Inżynierii Gazowniczej, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie; Barbara Elżbieta Chmielińska – NOVA BR Sp. z o.o., ul. Cypriana Kamila Norwida 2, 80-280 Gdańsk; Robert Malik, Łukasz Hołowacz, Andrzej Osiński, Rafał Birecki, Grażyna Pilarczyk, Michał Lipiński – NEWATER GROUP Sp. z o.o., ul. Cypriana Kamila Norwida 2, 80-280 Gdańsk

nowoczesnych technologii, pomimo wzrostu liczby oczyszczalni, odnotowano obniżenie ładunku zanieczyszczeń wprowadzanych do odbiorników wraz ze ściekami oczyszczonymi. Przykładowo ładunek związków organicznych wyrażonych wskaźnikiem BZT5 wynosił 73 783 t/rok w 1998 r., a w 2022 r. 10 547 t/rok.

W tym okresie wartość wskaźnika ChZT i zawiesiny ogólnej zmniejszyła się odpowiednio o 55% i 74%, a azotu ogólnego i fosforu ogólnego odpowiednio o 61% i 80%.

Działania zmierzające do ochrony zasobów wodnych przed eutrofizacją realizowano poprzez wprowadzenie zaawansowanych technologii oczyszczania, pozwalających na efektywne usuwanie azotu i fosforu. Liczba ludności korzystającej z oczyszczalni z podwyższonym usuwaniem związków biogenych jest obecnie ponad czterokrotnie większa niż w przypadku klasycznych oczyszczalni biologicznych. Jest to związane z rozmieszczeniem przestrzennym obiektów oczyszczalni i charakterystyką ich zlewni. W latach 1998–2022 na terenach miejskich wzrosła liczba ludności korzystającej ze zbiorczych oczyszczalni ścieków o 19%, a na terenach wiejskich – aż o 686%, osiągając poziom ponad 7,2 mln osób. Zatem wzrost liczby oczyszczalni ścieków był związany z porządkowaniem systemów odbioru ścieków na terenach wiejskich oraz budową i modernizacją wielu małych i średnich oczyszczalni ścieków.

Przyjmując graniczną wartość przepustowości oczyszczalni na poziomie 500 m³/d, według danych z Banku Danych Lokalnych GUS w 2022 r. oczyszczalnie o przepływie nieprzekraczającym tej wartości stanowiły ponad 60% puli 3260 oczyszczalni w Polsce.

Dlatego należy zwrócić szczególną uwagę na podniesienie efektywności oczyszczania w małych i średnich obiektach. Jest to duże wyzwanie, gdyż w takich obiektach środki finansowe przeznaczone na eksploatację są zazwyczaj ograniczone, a także brakuje wykwalifikowanych pracowników.

Cel i zakres badań

Wzrastająca liczba małych i średnich oczyszczalni ścieków, rosnący poziom zaawansowania stosowanych technologii oraz wymagania dotyczące efektywności oczyszczania ścieków skłaniają do poszukiwania narzędzi ułatwiających sterowanie eksploatacją urządzeń. Powinny to być narzędzia nowoczesne, które – oprócz waloru użyteczności będą cechować się łatwością stosowania dzięki wykorzystaniu elastyczności rozwiązań sztucznej inteligencji (AI, ang. Artificial Intelligence).

Przesłanki te były podstawą podjęcia badań nad możliwością zastosowania dużego modelu językowego do przygotowania prototypowego, niskokosztowego lub bezpłatnego chatbota, dedykowanego usprawnieniu pracy operatorów małych i średnich oczyszczalni ścieków. Zakres przeprowadzonych prac obejmował przygotowanie prototypu takiego chatbota w formie aplikacji komputerowej (dostępnej docelowo z dowolnego komputera lub urządzenia mobilnego poprzez przeglądarkę internetową), której interfejs miał mieć formę konwersacji z zastosowaniem przetwarzania języka naturalnego. Aplikacja ta, podobnie jak popularne już duże modele językowe (np. ChatGPT), miała służyć do generowania odpowiedzi na zapytania wprowadzane przez użytkownika (poprzez wpisywane prompty, rozumiane w kontekście AI jako informacje przekazywane systemowi).

Opracowywany chatbot w założeniu miał posiadać możliwość zasilania (uzupełniania) jego wiedzy o zasoby o charakterze lokalnym, np. unikalny zbiór informacji technicznych o konkretnej oczyszczalni oraz dane pochodzące z obiektowego systemu SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). W ramach badań prototypowych chatbot podlegał procesowi lokalizacji dla przykładowej małej oczyszczalni ścieków, tzn. zasileniu we wspomniane powyżej specyficzne informacje techniczne i szeregi czasowe rejestracji, wyeksportowane uprzednio z systemu SCADA, a następnie testom funkcjonowania w symulowanych warunkach pracy operacyjnej.

Prototyp chatbota

Prototypowa wersja chatbota dedykowanego dla małych i średnich oczyszczalni ścieków została opracowana z wykorzystaniem modelu GPT-3.5-Turbo udostępnianego przez OpenAI. Przełomowym osiągnięciem firmy OpenAI, rewolucyjnym dla całej branży AI, są modele generatywne – Generative Pre-trained Transformers (GPT). Model GPT-3, wprowadzony w 2020 r., miał architekturę obejmującą 96 warstw ukrytych oraz 175 mld parametrów. Dzięki dużej liczbie parametrów GPT-3 był modelem wytrenowanym na obszernym zasobie tekstów, zdolnym do rozumienia i generowania języka naturalnego. GPT-3 mógł wykonywać szereg zadań związanych z językiem naturalnym, takich jak tłumaczenie, odpowiadanie na pytania czy synteza dłuższych fragmentów tekstu. Zbiór modeli GPT-3.5 bazuje na GPT-3 i stanowi jego dalsze rozwinięcie, umożliwiające wykonywanie bardziej złożonych zadań w językach naturalnych, takich jak tworzenie spójnych akapitów i dłuższych

tekstów [4]. Pierwsza publiczna wersja ChatGPT, która pojawiła się w Internecie pod koniec 2022 r., opierała się właśnie na modelu GPT-3.5 i została szeroko rozpowszechniona. Od tego czasu modele rodziny GPT są nadal udoskonalane. Powstawanie kolejnych generacji przyspiesza, gdyż korzystanie z nich przez użytkowników z całego świata tworzy nowe, potężne zbiory uczące. W 2023 r. wprowadzony został GPT-4 o rozumieniu kontekstu, a w 2025 r. GPT-5 z lepszym rozumieniem, pamięcią i zdolnością pracy nad złożonymi projektami.

