

Katowice, 05 września 2023 r.

Dr hab. inż. Małgorzata Wysocka, prof. Instytutu
Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Doktoranta mgr inż. Piotra Maciejewskiego

pt.:

**Zmiany stężenia ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej na poszczególnych etapach:
od wydobycia kopaliny ze złoża do wykorzystania tworzywa radonowego w zabiegach
radonoterapii.**

1. PODSTAWA RECENZJI

Podstawą przygotowania recenzji było z uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej *Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej* nr 728/33/RDND08/2021-2024 z dnia 12 lipca 2023r., o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Maciejewskiego pt. Zmiany stężenia ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej na poszczególnych etapach: od wydobycia kopaliny ze złoża do wykorzystania tworzywa radonowego w zabiegach radonoterapii. O decyzji Rady Dyscypliny Naukowej zostałam poinformowana w piśmie dr hab. inż. Roberta Króla, prof. uczelni, Przewodniczącego RDN, z dnia 21.07.2023r. znak RDND08/118/2023.

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Tadeusz Przylibski (Politechnika Wrocławska), a promotorem pomocniczym dr inż. Agata Kowalska (Politechnika Wrocławska).

Wraz z dokumentem przekazany został egzemplarz rozprawy doktorskiej.

2. CHARAKTERYSTYKA PRACY ORAZ UWAGI OGÓLNE

Recenzowany maszynopis składa się ze spisu treści, 9 rozdziałów zawierających treści merytoryczne, zestawienia literatury i źródeł danych, spisu tabel i rysunków. W tekście pracy zamieszczono 61 tabel i 41 rysunków. Zestawienie literatury, na którą powołuje się w swojej pracy Doktorant jest bardzo obszerne, zawiera 169 pozycji, w tym 5 adresów stron internetowych. Należy podkreślić, że wykorzystana w pracy literatura to zarówno pozycje, które można określić jako „historyczne”, dla badaczy uchodzące za kanon, jak i najnowsze publikacje prac prowadzonych w kraju i za granicą.

Praca liczy łącznie 205 stron. Bogaty materiał graficzny (rysunki, wykresy) ułatwia czytanie pracy i analizowanie rozległego materiału badawczego i dyskusji uzyskanych wyników.

Zastrzeżeń nie budzi także struktura pracy. Co prawda praca nie zawiera streszczenia, ale Wstęp zawiera również treści, które zwykle znajdujemy w streszczeniu. Doktorant nie przedstawił w oddzielnym rozdziale przeglądu stanu wiedzy (przeglądu literatury), zakładam, że liczne przywołania literaturowe zawarte we Wstępie i części Rozdziału 2, tj. 2.1. *Rys historyczny*, prezentują stan wiedzy dotyczącej wykorzystania radonu w procedurach kuracyjnych i leczniczych oraz dyskusję na temat teorii i modeli oddziaływania promieniowania jonizującego na organizmy.

We Wstępie (Rozdział 1.) doktorant przedstawia ogólne informacje dotyczące występowania wód radonowych na Dolnym Śląsku oraz ich ponad stuletniego wykorzystania w lecznictwie. Doktorant wyjaśnia ponadto, co skłoniło go do podjęcia się realizacji przedmiotowej pracy. Najistotniejsze powody podjęcia się badań to potrzeba prześledzenia zmian stężeń radonu w wodzie od punktu jej ujęcia, poprzez transport do pomieszczeń zabiegowych, po miejsca, w których kuracjusze poddawani są poszczególnym procedurom. Uzyskane wyniki pomiarów miały stanowić podstawę szacowania dawek, wynikających z ekspozycji na radon, zarówno pacjentów, jak i personelu. Zgodnie z założeniem, poczynionym przez Doktoranta, ten etap byłby z kolei podstawą do „standaryzacji procedur zabiegowych”.

