

Prof. dr hab. inż. Marian Kwietniewski
Zakład Systemów Wodociągowych i Kanalizacyjnych
Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
Marian.kwietniewski@pw.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marty Stachowiak pt.
**„Ocena wpływu warunków pracy rurociągów tłocznych
na powstawanie i emisję siarkowodoru
w systemach kanalizacji grawitacyjno-ciśnieniowej”**

1. Przedmiot i podstawa formalna opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Marty Stachowiak w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych prowadzonym w Politechnice Poznańskiej, której promotorem jest dr hab. inż. Zbysław Dymaczewski, prof. PP.

Recenzję opracowano zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Poznańskiej z dnia 21.10.2025r. i na podstawie umowy nr 07/10/2025/71 zawartej pomiędzy Politechniką Poznańską reprezentowaną przez Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, a autorem niniejszej recenzji.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa jest opracowaniem naukowym liczącym 200 stron, na które składają się 6 rozdziałów uzupełnionych wykazem 149. pozycji literaturowych, spisem 121. rysunków, 13. tabel oraz streszczeniami w j pol. i ang.

Praca ma charakter wybitnie badawczy. W związku z tym można w niej wyróżnić 2 główne części, część teoretyczną, która jest precyzyjnie ujęta w rozdziale 2 oraz część badawczą, którą tworzą rozdziały 3, 4 i 5.

Po krótkim wprowadzeniu w problematykę badawczą, w **rozdziale 1.** autorka określiła cel główny i cele szczegółowe jak również zakres i tezę pracy doktorskiej.

Podstawy teoretyczne podjętej problematyki badawczej zostały dokładnie omówione w **rozdziale 2.** rozprawy na podstawie dogłębnych studiów literaturowych. Pozwoliły one autorce na dobre rozpoznanie przebiegu procesów chemicznych i biologicznych zachodzących w kanałach i wyjaśniających powstawanie siarkowodoru. Myślą przewodnią badań jest założenie, że system techniczny sieci kanalizacyjnej wraz z wyposażeniem technicznym takim jak studnie, pompownie i inne elementy jest jednocześnie reaktorem przemian biochemicznych. Dużo uwagi wykazano dla problematyki przykrych zapachów (odorów) powstających w wyniku tworzenia się siarkowodoru w sieciach kanalizacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów zapachowych i problemów eksploatacyjnych jakie wywołuje H₂S w tych sieciach.

W sposób wyczerpujący opisano mechanizmy procesowe związane z tworzeniem się siarkowodoru i jego oddziaływaniem korozyjnym na konstrukcje kanałów, zwłaszcza kanałów wykonanych z materiałów na bazie cementu (betonowych, żelbetowych).

Szeroko opisano metody i technologie mające na celu minimalizację emisji siarkowodoru w sieciach kanalizacyjnych i tym samym przeciwdziałanie negatywnym skutkom przemian biochemicznych w sieciach.

W tej części pracy dokonano też krótkiego przeglądu modeli procesów przemian biochemicznych w systemach kanalizacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem związków siarki.

Metodyka badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej jest przedmiotem kolejnego **rozdziału nr 3.** Jak wynika z jego treści, pełny zakres badań obejmuje badania w

skali laboratoryjnej i badania w skali technicznej. Drugi etap badań był konieczny z uwagi na potrzebę weryfikacji wyników stężeń siarkowodoru uzyskiwanych z modelu opracowanego na podstawie badań laboratoryjnych, a także ze względu na potrzebę opracowania procedury przeciwdziałania niekorzystnym skutkom przemian biochemicznych w systemach kanalizacyjnych grawitacyjno-tłocznych. Omówiono plany i harmonogramy badań, a także scharakteryzowano instalację badawczą w skali laboratoryjnej i układ sieci w skali technicznej.