Liczba aktywnych użytkowników ChatGPT, zgodnie z odpowiedzią udzieloną przez ChatGPT w listopadzie 2025 r., wynosi około 800 mln tygodniowo [5]. Jeśli uwzględnić dodatkowo statystyki publikowane na stronie internetowej [6], udział użytkowników z Polski może sięgać nawet około 12 mln (1,54% całości ruchu na platformie ChatGPT).

Model językowy GPT-3.5-Turbo został wytypowany jako podstawa do opracowania prototypu chatbota dedykowanego dla małych i średnich oczyszczalni ścieków nie tylko z uwagi na przełomowe znaczenie zbioru modeli GPT-3.5 w rozwoju platformy ChatGPT, lecz przede wszystkim ze względu na relatywnie wysoką efektywność przy niskich kosztach użytkowania. Jednostkowy koszt użytkowania GPT-3.5-Turbo, przeliczony na 1 mln tokenów, wynosi 0,8 USD, co oznacza, że jest on około cztero-, a nawet siedmiokrotnie niższy w porównaniu z modelami rodziny GPT-4 lub GPT-5.

Model językowy został zaimplementowany w celu przygotowania lokalnego rozwiązania, dedykowanego konkretnej oczyszczalni, które w dużym uproszczeniu działa jak inteligentna przeglądarka dokumentacji oraz zbiorów danych eksploatacyjnych obiektu. Lokalizacja tego rozwiązania dla konkretnej oczyszczalni wymaga wczytania do modelu dostępnych zbiorów danych w postaci cyfrowej, takich jak np.: instrukcja obsługi oczyszczalni ścieków, instrukcje obsługi poszczególnych urządzeń zainstalowanych na oczyszczalni oraz szeregi czasowe parametrów eksploatacyjnych rejestrowanych przez lokalny system SCADA. Na tej podstawie model językowy, oprócz swojej ogólnej wiedzy, może – przy korzystaniu z niego przez eksploatatora oczyszczalni – odnosić się także do zbioru wiedzy specyficznego dla danego obiektu. W procesie tym zbiory danych dotyczących konkretnej oczyszczalni nie są upowszechniane w Internecie i nie są wykorzystywane do trenowania nowych ogólnodostępnych modeli językowych. Proces przygotowania lokalnego chatbota może być wykonany samodzielnie

nie przez eksploatatora, który w interfejsie przeglądarki internetowej może wczytać poszczególne pliki z informacjami technicznymi i danymi eksploatacyjnymi w formatach edytowalnych plików tekstowych (np. DOC, DOCX), plików do przechowywania danych (np. XLSX, XLS, CSV) lub w formacie PDF. W prototypowej, badawczej wersji chatbota nie przeprowadzono bezpośredniej integracji z lokalnym systemem SCADA. Niemniej chatbota zasílono zbiorem zarejestrowanych danych w formacie CSV, wyeksportowanym uprzednio z systemu SCADA oczyszczalni. Chatbot może być modyfikowany i udoskonalany poprzez dołączanie kolejnych zbiorów danych pochodzących z systemu SCADA lub innych, nowych dokumentów technicznych.

W celu zapewnienia odpowiedniego komfortu korzystania z rozwiązania opracowana została prosta aplikacja webowa, napisana w języku JavaScript, z zaimplementowaną integracją z modelem GPT-3.5-Turbo w języku Python. Pozwala ona na dostęp do chatbota z dowolnego komputera lub urządzenia mobilnego. Dostęp do aplikacji jest możliwy po zalogowaniu się użytkownika, a samo korzystanie z chatbota nie odbiega od dialogu typowego dla innych popularnych modeli językowych. Użytkownik może zadawać dowolne pytania i uzyskiwać odpowiedzi, które – w odróżnieniu od otwartych modeli językowych – bazują na przeglądzie dostarczonych lokalnych zasobów.

Demonstracja działania chatbota

Na serii kolejnych rysunków przedstawiono zrzuty ekranowe z opracowanej aplikacji webowej, z przykładowymi promptami i odpowiedziami udzielanymi przez chatbota. W kontekście generatywnej sztucznej inteligencji pod pojęciem promptu rozumie się dane wejściowe, które użytkownik przesyła do modelu. Są one kluczowe dla udanej konwersacji z modelem w obszarze tematu [4]. W przypadku opracowanej aplikacji prompty są po prostu pytaniami zadawanymi przez użytkownika (testami), na które generowane są odpowiedzi przez chatbota w roli tzw. technologa obiektu. Przykładowo na rys. 1 przedstawiono odpowiedź na pytanie dotyczące działania przedmiotowej oczyszczalni ścieków. Widać wyraźnie, że zgodnie z założeniami model AI udziela odpowiedzi, bazując przede wszystkim na uprzednio zaprezentowanych mu zasobach wiedzy lokalnej w postaci dokumentacji technicznej (instrukcji eksploatacji), a nie na ogólnie dostępnej w Internecie wiedzy o procesach oczyszczania ście-

test: Jak działa oczyszczalnia?

Technolog:

Oczyszczalnia ścieków w [redacted] jest mechaniczno-biologiczną oczyszczalnią, która wykorzystuje technologię osadu czynnego. Poniżej przedstawiam szczegółowy opis sposobu działania oczyszczalni krok po kroku:

Ważne jest, aby prowadzić bieżący nadzór technologiczny nad pracą oczyszczalni oraz rejestrować wszelkie zakłócenia w pracy, stosowane środki zaradcze oraz wyniki analiz laboratoryjnych. Konserwacja urządzeń zgodnie z instrukcjami eksploatacji i obsługi oraz regularne badania jakości ścieków surowych i oczyszczonych są kluczowe dla efektywnego funkcjonowania oczyszczalni ścieków.

