

dr hab. inż. Jerzy Krawczyk, prof. IMG-PAN
Instytut Mechaniki Górotworu
Polskiej Akademii Nauk

Kraków, 30.09.2026

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Wróblewskiego
p.t.: Metoda wyznaczania strumieni ciepła procesów technologicznych dla określenia bilansu
ciepłnego rejonów robót górniczych w kopalniach rud miedzi

Promotor: dr hab. inż. Maciej Zawiślak, prof. PW

Promotor pomocniczy: dr inż. Sebastian Gola

Podstawa formalna recenzji

Podstawą do wykonania recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Wróblewskiego p.t.: „Metoda wyznaczania strumieni ciepła procesów technologicznych dla określenia bilansu ciepłnego rejonów robót górniczych w kopalniach rud miedzi”, sporządzone w dniu 27.07.2026 w wyniku Uchwały Rady Dyscypliny podjętej w dniu 15 lipca 2026, zgodnie z odpowiednimi artykułami Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571 ze zmianami) oraz Uchwały nr 251/18/2024 Senatu PWr.

Dane bibliograficzne pracy

Rozprawa powstała pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Macieja Zawiślaka i promotora pomocniczego dr inż. Sebastiana Goli. Zawiera ona 156 stron, w tym 131 strony tekstu rozprawy ujętego w dwanaście rozdziałów, wykaz symboli, oznaczeń i skrótów, spisy rysunków i tabel oraz bibliografię. W tekście jest 76 rysunków oraz 24 tabele. Bibliografia zawiera 95 pozycji wśród nich cztery wieloautorskie Kandydata oraz jego pracę magisterską. Układ pracy i jej forma są właściwe dla prac doktorskich.

Ocena zasadności podjęcia tematu pracy

W miarę wzrostu głębokości podziemnej eksploatacji rud metali zapewnienie odpowiednich warunków klimatycznych w wyrobiskach napotyka na rosnące trudności, które wymagają odpowiednich środków zaradczych. Dla ich doboru niezbędnym elementem jest określenie bilansu ciepłnego rejonów robót górniczych, który w znacznym stopniu zależy od strumieni ciepła generowanego podczas procesów technologicznych, które to zagadnienia stanowią tematykę pracy doktorskiej. Dotychczas dla rozwiązywania tych zagadnień stosowano podejście oparte na wielu upraszczających założeniach. Nowe możliwości w zakresie zarówno pomiarów jak i obliczeń, które dają szansę na osiągnięcie lepszych

rezultatów w tej dziedzinie, nie zostały dotychczas w pełni wykorzystane, co wskazuje na zasadność podjęcia tematu pracy.

Charakterystyka Autora rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Adam Wróblewski jest absolwentem studiów magisterskich na Politechnice Wrocławskiej. Obecnie pracuje jako asystent badawczo-dydaktyczny w Katedrze Górnictwa na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii tej uczelni. Jest współautorem dwudziestu siedmiu prac opublikowanych w czasopiśmie naukowych lub przedstawianych na konferencjach. Tematyka większości z nich jest związana z problematyką rozprawy.

Układ i treść pracy

Koncepcja, układ i tok rozumowania przedstawiony w pracy są harmonijne i przejrzyste. Po wprowadzeniu zawierającym uzasadnienie tematyki pracy w kolejnych trzech rozdziałach Autor dokonuje przeglądu dotychczasowego stanu wiedzy, a w szczególności tradycyjnego podejścia do zagadnień wymiany ciepła. Rodzaje wymiany ciepła wraz z opisującymi je równaniami zostały omówione w **rozdziale drugim**. Źródłom ciepła występującym w wyrobiskach górniczym, takim jak górotwór, pracujące maszyny i urządzenia, urobek, kondensacja i odparowanie wilgoci oraz zjawisko autokompresji poświęcono **rozdział trzeci**. Treść tych rozdziałów stanowi wprowadzenie do **rozdziału czwartego** poświęconego wybranym podstawie przeglądu literatury metodom wyznaczania bilansów cieplnych rejonów górniczych. Zdaniem Autora w opisach procesu wymiany ciepła występują luki badawcze, które wraz z przyjmowanymi upraszczającymi założeniami mogą w niedostatecznym stopniu reprezentować charakter tych procesów. W szczególności Autor postuluje stosowanie dokładniejszych opisów zjawiska przejmowania ciepła, ocenę istotności wpływu promieniowania i rzeczywistej temperatury powierzchni odsłonięcia skał oraz wpływu czasowej zmienności emisji ciepła przez maszyny na bilans cieplny.