Kluczowe dla osiągnięcia założonych celów i wykazania słuszności przyjętej na wstępie tezy pracy są **rozdziały 4. i 5.** Rozdział 4. zawiera wyniki badań, a w rozdziale 5. przeprowadzono analizę interpretacyjną tych wyników.

Uzyskano ogromne zbiory wyników. Stąd też w celu efektywnej prezentacji konieczne było czytelne ich uporządkowanie. Dlatego powstał pewnego rodzaju „przewodnik” po uzyskanych zbiorach danych. W badaniach laboratoryjnych funkcję taką pełni tab. 4.1, w której zestawiono w sposób dobrze zorganizowany numery wykresów z wynikami z uwzględnieniem dużej liczby kombinacji pomiarowych oraz w nawiązaniu do temperatury ścieków i liczby załączeń pompy w dobie (lub czasu przetrzymania ścieków w przewodzie ciśnieniowym).

Podobnie jasno i przejrzysto przedstawiono w tab. 4.2 sposób prezentacji wyników badań w skali technicznej.

Ponadto w rozdziale 5 zaprezentowano algorytm postępowania diagnostyczno-decyzyjnego w przypadkach występowania problemów odorowo-korozyjnych w systemach kanalizacyjnych

Rozprawa kończy się **rozdziałem nr. 6**, w którym podsumowano wyniki pracy oraz sformułowano wnioski końcowe, a także zaprezentowano kierunki dalszych badań.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Układ pracy zawiera wszystkie elementy i etapy działań niezbędne do osiągnięcia założonych celów badawczych. Kolejność realizacji postawionych zadań jest logiczna i dobrze przemyślana.

Problematyka badawcza podjęta w pracy jest niezwykle istotna z punktu widzenia zapewnienia prawidłowej eksploatacji systemów kanalizacyjnych, a w szczególności grawitacyjno-ciśnieniowych, które intensywnie się rozwijają, zwłaszcza na obszarach zabudowy rozproszonej. Powstawanie siarkowodoru jest m.in. przyczyną korozji, która powoduje destrukcję kanałów i elementów wyposażenia technicznego sieci kanalizacyjnych, w szczególności wykonanych na bazie cementu. A ten materiał jest stosowany powszechnie w kanalizacji. Skutkiem procesów korozyjnych są ogromne straty ekonomiczne. Niezależnie od tego, powstawanie siarkowodoru jest główną przyczyną występowania uciążliwości zapachowych (odorów) dla ludzi w otoczeniu sieci kanalizacyjnych. Natomiast dla pracowników zajmujących się utrzymaniem i eksploatacją sieci, przy określonych stężeniach w kanałach, siarkowódor może stanowić zagrożenie dla zdrowia, a nawet życia. W związku z powyższym, konieczność monitorowania emisji siarkowodoru w systemach kanalizacyjnych jest jednym z kluczowych wyzwań eksploatacyjnych dla przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych.

Stosowane dotychczas sposoby przeciwdziałania negatywnym skutkom powstawania siarkowodoru w sieciach kanalizacyjnych jak np. dodawanie chemii technologicznej, bioperatarów enzymatyczno-bakteryjnych, czy też napowietrzanie ścieków lub przedmuchiwanie kanałów są często kosztowne a ich efektywność bywa ograniczona. Wynika to przede wszystkim z braku pełnych podstaw do podejmowania decyzji, które opierają się zwykle na miejscowych oznaczeniach siarkowodoru lub szacunkach opartych na ogólnych charakterystykach ścieków. Stosowane dotychczas w tym celu modele i równania matematyczne opisujące tworzenie się siarkowodoru w sieci wymagają na ogół dokładnej znajomości wielu wskaźników fizykochemicznych ścieków takich jak BZT, ChZT, stężenie siarczanów. A systematyczne oznaczanie stężeń tych wskaźników w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych jest trudne, kosztowne i wymaga czasu. Niezależnie od tego wykonanie pomiarów nie zawsze jest możliwe ze względu chociażby na trudności w poborze próbek ścieków w miejscach trudno dostępnych np. w ciągach komunikacyjnych.