- Ścieki dopływają ze zlewni siecią kanalizacyjną oraz są dowożone i przyjmowane w stacji zlewniej, skąd trafiają do zbiornika ścieków dowożonych.
- Strumienie ścieków kierowane są do komory kraty koszowej, gdzie zatrzymywane są większe zanieczyszczenia.
- Następnie ścieki przepływają grawitacyjnie do komory sita, gdzie usuwane są mniejsze zanieczyszczenia mechaniczne.
- Skratki z kraty koszowej i sita spiralnego są usuwane do dedykowanych pojemników.
- Powietrze złozone w komory sita kierowane jest na biofiltr.
- Ścieki pozbawione skratek kierowane są do pompowni ścieków, skąd trafiają do piaskownika wirowego.
- W piaskowniku następuje odseparowanie ścieków od zawiesiny mineralnej (piasku), który jest

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

Wyślij

Rys. 1. Ogólne zapytanie dotyczące zasad działania przedmiotowej oczyszczalni ścieków oraz odpowiedź wygenerowana przez chatbota

Fig. 1. A general query regarding the operating principles of the wastewater treatment plant in question and the response generated by the chatbot

test: Jak należy serwisować kratę koszową?

Technolog:

Serwisowanie kraty koszowej powinno być przeprowadzane zgodnie z określonymi procedurami i zaleceniami producenta urządzenia oraz instrukcją obsługi komory sita na oczyszczalni ścieków. Procedura serwisowania kraty koszowej może obejmować następujące kroki:

Pamiętaj, że dbałość o regularne serwisowanie kraty koszowej jest kluczowa dla zapewnienia jej sprawności i wydajności w procesie oczyszczania ścieków. W razie wątpliwości co do konkretnych czynności serwisowych, zaleca się skonsultowanie się z osobą odpowiedzialną za utrzymanie i serwisowanie urządzeń na oczyszczalni ścieków.

- Regularne sprawdzanie stanu technicznego kraty koszowej, w tym elementów mechanicznych, elektrycznych i hydraulicznych.
- Wykonywanie okresowych przeglądów konserwacyjnych, takich jak smarowanie mechanizmów i wymiana zużytych części.
- Monitorowanie pracy kraty koszowej pod kątem ewentualnych usterek, wycieków czy nieprawidłowości w funkcjonowaniu.
- Natychmiastowe zgłaszanie wszelkich problemów, awarii lub nieprawidłowości w pracy mechanizmów urządzeń bezpośrednio przełożonemu.
- Dokumentowanie przeprowadzonych prac konserwacyjnych, naprawczych oraz wszelkich uwag dotyczących serwisowania kraty koszowej.

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

Wyślij

Rys. 2. Pytanie dotyczące serwisowania kraty koszowej oczyszczalni i odpowiedź udzielona przez chatbota

- Dokumentowanie przeprowadzonych prac konserwacyjnych, naprawczych oraz wszelkich uwag dotyczących serwisowania kraty koszowej.
- Wykonywanie prac remontowych, czynności konserwacyjnych, przeglądów okresowych, prac serwisowych i eksploatacyjnych zgodnie z instrukcjami producenta i za zezwoleniem kierownictwa oczyszczalni.

test: Jestem osobą odpowiedzialną za utrzymanie i serwisowanie urządzeń na oczyszczalni ścieków. Powiedz mi krok po kroku, jak mam serwisować kratę koszową?

Technolog:

Aby serwisować kratę koszową na oczyszczalni ścieków, należy przestrzegać określonych procedur i zaleceń producenta urządzenia oraz instrukcji obsługi komory sita. Oto kroki, które należy podjąć podczas serwisowania kraty koszowej:

Pamiętaj, że wszelkie zauważone zakłócenia i nieprawidłowości w pracy mechanizmów urządzeń stanowiących wyposażenie obiektu należy zgłaszać bezpośrednio przełożonemu. Dbłość o regularne serwisowanie kraty koszowej jest kluczowa dla zapewnienia jej sprawności i wydajności w procesie oczyszczania ścieków. Dodatkowo, prowadzenie dokumentacji dotyczącej przeprowadzonych prac konserwacyjnych i naprawczych jest istotne dla monitorowania stanu technicznego kraty koszowej.

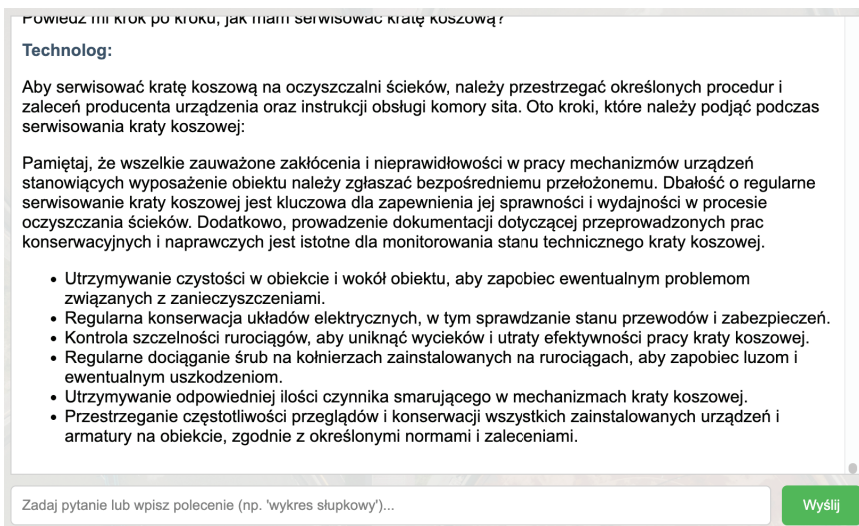
- Utrzymywanie czystości w obiekcie i wokół obiektu, aby zapobiec ewentualnym problemom związanym z zanieczyszczeniami.