Rozdział nr 2 Doktorant poświęcił na przedstawienie historii odkrycia radonu, oraz teorii dotyczących oddziaływania na organizm dawek, powodowanych ekspozycją na radon i produkty jego rozpadu. Istotna część rozdziału dotyczy opisu mechanizmów powodujących uwalnianie radonu z matrycy mineralnych i jego transportu. W podrozdziałach 2.4 i 2.5 doktorant opisuje ważną, w kontekście pracy doktorskiej kwestię, a mianowicie rolę radonu, jako składnika wód leczniczych oraz jego wpływu na zdrowie ludzi. Szczególną uwagę doktorant

poświęca teorii hormezy radiacyjnej, przeżywającej w ostatnich latach renesans i, jak pisze Doktorant, uzasadniającej działalność uzdrowisk wykorzystujących w swoich zabiegach radon. Rozdział zwięzcza krótki przegląd aspektów prawnych, odnoszących się do dawek granicznych dla różnych grup potencjalnie narażonych na oddziaływanie promieniowania jonizującego.

Rozdział 3 poświęca autor opisowi właściwości fizycznych i chemicznych wód podziemnych oraz kwestiom dotyczącym radoczynności.

Cele i tezy pracy przedstawione są w rozdziale nr 4. Najważniejszym i bardzo ambitnym celem pracy jest opracowanie wytycznych prowadzących do standaryzacji i zoptymalizowania zabiegów terapeutycznych. Do jego realizacji prowadzi realizacja pozostałych celów pracy, a więc określenie zmian stężenia radonu w trakcie eksploatacji, transportu i wykorzystania wód radonowych w zabiegach leczniczych i oszacowanie dawek dla personelu i kuracjuszy.

Doktorant sformułował 3 tezy pracy. Dwie odnoszące się do wskazania, czy też oszacowania wartości i dynamiki zmian stężenia radonu. Trzecią tezę stanowi stwierdzenie, że *wartości dawki efektywnej promieniowania jonizującego, którego źródłem jest radon i jego pochodne znajdujące się w powietrzu pomieszczeń służących do zabiegów radonoterapeutycznych nie przekraczają dopuszczalnych norm dla ogółu ludności (kuracjuszy, pacjentów), jak i pracowników pracujących w warunkach narażenia zawodowego*. Należy stwierdzić, że realizacja celów pozwoliła doktorantowi nie tylko udowodnić postawione tezy, ale również nadać całości pracy bardzo ważny walor użyteczny.

W rozdziale piątym Doktorant przedstawia wybrane obszary badań, a mianowicie Łądek-Zdrój i Świeradów-Zdrój. Korzystając z dostępnej literatury przedmiotu charakteryzuje budowę geologiczną oraz wody podziemne obu poligonów.

Kolejne rozdziały można już zaliczyć do badań własnych. Otwierający je rozdział szósty jest opisem zakresu i metodyki prac. Doktorant wskazuje zakres pomiarów parametrów fizykochemicznych wykonywanych *in situ* (pH, Eh, PEW, T). Pomiar stężenia aktywności radonu ^{222}Rn w powietrzu, stężenia aktywności pochodnych ^{222}Rn oraz stężenia energii potencjalnej α krótkożyciowych produktów rozpadu radonu zostały wykonane w punktach pomiarowych wybranych w taki sposób, by móc zrealizować cele zdefiniowane w rozdziale 4. Doktorant dokładnie opisuje urządzenia pomiarowe wykorzystane do pomiarów *in situ*. Pomiar stężenia aktywności radonu wykonany został z wykorzystaniem urządzenia AlphaGuard. Pomiar aktywności pochodnych radonu – z wykorzystaniem radiometru górniczego RGR-40. W podrozdziale 6.5. Doktorant odnosi się do sposobu obliczania dawek od radonu i jego

pochodnych. Ponadto charakteryzuje wybraną metodę pomiaru laboratoryjnego stężenia radonu w próbkach wód – tj. metodę spektrometrii ciekłoscyntylacyjnej oraz wymienia punkty poboru próbek wód.