Stąd też w pracy doktorskiej autorka podjęła próbę opracowania narzędzia do prognozowania stężenia siarkowodoru, które nie wymaga takich kosztownych analiz chemicznych. Model ma na celu wstępne szacowanie stężenia siarkowodoru powstającego w sieci kanalizacyjnej na podstawie tylko dwóch parametrów wejściowych tj. temperatury i

czasu przetrzymania ścieków w sieci, które są łatwo dostępne w warunkach bieżącej eksploatacji.

Takie podejście do rozwiązania problemu badawczego wyróżnia się oryginalnością i zarazem usprawnia znakomicie zarządzanie eksploatacją sieci kanalizacyjnych. Z pracy wynika, że w dostępnej literaturze przedmiotu nie pojawiło się dotychczas analityczne podejście łączące synergiczny wpływ temperatury i czasu zatrzymania ścieków w przewodach ciśnieniowych z prognozowaniem stężenia siarkowodoru, przy jednoczesnym pominięciu złożonych i kosztownych procedur analizy chemicznej. Podjęte badania wypełniają więc lukę badawczą w zakresie prognozowania zagrożeń siarkowodorowych w kanalizacji wynikających z dynamiki powstawania siarkowodoru w sieci.

Za główny cel swojej pracy autorka przyjęła opracowanie zależności matematycznej pozwalającej na przybliżone prognozowanie wpływu czasu przetrzymania ścieków komunalnych w przewodach tłocznych i ich temperatury na intensywność tworzenia się siarkowodoru w przestrzeni nad zwierciadłem ścieków w sieci kanalizacji grawitacyjno-ciśnieniowej bezpośrednio za rurociągiem tłocznym.

Obok celu głównego przyjęto do realizacji jeszcze kilka celów szczegółowych, których osiągnięcie jest rezultatem realizacji odpowiadających im zadań badawczych tworzących zakres pracy.

Realizacja powyższych celów wiązała się ściśle z potrzebą wykazania słuszności przyjętej na wstępie tezy pracy, która zakładała, iż w kanalizacji grawitacyjno-ciśnieniowej odprowadzającej ścieki komunalne, stężenie siarkowodoru w powietrzu kanalizacyjnym za rurociągiem tłocznym jest zależne głównie od temperatury ścieków i czasu ich przetrzymania w rurociągu, a zależność tę można opisać równaniem matematycznym będącym funkcją tych dwóch zmiennych.

Założone cele pracy osiągnięto, w wyniku realizacji dobrze przemyślanej strategii badań dwuetapowych tj. na stanowisku badawczym i w skali technicznej. Metodyka tych badań zawiera przejrzyste plany i harmonogramy kolejnych działań. Należy podkreślić, iż założenia wyjściowe do badań dotyczące zakresu czasu przetrzymania ścieków w układzie kanalizacyjnym (3, 8 i 24h) jak również przedziału temperatury ($T_{min}=10^{\circ}C$, $T_{max}=25^{\circ}C$) są racjonalne i dobrze uzasadnione. Do efektywnego przetwarzania i wizualizacji wyników badań zastosowano adekwatne do potrzeb narzędzia informatyczne.

Model w postaci funkcji matematycznej odwzorowuje w sposób prawidłowy zależności pomiędzy wymienionymi wyżej dwoma kluczowymi parametrami, a stężeniem siarkowodoru nad zwierciadłem ścieków. W rozprawie doktorskiej przeanalizowano w sumie 4 wersje zaproponowanej zależności, w tym funkcję bazową i 3 jej modyfikacje wprowadzone w celu wyeliminowania zauważonych niedokładności. Kolejne modyfikacje funkcji bazowej nie przyniosły jednak zadowalających rezultatów. Uznano więc wersję pierwotną modelu za odpowiednią i przydatną do praktycznego stosowania.