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

Wyślij

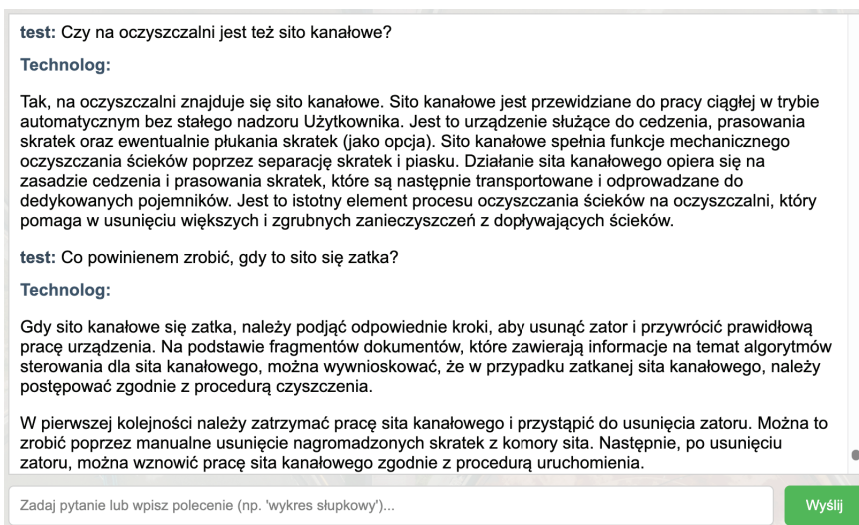
Rys. 3. Ponowione pytanie dotyczące serwisowania kraty koszowej oczyszczalni wraz z ograniczeniem kontekstu dostarczanego modelowi (zaproszenie do działania w roli pracownika oczyszczalni) i odpowiedź udzielona przez chatbota

Fig. 3. A follow-up question concerning the maintenance of the wastewater treatment plant's basket screen, with the context provided to the model restricted (prompting it to act as a wastewater treatment plant employee), and the response provided by the chatbot



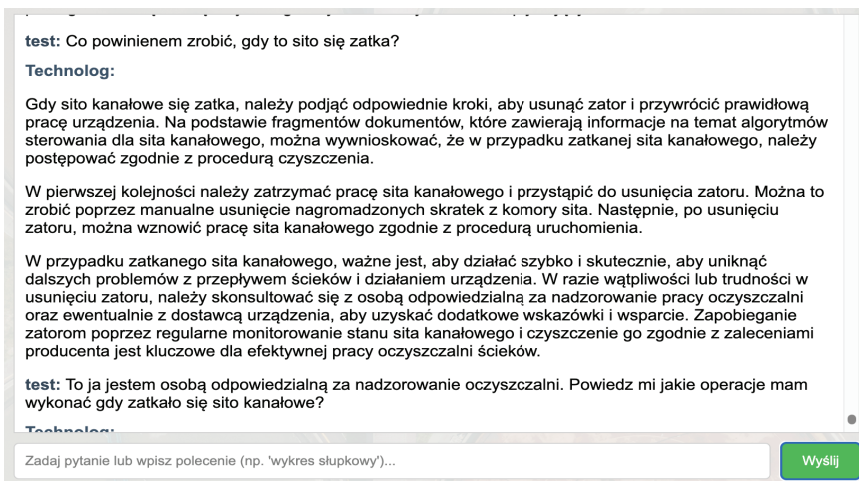
Rys. 4. Kontynuacja dialogu z rysunku 3 — odpowiedź udzielona przez chatbota w kontekście jej sformułowania do pracownika oczyszczalni

Fig. 4. Continuation of the dialogue from Figure 3 — the chatbot's response formulated in a manner addressed to a wastewater treatment plant employee



Rys. 5. Ciąg dalszy dialogu z rysunek 4 — przejście do pytań i odpowiedzi dotyczących sita kanałowego oraz rekomendowanego sposobu postępowania w sytuacji jego zatkania

Fig. 5. Continuation of the dialogue from Figure 4 — a transition to questions and answers regarding the channel screen and the recommended course of action in the event of its clogging



Rys. 6. Odpowiedź chatbota na pytanie dotyczące zatkania sita kanałowego

Fig. 6. The chatbot's response to a question concerning a clogged channel screen

ków, nabytej pierwotnie przez bazowy model GPT-3.5-Turbo. Model używa nazwy konkretnej oczyszczalni ścieków, która została zamazana w celu anonimizacji obiektu badawczego.

Na rysunkach 2–8 przedstawiono zrzuty ekranowe dłuższego dialogu pomiędzy użytkownikiem a tzw. technologiem, dotyczącego początkowo tematu serwisowania kraty koszowej, a następnie — sita kanałowego.

Na przykładzie tej serii zrzutów ekranowych zaprezentowano polecenie „działaj jako...” [4], polegające na tym, że chatbot działa w warunkach ograniczonego kontekstu i formułuje odpowiedzi adresowane do odbiorcy w uprzednio przypisanej roli pracownika oczyszczalni lub osoby odpowiedzialnej za jej nadzór.

Chatbot spełnia oczekiwania w przypadku kraty koszowej, upraszczając ogólne zalecenia do kilku prostych operacji. Większe problemy pojawiają się w przypadku roli osoby odpowiedzialnej za eksploatację oczyszczalni i zatkania sita kanałowego. W tym przypadku chatbot informuje o braku wystarczających informacji we wgranych dokumentach i wykorzystuje zasoby swojej wiedzy ogólnej (rys. 7). Chociaż przydatność tej odpowiedzi może być dyskusyjna, stanowi ona realną demonstrację połączenia zasobów wiedzy lokalnej z uniwersalnymi zasobami wiedzy modelu GPT-3.5-Turbo. Potwierdza to rysunek 8, który przedstawia zdolność chatbota do prowadzenia logicznej konwersacji i płynnego przechodzenia od aspektów eksploatacyjnych sita kanałowego do jego szczegółowych danych technicznych. Model językowy jest zatem w stanie łączyć i porządkować wiedzę zawartą w oddzielnych tomach (plikach PDF) dokumentacji technicznej oczyszczalni (np. dokumentacji rozruchowo-technicznej) z instrukcją eksploatacji. Są to kolejne korzyści wynikające z implementacji lokalnego chatbota w praktyce eksploatacji oczyszczalni ścieków. Co potwierdza rysunek 8, w sytuacjach awaryjnych dotyczących konkretnych urządzeń chatbot może być narzędziem do zadawania pytań i otrzymywania odpowiedzi bazujących na całokształcie wiedzy zgromadzonej w dokumentacji obiektu. Ma to znaczenie praktyczne: skraca czas reakcji personelu, a zarazem umożliwia stosowanie chatbota jako narzędzia edukacyjnego w procesie szkolenia i doskonalenia operatorów oczyszczalni ścieków.