Wyniki pomiarów, wraz z wykresami i zestawieniami tabelarycznymi zawarte są w rozdziale 7. W tym samym rozdziale zaprezentowane są zestawienia wyliczeń dawek, na jakie mogą być narażeni kuracjusze oraz personel, w wyniku ekspozycji na radon i jego krótkozyciowe produkty rozpadu w trakcie różnych procedur kuracyjnych. Ta część pracy odnosi się do trzeciej tezy sformułowanej przez Doktoranta cyt. *wartości dawki efektywnej promieniowania jonizującego, którego źródłem jest radon i jego pochodne znajdujące się w powietrzu pomieszczeń służących do zabiegów radonoterapeutycznych nie przekraczają dopuszczalnych norm dla ogółu ludności (kuracjuszy, pacjentów), jak i pracowników pracujących w warunkach narażania zawodowego*. Z kolei podrozdział 7.4. Doktorant określa graniczne stężenia aktywności ^{222}Rn w tworzywach radonowych, ze względu na dopuszczalne dawki efektywne, co stanowi realizację nadrzędnego celu pracy, czyli opracowania wytycznych do standaryzacji i optymalizacji zabiegów terapeutycznych. Jest to część pracy zawierające niezwykle cenne wartości użytkowe. Doktorant na podstawie badań własnych, sformułował podstawy wytycznych dla obu uzdrowisk. Oszacowanie dawek, na jakie mogą być narażeni zarówno pacjenci, jak i personel to ważny wkład w stan wiedzy z zakresu ochrony radiologicznej. Z kolei wskazanie granicznych stężeń aktywności radonu w tworzywach radonowych to ważna wskazówka dla osób planujących procedury kuracyjne. Niewykluczone, że racjonalizacja planowania może przełożyć się na efekty finansowe. Rozdział ósmy to podsumowanie pracy, a dziewiąty wnioski, sformułowane na podstawie wyników wykonanych badań i obliczeń. Pracę kończy spis literatury, tabel i rysunków.

3. KRYTYCZNA ANALIZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Maciejewskiego jest bardzo interesująca, zawiera wielu niezmiernie cennych wyników pomiarów, cechuje się ponadto ważnym aspektem użytkowym. Niemniej Doktorant nie ustrzegł się pewnych błędów, dlatego w niniejszej Recenzji przedstawiam uwagi o charakterze merytorycznym, pojęciowym i edytorskim. Przedstawiam też pytania, na które oczekuję odpowiedzi w trakcie publicznej obrony pracy doktorskiej.

Uwagi merytoryczne

W Rozdziale 4 Doktorant przedstawia Cele i Tezy pracy. O ile cele przedstawione są według mnie jasno i klarownie, to sposób sformułowania tez prowokuje pytania. Dlaczego Doktorant założył, że zmiany stężenia aktywności radonu w czasie wykorzystania wód radonowych w różnych terapiach „mogą sięgać dwóch rzędów wielkości”? W kolejnej tezie Doktorant pisze, że „kontakt wody radonowej z powietrzem atmosferycznym prowadzi do szybkiego zmniejszania stężenia aktywności radonu w wodzie leczniczej”, słusznie nie precyzując liczbowo, jak szybko. Podobny efekt zachodzi nie tylko na granicy woda radonowa/powietrze atmosferyczne, ale również woda/powietrze w pomieszczeniach kuracyjnych, co zresztą Doktorant opisuje w swojej pracy.