W kolejnym piątym rozdziale uzasadnia wybór tematu rozprawy, prezentuje jej tezę i cel, wymienia metody badawcze a także opisuje strukturę pracy.

Tezy pracy dotyczą znaczenia wpływu głębokości eksploatacji i temperatury pierwotnej na procesy wymiany ciepła w układzie obejmującym maszyny robocze i powietrze wentylacyjne, rosnącego głębokością eksploatacji i temperaturą pierwotną wpływu promieniowania i użyteczności bezkontaktowych metod pomiaru temperatury dla wyznaczania bilansów cieplnych.

Charakterystykę wybranego rejonu wydobywczego przedstawiono w **Rozdziale szóstym**. Pomiary przeprowadzono w wybranych wyrobiskach oddziałów kopalni należącej do KGHM Polska Miedź S.A. W rejonach tych stosuje się kilka wariantów eksploatacji

system komorowo-filarowym z ugięciem stropu a temperatura pierwotna górotworu dochodzi do 44.5 °C.

Rozdział siódmy przedstawia metodykę i wyniki badań wpływu promieniowania cieplnego na temperaturę powietrza przy zmiennej głębokości. Badania polowe przeprowadzono w wiązce upadowych przewietrzanych grupowym prądem powietrza świeżego przy pomocy czarnego termometru kulistego oraz zestawu mierników warunków środowiskowych (pomiaru temperatur termometrami suchym i wilgotnym, wilgotności, ciśnienia barometrycznego, średniej prędkości przepływu powietrza oraz termogramy spągu i ociosów). Przeprowadzona analiza wyników badań nie wykazała wpływu promieniowania za wyjątkiem pomiarów w warunkach słabego przepływu, co zdaniem Autora może być spowodowane wpływem konwekcji wymuszonej. Ze względu na niejednoznaczność wyników badania kontynuowano w warunkach laboratoryjnych. W tym celu autor zbudował stanowisko, w którym w prostokątnym przewodzie sterowano przepływem i temperaturą ścian a warunki środowiskowe mierzono w sposób zbliżony do stosowanego w kopalni. Większość pomiarów prowadzono dla pokojowych temperatur i wilgotności. Dla odtworzenia warunków zbliżonych do występujących w jednym z kopalnianych punktów pomiarowych użyto komory klimatycznej. Po przeanalizowaniu wyników pomiarów polowych i laboratoryjnych Autor stwierdza, że *„w warunkach, w których temperatura odsłoniętych powierzchni górotworu jest większa bądź równa 40°C, a wilgotność powietrza jest większa bądź równa 70%, należy obligatoryjne stosować modele uwzględniające przyrost entalpii powietrza ze względu na promieniowanie ciepłe”*.

W ramach gromadzenia danych do określania strumieni ciepła i ich bilansowania Autor przeprowadził badania termowizyjne maszyn górniczych, opisane w **Rozdziale ósmym**. Obiektem badań była ładowarka górnicza. Jej wstępne badania wykonano w miejscu stacjonowania maszyn, gdzie zdobyto doświadczenia potrzebne dla ustalenia metodyki pomiarowej, a następnie kontynuowano w trakcie pracy w jednej z komór. Ich zasadniczym elementem było wykonanie termogramów wybranych powierzchni maszyny w różnych warunkach pracy a także przeprowadzenie pomiarów warunków środowiskowych oraz odczyt danych z komputerowego monitoringu pracy maszyny.