Rysunki 9–13 demonstrują możliwości chatbota w zakresie prezentacji wyników rejestracji gromadzonych w systemie SCADA w formie wykresów, prowadzenia analiz statystycznych, a także odnoszenia ich do wymogów zawartych w dokumentacji oczyszczalni. Chatbot, nawet w swojej

producenta jest kluczowe dla efektywnej pracy oczyszczalni ścieków.

test: To ja jestem osobą odpowiedzialną za nadzorowanie oczyszczalni. Powiedz mi jakie operacje mam wykonać gdy zatkało się sito kanałowe?

Technolog:

Nie znalazłem informacji na ten temat w wgranych dokumentach PDF, ale mogę odpowiedzieć na podstawie mojej wiedzy ogólnej. Gdy zatkało się sito kanałowe, jako osoba odpowiedzialna za nadzorowanie oczyszczalni, powinienes podjąć natychmiastowe działania w celu usunięcia zatoru i przywrócenia prawidłowego działania urządzenia.

Pierwszym krokiem powinno być zatrzymanie pracy sita kanałowego, a następnie przystąpienie do usunięcia nagromadzonych skrutek z komory sita. W przypadku trudności lub powtarzających się problemów z zatorami, warto skonsultować się z dostawcą urządzenia lub specjalistą ds. oczyszczalni w celu uzyskania dalszych wskazówek i zaleceń dotyczących zapobiegania zatorom i utrzymania sprawnego działania sita kanałowego. Dbanie o regularne czyszczenie i konserwację sita kanałowego może pomóc w zapobieganiu zatorom i zapewnić efektywną pracę oczyszczalni ścieków.

Ważne jest również, aby monitorować sytuację po usunięciu zatoru i regularnie sprawdzać stan sita kanałowego, aby uniknąć ponownego zatkania. W przypadku trudności lub powtarzających się problemów z zatorami, warto skonsultować się z dostawcą urządzenia lub specjalistą ds. oczyszczalni w celu uzyskania dalszych wskazówek i zaleceń dotyczących zapobiegania zatorom i utrzymania sprawnego działania sita kanałowego. Dbanie o regularne czyszczenie i konserwację sita kanałowego może pomóc w zapobieganiu zatorom i zapewnić efektywną pracę oczyszczalni ścieków.

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

Wyślij

Rys. 7. Próba naklonienia chatbota do wskazania operacji koniecznych do przeprowadzenia w przypadku zatkania sita kanałowego, w roli osoby odpowiedzialnej za nadzór oczyszczalni

Fig. 7. An attempt to prompt the chatbot, acting in the role of a wastewater treatment plant supervisor, to indicate the operations required in the event of a clogged channel screen

działania sita kanałowego. Dbanie o regularne czyszczenie i konserwację sita kanałowego może pomóc w zapobieganiu zatorom i zapewnić efektywną pracę oczyszczalni ścieków.

test: Kto jest producentem sita kanałowego i jakie są jego parametry?

Technolog:

Producentem sita kanałowego jest firma [redacted]. Parametry sita kanałowego to między innymi średnica sita w różnych rozmiarach (200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm), minimalna szerokość kanału, wydajność w litrach na sekundę dla różnych poziomów ścieków, poziom ścieku dla danej wydajności, kąt pochylenia sita, moc zainstalowanego napędu spirali, moc ogrzewania, oraz wykonanie materiałowe (np. stal węglowa specjalna, stal nierdzewna AISI 304 lub AISI 316). Dodatkowo, w opisie sita kanałowego znajdują się informacje o zasadzie działania urządzenia, jak również o opcjach dodatkowych, takich jak ogrzewanie elektryczne, izolacja termiczna czy moduł płukania skrutek.

test: A czy to sito ma jakieś oznaczenie katalogowe?

Technolog:

Tak, sito kanałowe ma oznaczenie katalogowe. Jest to [TYP: [redacted]]. Oznaczenie to zawiera informacje o parametrach urządzenia, takie jak średnica części perforowanej (500 mm), oczko perforacji (3 mm), przepustowość (50 l/s) oraz inne istotne dane techniczne. Dzięki oznaczeniu katalogowemu można jednoznacznie zidentyfikować i określić specyfikację sita kanałowego typu [redacted].

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

Wyślij

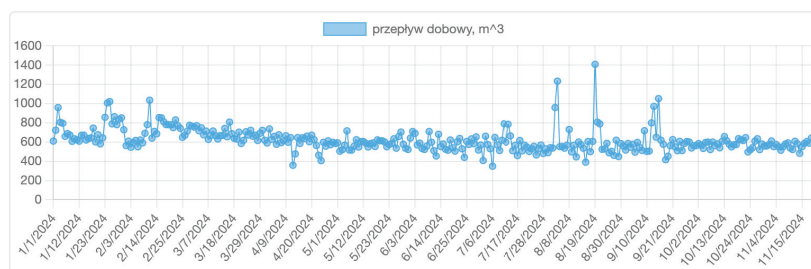
Rys. 8. Zakończenie dialogu z chatbotem dotyczącego sita kanałowego: prośba o podanie informacji o producencie, parametrach i oznaczeniu katalogowym tego urządzenia

Fig. 8. Conclusion of the dialogue with the chatbot concerning the channel screen: a request for information on the manufacturer, parameters, and catalogue designation of the device

test: Przedstaw wykres dopływu do oczyszczalni w 2024 roku

Technolog:

Wykres wygenerowany:



Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

Wyślij

Rys. 9. Polecenie wygenerowania wykresu dopływu do oczyszczalni w 2024 r. i wynik jego realizacji przez chatbota

Fig. 9. A prompt to generate a graph of the influent flow to the wastewater treatment plant in 2024 and the result produced by the chatbot

prostej wersji prototypowej, pozwala na łatwe generowanie i modyfikowanie wykresów wybranych parametrów z systemu SCADA. Wykresy można generować, wpisując prompty w języku naturalnym (rysunki 9 i 10). Stosowanie chatbota znacznie ułatwia pozyskiwanie podstawowych statystyk wybranych parametrów rejestrowanych w systemie SCADA (rysunki 11 i 12). Chatbot na polecenie użytkownika może także próbować ocenić zgodność analizowanych parametrów z wymogami zawartymi w dokumentacji tekstowej dotyczącej eksploatacji obiektu. Wprowadzie odpowiedź uzyskana w przypadku stężeń tlenu nie jest dogłębna (rys. 13), to może stanowić punkt wyjścia do dalszych analiz ostatecznego wnioskowania przez eksploatatora obiektu.

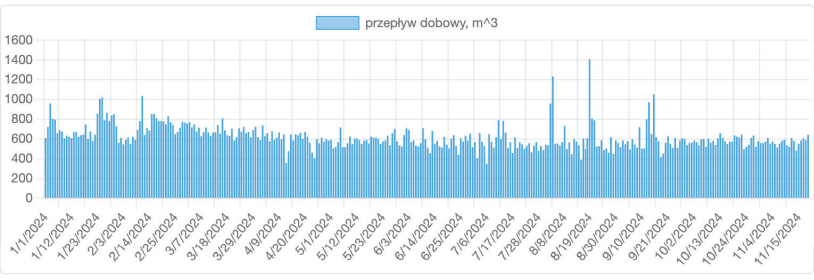
Podsumowanie i wnioski końcowe

Przeprowadzona analiza stanu gospodarki ściekowej w Polsce wskazuje na występowanie wyzwań w obszarze eksploatacji dużej liczby małych i średnich oczyszczalni ścieków. Rola tych obiektów jest bardzo ważna dla zapewnienia bezpieczeństwa ekologicznego i odpowiednio wysokiego komfortu ludności w skali całego kraju. Wymagania dotyczące efektywności i niezawodności funkcjonowania rosną, co wymaga rozbudowy ciągów technologicznych małych i średnich oczyszczalni ścieków. W pracy podjęto badania nad zastosowaniem technologii modeli językowych do budowy niskokosztowego chatbota dedykowanego wspomaganiu operatorów małych i średnich oczyszczalni ścieków. Prototyp chatbota dedykowanego dla małych i średnich oczyszczalni ścieków opracowano z wykorzystaniem popularnego i relatywnie taniego w użyciu modelu OpenAI GPT-3.5-Turbo. W celu zapewnienia możliwości korzystania z chatbota z dowolnego komputera lub urządzenia mobilnego opracowano aplikację webową napisaną w języku JavaScript, z zaimplementowaną funkcjonalnością GPT-3.5-Turbo w języku Python. Lokalizacja chatbota dla wybranej oczyszczalni polegała na wczytaniu do modelu dostępnych w postaci cyfrowej zbiorów danych, takich jak np.: instrukcja eksploatacji oczyszczalni ścieków, dokumentacja techniczno-rozruchowa poszczególnych urządzeń, urządzeń zainstalowanych na oczyszczalni oraz szeregi czasowe parametrów eksploatacyjnych wyeksportowane uprzednio z obiektowego systemu SCADA. Na podstawie doświadczeń zebranych na etapie budowy oraz przeprowadzonych testów prototypowego chatbota sformułowano następujące wnioski końcowe:

test: Zmień wykres na słupkowy

Technolog:

Wykres wygenerowany:



Rys. 10. Zmiana sposobu wyświetlania wykresu z rys. 9 przez chatbota
Fig. 10. The chatbot's modification of the graph display method from Figure 9

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

test: A jakie były statystyki przepływów dobowych ścieków na oczyszczalni w 2024 roku?

Technolog:

Analiza roczna dla kolumny 'przepływ dzienny, m³' w pliku Przepływy_dobowe_2024_V2.csv:

Rok z największą różnicą wartości: 2024

Największa różnica: 1059.00

Wartość minimalna: 348.00 (data: 2024-07-06 00:00:00)

Wartość maksymalna: 1407.00 (data: 2024-08-19 00:00:00)

Statystyki dla wszystkich lat:

Rok 2024: Min=348.00, Max=1407.00, Średnia=619.65, Mediana=599.50

Rys. 11. Zapytanie dotyczące statystyk dobowych przepływów ścieków na oczyszczalni w 2024 r. i odpowiedź udzielona przez chatbota
Fig. 11. A query regarding daily statistics of wastewater flows at the treatment plant in 2024 and the response provided by the chatbot

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

test: Czy możesz przeanalizować dane dotyczące stężeń tlenu zawarte w pliku pomiar-tlenu-sbr1.csv i podać ich statystyki?

Technolog:

Podstawowe statystyki dla kolumny 'pomiar tlenu w reaktorze OT01-SBR1' w pliku pomiar-tlenu-sbr1.csv:

Minimum: 0.00

Maksimum: 3.79

Średnia: 1.05

Mediana: 0.90

Odchylenie standardowe: 0.96

Suma: 8945.55

Liczba obserwacji: 8516

Wartość minimalna wystąpiła: 01-01-2025 01:15

Wartość maksymalna wystąpiła: 17-02-2025 07:30

Rys. 12. Zapytanie dotyczące statystyk stężeń tlenu w komorze sekwencyjnego reaktora biologicznego (SBR) na oczyszczalni i odpowiedź udzielona przez chatbota
Fig. 12. A query regarding dissolved oxygen concentration statistics in the sequencing batch reactor (SBR) chamber at the wastewater treatment plant and the response provided by the chatbot

Zadaj pytanie lub wpisz polecenie (np. 'wykres słupkowy')...