Podrozdział 6.5., poświęcony obliczaniu dawek od radonu i jego pochodnych, budzi najwięcej moich zastrzeżeń. W celu szacowania dawek, na jakie mogą być narażeni kuracjusze i pracownicy uzdrowisk, Doktorant wykorzystał schemat proponowany przez ICRP 2017, Publikacja 137. Propozycje przedstawione w przywołanej publikacji mają jedynie charakter rekomendacji. W naszym kraju obowiązuje ROZPORZĄDZENIE RADY MINISTRÓW z dnia 11 sierpnia 2021 r. (D.U. z dnia 9 września 2021 r. Poz. 1657), w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące, w którym wyraźnie napisano, cyt.: „Wartość obciążającej dawki skutecznej (efektywnej), wyrażonej w siwertach (Sv), wyznacza się przez iloczyn stężenia energii potencjalnej alfa, wyrażonego w dżulach na metr sześcienny ($J m^{-3}$), czasu narażenia, wyrażonego w godzinach (h), oraz odpowiedniego współczynnika konwersji: radon na stanowisku pracy $1,4 Sv/(J h m^{-3})$ ”. Wyżej wymienione Rozporządzenie, powinno być zacytowane, mimo że Doktorant w dalszej części pracy szacuje dawki, na jakie narażeni są kuracjusze i personel, wykorzystując własne obliczenia i rekomendacje ICRP. Ponadto wydaje się, że niepotrzebne są rozważania, czy miejsca wykonywania procedur balneoterapeutycznych traktować jak jaskinie, czy jak miejsca pracy. Sugeruję, żeby Doktorant przyjął, że są to miejsca pracy. Dodatkowo Doktorant na str. 55 pisze, że zaczerpnięty z ICRP 2017 współczynnik konwersji dla miejsc pracy wynosi $1,3 \cdot 10^{-5} mSv m^3 Bq^{-1} h^{-1}$, a na stronach 57, 58 i dalszych - $1,2 mSv m^3 Bq^{-1} h^{-1}$, co jest zgodne z Tab. A.11, str. 475 tejże publikacji.

W rozdziale siódmym, podrozdział 7.1.2. Doktorant pisze o pomiarach stężenia aktywności pochodnych radonu i energii potencjalnej alfa za pomocą radiometru górniczego RGR-40. Jak przedstawił w tabelach 10, 11, 12, w żadnym przypadku nie zmierzył wartości stężenia E_{α} powyżej progu detekcji stosowanego urządzenia, wynoszącego $1 \mu J/m^3$. Moje doświadczenie sugeruje, że przy wysokich (i bardzo wysokich) stężeniach radonu, mierzonych

przez Doktoranta w różnych punktach pomiarowych, bardzo mało prawdopodobne jest, żeby w żadnym przypadku nie występowały pochodne radonu w stężeniach umożliwiających ich detekcję. Musiałaby być stosowana jakaś aktywna metoda wydmuchiwania aerozolu, co przecież nie miało miejsca. Jedną z możliwości niskich stężeń Ea , przy bardzo wysokich stężeniach radonu mógłby być nieprawidłowo określony współczynnik kalibracji. A może Doktorant wykonał pomiary sprawdzające w pomieszczeniach innych, niż przeznaczone do wykonywania procedur kuracyjnych? Na przykład w pomieszczeniu pracowników lub w piwnicy?

Wobec braku wyników pomiarów Ea , sugeruję, żeby przed przyszłą publikacją efektów pracy usunąć niezapełnione zmierzonymi wartościami tabele, oraz pominąć część rozdziału 6.5, z dyskusją sposobu szacowania dawek efektywnych od PAEC, a poprzestać na pokazaniu, w jaki sposób możemy dawki obliczać opierając się o wyniki pomiarów stężenia radonu i stosowaniu odpowiednich współczynników konwersji.

Uwagi o charakterze merytoryczno-pojęciowym i edytorskim.