Wyniki badań z rozdziału ósmego uzupełnione o pomiary geometrii wyrobisk przy pomocy laserowego skaningu 3D posłużyły do zbudowania modelu numerycznego emisji ciepła w wyrobisku ślepym, który był analizowany w **rozdziale dziewiątym**. W oparciu o konwersję chmury punktów ze skaningu Autor określił kształt domeny obliczeniowej, wyniki pomiarów wykorzystano w określaniu warunków brzegowych. Do symulacji komputerowej przepływu i wymiany ciepła w modelu ładowarki pracującej w ślepym wyrobisku zastosowano metodę objętości skończonej. Przeprowadzono analizę warunków termicznych

oraz przewietrzania a także obliczono wartość całkowitego strumienia ciepła przekazywanego przez maszynę.

W oparciu o analizę wyników badań eksperymentalnych oraz modelowania numerycznego Autor zaproponował metodę wyznaczania strumienia ciepła od maszyn i urządzeń górniczych, opisaną w **rozdziale dziesiątym**. Opiera się ona na porównaniu strumienia ciepła obliczonych na podstawie pomiarów termowizyjnych ze strumieniem obliczonym na podstawie pomiarów klimatycznych. Dla pomiarów pracy maszyny w trybie ładowania strumienie te pozostają w stałej proporcji. Korzystając z tej prawidłowości Autor zaproponował algorytm łączący pomiary termowizyjne z pomiarami średniej prędkości przepływu, temperatury suchej, pola przekroju i obwodu wyrobiska. Jest on oparty na założeniu stałej proporcji między strumieniem ciepła obliczonym na podstawie termowizji a poszukiwanym całkowitym strumieniem ciepła emitowanego przez maszynę podczas ładowania.

Kolejny, **jedenasty rozdział** jest poświęcony eksperymentalnej weryfikacji metody. Analiza wyników pomiarów środowiskowych wykonanych na dolocie i wylocie wybranego oddziału wydobywczego, uwzględniająca bilanse ciepła jawnego i utajonego potwierdziła oszacowanie udziału emisji pochodzącej od maszyn pracujących w badanym obszarze w całkowitym strumieniu ciepła.

Wnioski końcowe i podsumowanie efektów pracy zamieszczono w **Rozdziale dwunastym**. Najistotniejszymi ich elementami są określenie progowych wartości temperatury pierwotnej i wilgotności powietrza, powyżej których promieniowanie cieplne ma istotny wpływ na warunki klimatyczne oraz autorska metoda wykorzystania pomiarów termowizyjnych do określenia całkowitego strumienia ciepła generowanego w trakcie pracy maszyn.

Analiza rozprawy doktorskiej

Eksploatacja złóż w kopalniach LGOM odbywa się na znacznych głębokościach w trudnych warunkach górniczo-geologicznych. Splot tych uwarunkowań znacząco utrudnia zapewnienie odpowiedniego klimatu w podziemnych wyrobiskach. Pomimo mechanizacji prac górniczych nadal nie można uniknąć sytuacji, w których nie można odizolować pracowników od niekorzystnych warunków klimatycznych. Wysokie temperatury mogą również mieć negatywny wpływ na urządzenia i instalacje kopalni. Poszukiwanie uzasadnionych technicznie i ekonomicznie rozwiązań w tej dziedzinie w znacznym stopniu zależy od metodyki określania bilansów cieplnych. Przy ich określaniu istotną składową są strumienie ciepła pochodzące od maszyn i urządzeń górniczych. W rozprawie przedstawiono wyniki wielokierunkowych poszukiwań w tej dziedzinie, których rezultatem jest

zaproponowana przez Autora metoda. Były one poprzedzone głębokim przeglądem literatury i omówieniem klasycznych metod. W ramach rozprawy przeprowadzono szereg pomiarów in situ i w warunkach laboratoryjnych z użyciem zarówno klasycznych przyrządów do pomiarów środowiskowych jak i nie stosowanych powszechnie pomiarów termowizyjnych i trójwymiarowego skaningu laserowego. Na ich podstawie Autor uzasadnia wnioski dotyczące udziału promieniowania w bilansie cieplnym. Dotychczas pomiary termowizyjne były stosowane głównie do wykrywania anomalii obrazu termicznego maszyn lub innych obiektów. Autor wykonał pomiary termowizyjne wybranych powierzchni ładowarki i po uzupełnieniu ich o pomiary warunków środowiskowych wykorzystał je do przeprowadzenia symulacji numerycznych przepływu i wymiany ciepła w otoczeniu ładowarki pracującej w ślepym wyrobisku oraz do oszacowania strumienia ciepła emitowanego przez analizowane powierzchnie. Oszacowanie to dla najbardziej miarodajnych warunków pomiarowych dało wynik proporcjonalny do strumienia ciepła obliczonego na podstawie pomiarów warunków klimatycznych i stanu przewietrzania wyrobiska. Proporcjonalność ta stanowi istotny czynnik w zaproponowanej przez Autora metody. Autor wykazał zgodność jej przewidywań z pomiarami warunków klimatycznych w wybranym oddziale wydobywczym. Drugim z najistotniejszych wniosków, wysnutych przez Autora dotyczy progowych warunków, powyżej których promieniowanie cieplne ma znaczący udział w bilansie.