Wartość maksymalna wystąpiła: 17-02-2025 07:30

Różnica między największą a drugą największą wartością: 0.65

Druga największa wartość (3.14) wystąpiła: 17-02-2025 06:45

test: Czy zmierzone stężenia tlenu w reaktorze sbr oczyszczalni są zgodne z wymogami zawartymi w dokumentacji oczyszczalni?

Technolog:

Zgodnie z fragmentami dokumentów dotyczących instrukcji obsługi reaktora biologicznego na oczyszczalni ścieków w [redacted] stężenie tlenu w reaktorze biologicznym powinno być utrzymywane na poziomie około 1,8 mg O₂/l, z możliwością doregulowania wydajności dmuchawy w celu utrzymania tego stężenia. W przypadku przekroczenia stężenia tlenu na poziomie 6,0 mg O₂/l, przewidziano możliwość wyłączenia dmuchaw w celu uniknięcia przetlenienia osadu czynnego, a ponowne załączenie dmuchaw następuje po spadku stężenia tlenu poniżej 0,8 mg O₂/l.

Na podstawie tych informacji można stwierdzić, że zmierzone stężenia tlenu w reaktorze SBR oczyszczalni powinny być zgodne z wymaganiami określonymi w dokumentacji oczyszczalni, tj. utrzymywanie stężenia tlenu na poziomie około 1,8 mg O₂/l. Jeśli zmierzone stężenia tlenu w reaktorze SBR oczyszczalni są zbliżone do tego poziomu, to spełniają one wymagania dokumentacji oczyszczalni.

Rys. 13. Pytanie dotyczące zgodności zmierzonych stężeń tlenu z wymogami zawartymi w dokumentacji i odpowiedź udzielona przez chatbota
Fig. 13. A question regarding the compliance of the measured dissolved oxygen concentrations with the requirements specified in the documentation and the response provided by the chatbot

- 1) Chatbot dedykowany dla małych i średnich oczyszczalni ścieków może być zbudowany z wykorzystaniem prostego modelu językowego, takiego jak GPT-3.5-Turbo. Koszt jego operacyjne użytkowania szacuje się na 0,8 USD za 1 mln tokenów, co w przeliczeniu odpowiada około 4 PLN za około milion słów. Nie ma zatem ograniczeń finansowych co do szerokiego wdrożenia chatbotów na wszystkich, nawet najmniejszych oczyszczalniach w Polsce.
- 2) Proces lokalizacji chatbota dla konkretnej oczyszczalni może być zrealizowany samodzielnie przez eksploatatora, który w interfejsie przeglądarki internetowej musi jedynie wczytać poszczególne pliki z informacjami technicznymi i danymi eksploatacyjnymi w ogólnie dostępnych formatach: edytowalnych plików tekstowych (np. DOC, DOCX), plików do przechowywania danych (np. XLSX, XLS, CSV) lub w formacie PDF. Wczytanie danych do chatbota nie oznacza ich udostępnienia do trenowania ogólnodostępnych modeli językowych w Internecie.
- 3) Elementarną korzyścią wynikającą z implementacji lokalnego chatbota jest szybki dostęp do precyzyjnej informacji interesującej eksploatatora, zawartej w dużym, liczącym nawet wiele tomów zbiorze dokumentacji technicznej. Przy wyszukiwaniu informacji chatbot wykazuje umiejętność łączenia i logicznego powiązania wiedzy zawartej w różnych dokumentach. Może to być szczególnie przydatne w warunkach awaryjnych, ponieważ skraca czas dotarcia do niezbędnych informacji, procedur lub zaleceń przez eksploatatora oczyszczalni. Otwiera to także możliwość szerokiego stosowania chatbota jako narzędzia edukacyjnego w procesie nabywania i utrwalania wiedzy o obiekcie i jego urządzeniach przez operatora.
- 4) Chatbot posiada wyraźną zdolność do prowadzenia logicznej konwersacji z użytkownikiem oraz łączenia i porządkowania wiedzy zawartej w oddzielnych tomach dokumentacji technicznej oczyszczalni. Potrafi działać w warunkach ograniczonego kontekstu i zadanego warunku formułowania odpowiedzi w uprzednio przypisanej roli pracownika oczyszczalni lub osoby odpowiedzialnej za jej nadzór. Ponadto w przypadku braku wystarczających informacji we wgranych lokalnych dokumentach chatbot podejmuje próbę sformułowania odpowiedzi na podstawie ogólnych zasobów modelu językowego.

- 5) W kontekście powyżej wspomnianego korzystania z ogólnych zasobów wiedzy prototypowy chatbot wykazywał niedoskonałości wynikające z ograniczeń samego modelu językowego OpenAI GPT-3.5-Turbo. Model ten nie jest już rozwijany, a w konsekwencji nie podlega ciągłemu douczaniu na podstawie zmieniających się zasobów globalnego Internetu. Nie może on zatem oferować np. wiarygodnej wykładni co do aktualnie obowiązującego prawa w zakresie ochrony środowiska i gospodarki wodnej w Polsce.
- 6) Prototypowy chatbot wykazał duży potencjał dotyczący prezentacji danych gromadzonych w obiektowym systemie SCADA oczyszczalni w formie wykresów, a także prowadzenia ich podstawowych analiz statystycznych.

Chatbot demonstrował również przynajmniej częściową zdolność do interpretacji analizowanych wyników w odniesieniu do wymogów zawartych w dokumentacji oczyszczalni, jednak do weryfikacji niezbędna jest wiedza eksploatatora oczyszczalni. Wyniki przeprowadzonych testów wskazują na szeroki potencjał docelowego uproszczenia korzystania z systemów SCADA z użyciem poleceń i zapytań wydawanych w języku naturalnym do chatbota.