Doktorant nie ustrzegł się błędów redakcyjnych, które oczywiście nie wpływają na ogólną ocenę pracy. Na przykład na stronie 9, autor pisze, że „... pomiary pozwalają uzyskać nową wiedzę na temat skali transferu radonu (zmian jego stężenia)...”. Sugeruję pozostać przy pojęciu „zmian stężenia” w trakcie transportu i w czasie wykorzystywania w zabiegach kuracyjnych. Po kilkakroć (np. na stronie 101) doktorant pisze o „zubażaniu wody w radon”. Proponuję pisać raczej, że stężenie radonu maleje. Pojęcie „zubożony” stosuje się w kontekście uranu, stosowanego w pociskach przeciwpancernych, będącego produktem ubocznym wzbogacania uranu. Na stronie 11 Doktorant napisał, że „... wprowadzono koncepcje progu, po przekroczeniu którego dopiero pojawiają się negatywne skutki oddziaływania promieniowania jonizującego”. Stwierdzenie powinno raczej brzmieć „... po przekroczeniu którego **mogą pojawić** się negatywne skutki...”. Doktorant w podrozdziale 2.5. przedstawił dyskusję na temat wpływu radonu na zdrowie ludzi. Sporo miejsca poświęcił prezentacji teorii hormezy, dającej podstawy wykorzystania radonu do zabiegów kuracyjnych. Sugeruję nie stosowanie stwierdzeń jednoznacznie wskazujących pozytywne skutki ekspozycji na radon i jego produkty rozpadu, np. na str. 21 „W zakresie do kilkudziesięciu mSv występuje efekt hormezy”. Może raczej „Zakłada się, możliwość zaistnienia hormezy”? Na stronie 23 Doktorant pisze, że „skutki dużych dawek nie przewidują skutków niewielkich dawek”. Sądzę, że jest to niezręczne stwierdzenie, że na podstawie skutków zdrowotnych, powodowanych dużymi dawkami, nie możemy przewidywać skutków, jakie mogłyby spowodować niewielkie dawki.

W rozdziale 6.5. Doktorant używa sformułowania „energia potencjalna promieniowania α odniesiona do objętości powietrza”, zamiast „stężenie energii potencjalnej promieniowania α ”, jak powszechnie stosuje się w ochronie radiologicznej. Podobnie nie jest stosowane sformułowanie „dawka efektywna na ekspozycję od pochodnych radonu”, a „współczynnik konwersji”. Równanie (8) jest powtórzeniem równania (7).

Na stronie 63 napisano, że „Sumaryczna aktywność promieniotwórczych pochodnych ^{222}Rn jest odzwierciedlana za pomocą stężenia energii potencjalnej α ”, co nie jest stwierdzeniem prawdziwym. Przystawiając w rozdziale 7.3 zestawienia wartości dawek efektywnych, Doktorant używa sformułowania „błąd pomiarowy”, zamiast przyjętego wyrażenia „niepewność pomiaru”. Dawki liczone są na dwa sposoby – z „odjęciem błędu pomiarowego” i z „dodaniem błędu pomiarowego”. W ochronie radiologicznej stosujemy zasadę pesymizacji, czyli zawsze do zmierzonej wartości dodajemy niepewność pomiaru. Dzięki takiemu sposobowi postępowania unikamy niedoszacowania dawek, czyli w przypadku omawianej pracy, potencjalnego niedoszacowania skutków ekspozycji na radon i jego pochodne.

Przed publikacją pracy sugeruję ponadto zwrócić uwagę na drobne niezręczności językowe (np. kolokwializmy) i powtórzenia oraz niekonsekwentnie stosowane krotności jednostek podstawowych.

3. UWAGI DYSKUSYJNE

Poniżej przedstawiam uwagi dyskusyjne, na które oczekuję odpowiedzi w czasie publicznej obrony rozprawy doktorskiej:

- Proszę o przedstawienie, na jakich przesłankach opierał się Doktorant, zakładając (formułując tezy), że zmiany stężenia aktywności radonu w czasie wykorzystania wód radonowych w różnych terapiach „mogą sięgać dwóch rzędów wielkości”?
- Proszę o przedstawienia kilku przykładów porównania wartości dawek efektywnych obliczonych z wykorzystaniem współczynników konwersji zaczerpniętych przez Doktoranta z ICRP 2017 i z wykorzystaniem współczynnika wskazanego w rozporządzeniu w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące. Proszę o skomentowanie różnic – czy i w jakim zakresie zmieniają wnioski końcowe.