Przydatność zaproponowanego modelu do opisu mechanizmu tworzenia i dynamiki zmian stężenia siarkowodoru została potwierdzona na drodze weryfikacji w skali technicznej.

W rezultacie przeprowadzonych badań i analiz opracowano model w postaci funkcji matematycznej, który pozwala na prognozowanie dynamiki zmian stężenia siarkowodoru w powietrzu kanalizacyjnym za rurociągiem tłocznym w oparciu o dwa kluczowe parametry tj. temperaturę i czas przetrzymania ścieków w przewodach ciśnieniowych. Tym samym wykazano słuszność przyjętej na początku tezy pracy.

Opracowany model jest prosty w swojej budowie i łatwy do stosowania w praktyce eksploatacyjnej, a jednocześnie dobrze odwzorowuje wpływ czasu zatrzymania i temperatury ścieków na dynamikę powstawania siarkowodoru w układzie kanalizacyjnym

Model w tej postaci może być bardzo dobrym narzędziem wspomagającym zarządzanie eksploatacją systemów kanalizacyjnych grawitacyjno-ciśnieniowych. Przy łatwo dostępnych danych wejściowych jakimi są czas przetrzymania i temperatura ścieków, można go wykorzystać do szybkiej identyfikacji zagrożeń siarkowodorowych zarówno dla bezpieczeństwa konstrukcji kanałowych jak i obsługi sieci kanalizacyjnej oraz osób przebywających w pobliżu miejsca emisji H₂S.

W ocenie rozprawy warto podkreślić, iż doktorantka na etapie przygotowania swoich badań przeprowadziła szerokie studia literaturowe z uwzględnieniem najważniejszych pozycji związanych z podjętym tematem. Widać w tych studiach krytyczną analizę dostępnych wyników badań.

Analiza pracy pokazuje, że doktorantka opracowała oryginalną kompleksową metodykę badań pozwalającą na zrealizowanie wszystkich zadań i osiągnięcie założonych celów. Metodyka i konsekwentny sposób prowadzenia badań zasługują na szczególną uwagę.

Poza metodyką i uzyskaniem ważnych wyników badań, doktorantka opracowała też autorski algorytm postępowania diagnostyczno-decyzyjnego dla służb eksploatacyjnych na wypadek zaistnienia problemów odorowo-korozyjnych w sieciach kanalizacyjnych. Algorytm ten jest efektem łączenia wiedzy autorki wynikającej z przeprowadzonych w pracy badań i analiz z uzyskanymi przez nią doświadczeniami badawczymi. Stanowi jednocześnie cenne narzędzie wspierające podejmowanie decyzji operatorskich w czasie eksploatacji sieci kanalizacyjnych. Bardzo istotnym wzmocnieniem tego algorytmu jest „*Kalkulator stężenia H₂S*”, który pozwala na automatyczne szacowanie stężenia siarkowodoru w konkretnych warunkach eksploatacyjnych sieci kanalizacyjnej. Kalkulator jest przy tym ogólnodostępny bezpłatnie pod linkiem wskazanym w pracy.

Zaprezentowane w pracy oryginalne eksperymentalne podejście do opracowania modelu prognozowania wpływu czasu przetrzymania ścieków w przewodach tłocznych i ich temperatury na intensywność tworzenia się siarkowodoru w kanalizacji grawitacyjno-ciśnieniowej oceniam wysoko.

Również wysoko oceniam opracowaną metodykę badań.

Stwierdzam, iż zastosowane w pracy metody i narzędzia badawcze zostały dobrane prawidłowo, a problem badawczy został dobrze zdefiniowany.

Układ pracy jest logiczny, kolejność rozdziałów jest przemyślana i zsynchronizowana.

Tytuł rozprawy dobrze ujmuje zakres podjętych w niej badań.