Literatura

- [1] Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie. (n.d.). Krajowy program oczyszczania ścieków komunalnych. Portal Gov.pl. Dostęp czerwiec 2025, <https://www.gov.pl/web/wody-polskie/krajowy-program-oczyszczania-ściekow-komunalnych>

- [2] Minister Infrastruktury. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2023 w sprawie ogłoszenia aktualizacji krajowego programu oczyszczania ścieków komunalnych (M.P. 2023 poz. 503). Monitor Polski. <https://monitorpolski.gov.pl/MP/2023/503>
- [3] Chmielowski, K. J. (2024). Zbiornice oczyszczalni ścieków w Polsce – stan i rozwój. Inżynier Budownictwa. <https://inzynierbudownictwa.pl/zbiornice-oczyszczalnie-ściekow-w-polsce-stan-i-rozwoj/>
- [4] Alto, V. (2024). Generatywna sztuczna inteligencja z ChatGPT i modelami OpenAI: Podnieś swoją produktywność i innowacyjność za pomocą GPT-3 i GPT-4. Helion.
- [5] OpenAI. (n.d.). ChatGPT [Large language model]. Dostęp listopad 2025, from <https://chatgpt.com>
- [6] Pawar, P. (2025). ChatGPT statistics by demographics, website traffic and country. Coolest Gadgets. Dostęp listopad 2025, <https://coolest-gadgets.com/chatgpt-statistics/>

Przegląd prawny wg Dziennika Ustaw

■ Poz. 1 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 7 listopada 2025 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo atomowe (Ogłoszone dnia 2 lutego 2026 r.).

■ Poz. 13 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 5 grudnia 2025 r. - jednolity tekst ustawy o ochronie przyrody (Ogłoszone dnia 7 stycznia 2026 r.).

Na podstawie art. 16 ust. 1 zdanie pierwsze ustawy z dnia 20 lipca 2000 r. o ogłaszaniu aktów normatywnych i niektórych innych aktów prawnych (Dz. U. z 2019 r. poz. 1461) ogłasza się w załączniku do niniejszego obwieszczenia jednolity tekst ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz. U. z 2024 r. poz. 1478), z uwzględnieniem zmian wprowadzonych: 1) ustawą z dnia 27 listopada 2024 r. o zmianie ustawy - Prawo ochrony środowiska oraz niektórych innych ustaw (Dz. U. poz. 1940), 2) ustawą z dnia 21 maja 2025 r. o zmianie ustawy o ochronie przyrody (Dz. U. poz. 884), 3) ustawą z dnia 9 października 2025 r. o zmianie ustawy o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami oraz niektórych innych ustaw (Dz. U. poz. 1673) oraz zmian wynikających z przepisów ogłoszonych przed dniem 4 grudnia 2025 r.

■ Poz. 20 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 29 grudnia 2025 r. - jednolity tekst ustawy o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa (Ogłoszone dnia 9 stycznia 2026 r.).

■ Poz. 21 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 29 grudnia 2025 r. - jednolity tekst ustawy o bonie energetycznym oraz o zmianie niektórych ustaw w celu ograniczenia cen energii elektrycznej, gazu ziemnego i ciepła systemowego (Ogłoszone 9 stycznia 2026 r.).

Regulacja utrzymuje i porządkuje mechanizmy osłonowe na rynku energii i ciepła- istotne dla rynku energii i odbiorców w kontekście wsparcia i instrumentów osłonowych.

■ Poz. 24 USTAWA z dnia 4 grudnia 2025 r. o zmianie ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Ogłoszona 12 stycznia 2026 r.).

Kluczowe znaczenie dla procesu inwestycyjnego jak uwarunkowania planistyczne, procedury lokalizacyjne. Ustawa wchodzi w życie 14 dni od daty ogłoszenia.

■ Poz. 28 ROZPORZĄDZENIE Rady Ministrów z dnia 7 stycznia 2026 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie klasyfikacji śródlądowych dróg wodnych (Ogłoszone dnia 12 stycznia 2026 r.).

Rozporządzenie wchodzi w życie po upływie 14 dni od dnia ogłoszenia.

■ Poz. 32 USTAWA z dnia 18 grudnia 2025 r. o zmianie ustaw w celu usprawnienia mechanizmów wsparcia odbiorców energii elektrycznej i ciepła (Ogłoszona dnia 13 stycznia 2026 r.).

Ustawa przedłuża i doprecyzowuje mechanizmy osłonowe na rynku energii i ciepła oraz porządkuje rozliczenia i terminy: wydłuża obowiązywanie kluczowego przepisu rozliczeniowego do 31.03.2027, daje możliwość uznania spóźnionych informacji o pomocy i korekty braków do 30.06.2026, nakazuje sprzedawcom skorygować rozliczenia w 30 dni po otrzymaniu prawidłowych danych, doprecyzowuje zasady bonu ciepłowniczego (kiedy w ogóle przysługuje) i przesuwa termin w wybranych przepisach do 31.05.2026. Ustawa wchodzi w życie z dniem następującym po dniu ogłoszenia.

■ Poz. 43 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 5 grudnia 2025 r. - jednolity tekst ustawy Prawo energetyczne (Ogłoszone dnia 15 stycznia 2026 r.).

■ Poz. 52 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 9 stycznia 2026 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych, a także ich funkcjonowaniu (Ogłoszone dnia 16 stycznia 2026 r.)

■ Poz. 68 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 4 grudnia 2025 r., w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o odnawialnych źródłach energii (Ogłoszone dnia 22 stycznia 2026 r.)

Jednolity tekst kluczowej ustawy dla rynku OZE (w tym biogazu i biometanu), istotny jako baza prawna dla projektowania i realizacji inwestycji oraz systemów wsparcia.

■ Poz. 69 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 9 stycznia 2026 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo geologiczne i górnicze (Ogłoszone dnia 22 stycznia 2026 r.)

■ Poz. 77 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 21 stycznia 2026 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o dodatku osłonowym (Ogłoszone dnia 23 stycznia 2026 r.)

■ Poz. 103 OBWIESZCZENIE Ministra Zdrowia z dnia 12 stycznia 2026 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia dot. szkodliwych czynników biologicznych w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników narażonych. (Ogłoszone dnia 29 stycznia 2026 r.)

■ Poz. 104 OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu RP z dnia 21 stycznia 2026 r., w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o szczególnych zasadach przygotowania do realizacji inwestycji w zakresie budowli przeciwpowodziowych (Ogłoszone dnia 29 stycznia 2026 r.)