- Proszę o skomentowanie, jakie czynniki wpływają na szybkie zmiany stężenia radonu w powietrzu inhalowanym przez kuracjuszy w Świeradowie-Zdroju. Jest to tym bardziej interesujące, że zmierzone zostały wartości od poniżej tysiąca do powyżej miliona Bq/m³.
- Proszę o wyjaśnienie pierwszego z zaleceń odnośnie standaryzacji i zoptymalizowania zabiegów radonoterapeutycznych – gdzie i jakie pomiary miałyby być prowadzone?

4. WARTOŚCI POZNAWCZE I UTYLITARNE PRACY

Do wartości naukowych i aplikacyjnych pracy zaliczam przede wszystkim wykonanie w sposób systematyczny i przemyślany pomiarów stężenia radonu w wodzie stosowanej do zabiegów w dwóch uzdrowiskach od źródła, skąd jest pozyskiwana, do ścieku, gdzie trafia po jej wykorzystaniu. Podobnie starannie wykonane są pomiary stężenia radonu z wykorzystaniem urządzenia, pozwalającego na obserwację zmian stężenia tego nuklidu w pomieszczeniach kuracyjnych. Dzięki wynikom pomiarów Doktorant mógł oszacować dawki dla pacjentów i personelu, na jakie są narażeni podczas procedur kuracyjnych. Doktorant przeanalizował różne czasy trwania ekspozycji na radon i jego pochodne w trakcie różnych procedur – kąpiele zbiorowe i indywidualne, inhalacje indywidualne i spaceru w tężni. Informacje dotyczące dawek skutecznych oraz wskazówki i wytyczne dotyczące standaryzacji zabiegów radonoterapeutycznych mogą wykorzystać zarządy obu uzdrowisk. Informacja o potencjalnych dawkach skutecznych umożliwi lepszą organizację pracy personelu, a co za tym idzie poprawę ich bezpieczeństwa radiacyjnego. Bardzo cenne są wskazówki dotyczące standaryzacji przygotowania i wykonywania poszczególnych zabiegów. Doktorant wskazuje, że dzięki znajomości skali zmian stężenia aktywności radonu w czasie i przestrzeni, należy spróbować sprawdzić różne warianty prowadzenia zabiegów i w miarę uzyskiwanych wyników, wprowadzić modyfikacje dotychczasowych rutynowych działań. Słusznie zauważa konieczność pomiarów stężenia energii potencjalnej α pochodnych radonu, ponieważ to ich obecność we wdychanym powietrzu może powodować podwyższone ryzyko zachorowania na raka płuc.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa mgr inż. Piotra Maciejewskiego pt. *Zmiany stężenia ^{222}Rn w radonowej wodzie leczniczej na poszczególnych etapach: od wydobycia kopaliny ze złoża do wykorzystania tworzywa radonowego w zabiegach radonoterapii*, ma charakter poznawczy i utylitarny, stanowi kompleksowy i oryginalny sposób realizacji celu rozprawy, co potwierdza, że Autor posiada pełne umiejętności samodzielnego wykonywania pracy naukowej i spełnia wymogi stawiane dysertacjom doktorskim. Autor w sposób prawidłowy dokonał wyboru metod badawczych i analitycznych.

Stwierdzam, że:

- niniejsza rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań;
- przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i oryginalne rozwiązanie w zakresie stosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej.

Mgr inż. Piotr Maciejewski udowodnił zatem swoje kompetencje w zakresie formułowania celów badawczych, organizacji prac i badań naukowych, korzystania z nowoczesnych metod analitycznych, krytycznego wykorzystywania danych własnych i archiwalnych, oraz właściwej interpretacji i dyskusji końcowych wyników badań.

Mając to na uwadze, w mojej opinii recenzowana praca odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim określonym w art.187 ust.1 i 2. ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. Z 2023 r., poz. 742) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Piotra Maciejewskiego do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej.