Studia literaturowe zostały przeprowadzone rzetelnie i w sposób krytyczny.

Wnioski końcowe wynikające z przeprowadzonych badań mają uzasadnienie w uzyskanych wynikach i syntetycznie ujmują osiągnięte rezultaty. Wskazano również kierunki dalszych badań.

Generalnie mogę stwierdzić, iż autorka osiągnęła zamierzone cele oraz udowodniła na drodze badań naukowych przyjętą na wstępie tezę pracy.

Z rozprawy doktorskiej wynika jasno, iż rezultaty przeprowadzonych badań mogą być wykorzystane wprost we wspomaganiu zarządzania eksploatacją sieci kanalizacyjnych. W związku z tym mam prośbę o odpowiedź na pytanie:

Jak wg doktorantki można wykorzystać uzyskane wyniki badań w procesie projektowania systemów grawitacyjno-ciśnieniowych, aby zminimalizować skutki ekonomiczne i środowiskowe emisji siarkowodoru?

Proszę też o opinię nt metod minimalizacji emisji siarkowodoru w sieciach kanalizacyjnych i związanej z tym uciążliwości zapachowej. Jest to jak wiemy poważny problem środowiskowy, w szczególności w zabytkowych centrach miast. Które z metod rekomendowałaby pani jako najbardziej skuteczne?

Uwagi szczegółowe

Praca jest dobrze zredagowana, a opisy jasne i wyczerpujące. W tekście pracy zauważyłem kilka drobnych niedociągnięć i tzw. „literówek”, ale nie mają one wpływu na ocenę merytoryczną rozprawy. Poniżej wymieniam z obowiązku recenzenta, tylko jedną uwagę:

1. brak oznaczeń i opisów podstawowych elementów na kilku rysunkach:
2.13; 2.15; 2.16 (ważna instalacja); 2.17; 3.2 (ważna instalacja)

3. Podsumowanie oceny

Poza wymienionymi wyżej walorami pracy, nie dostrzegam w rozprawie istotnych niedociągnięć merytorycznych.

Praca prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Stanowi jednocześnie indywidualny wkład doktorantki w rozwój specjalności naukowej „wodociągi i kanalizacje”.

Mogę więc stwierdzić, iż przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marty Stachowiak pt. „**Ocena wpływu warunków pracy rurociągów tłocznych na powstanie i emisję siarkowodoru**” jest oryginalnym, naukowym osiągnięciem doktorantki, stanowi rozwiązanie sformułowanego problemu badawczego i tym samym spełnia wymagania ustawy z 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 ze zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Moja wysoka ocena rozprawy doktorskiej upoważnia mnie do zarekomendowania jej do wyróżnienia. Uzasadniają to w szczególności istotne osiągnięcia uzyskane przez doktorantkę, a mianowicie

pod względem poznawczym

1. *Stworzenie (udokumentowanych przez autorski eksperyment badawczy) podstaw naukowych do opisu synergicznego wpływu temperatury i czasu zatrzymania ścieków na dynamikę stężenia siarkowodoru w kanalizacji grawitacyjno-ciśnieniowej*
2. *Opracowanie oryginalnego autorskiego modelu matematycznego umożliwiającego proste i łatwe prognozowanie stężenia siarkowodoru w powietrzu kanalizacyjnym w zależności od czasu przetrzymania i temperatury ścieków w rurociągach tłocznych*

natomiast pod względem aplikacyjnym

1. *eksperymentalna weryfikacja modelu matematycznego do prognozowania stężenia siarkowodoru w powietrzu kanalizacyjnym w zależności od czasu przetrzymania i temperatury ścieków w rurociągach tłocznych*
2. *opracowanie autorskiego algorytmu postępowania diagnostyczno-decyzyjnego dla służb eksploatacyjnych na wypadek zaistnienia problemów odorowo-korozyjnych w sieciach kanalizacyjnych z wykorzystaniem kalkulatora H₂S.*