Uwagi dyskusyjne i krytyczne oraz pytania

Wielokierunkowe badania i analizy, których wyniki przedstawiono w rozprawie prowadziły Autora do wspomnianego już zalecenia odnośnie uwzględniania wpływu promieniowania. Czytając uzasadnienie, nie znalazłem precyzyjnego sformułowania kryterium oceny tej istotności. Czy był to udział liczbowy, czy wyraźna jakościowa zmiana?

W odniesieniu do metody określania strumienia ciepła na podstawie termowizji skłaniałbym się do uznania stwierdzenia proporcjonalności za obiecującą hipotezę, której wiarygodność mogłaby wzrosnąć przy większej ilości pomiarów. Wobec rozrzutu współczynnika proporcjonalności wyliczanego w poszczególnych przypadkach uważam, że wystarczające byłoby zaokrąglenie jego wartości do całkowitej krotności.

Współczesne systemy komputerowego sterowania wtryskiem paliwa dla danej wartości kalorycznej paliwa, przy założeniu, że ulega ono całkowitemu spaleniowi dają możliwość monitorowania chwilowej mocy uwalnianej w silniku. Czy Autor widzi możliwość przeprowadzenia bilansu i obliczenia poszczególnych strumieni energii, które w większości przyczynią się do wygenerowania strumienia ciepła?

Mam też mniej istotne pytania i uwagi, które wymienię poniżej.

- Alfabetyczne uporządkowanie spisu oznaczeń ułatwiłoby jego wykorzystanie.
- Umieszczenie wymiarów na rysunku 61 oraz zaznaczenie położenia lutniociągu ułatwiłoby zapoznanie się z treścią. Zastosowanie stopniowanej przezroczystości powierzchni pozwoliłoby lepiej zobrazować umiejscowienie ładowarki i lutniociągu.
- Czy nie było możliwości wykonania skanów 3D podczas pomiarów termowizyjnych? Kształt wyrobisk może zmieniać się w czasie.
- Czy wyboru gęstości siatki dokonano na podstawie analizy wrażliwości? Jeśli tak, to jakie alternatywne rozmiary siatek rozpatrywano i jak oceniano wpływ zagęszczania siatki na rozwiązanie?
- Czy w modelu numerycznym przyjęto jednorodne pole temperatur na ścianach o wartości równej temperaturze pierwotnej. Czy nie było możliwości wykorzystania pomiarów termowizyjnych?

Wymienione wyżej uwagi, pytania i wątpliwości nie mają wpływu na ogólnie pozytywną ocenę pracy.

Podsumowanie

Stwierdzam, że treść rozprawy świadczy o ogólnej wiedzy kandydata w dziedzinie Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki a szczególnie nauk górniczych. Została ona potwierdzona licznymi odniesieniami do literatury oraz realizacją własnych, oryginalnych badań, których wyniki stanowią istotną część pracy. Autor rozprawy sformułował problemy badawcze i przedstawił uzasadnienie celowości ich analiz, a po krytycznej dyskusji dotychczasowego stanu wiedzy zaproponował nowe autorskie rozwiązania. W szczególności samodzielnie zrealizował zagadnienia badawcze w zakresie pomiarów warunków klimatycznych i określania bilansów ciepła zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i w podziemnych wyrobiskach, w których była prowadzona działalność górnicza. Przeprowadził też symulacje numeryczne metodą objętości skończonej. W efekcie sformułował szereg wniosków a także zaproponował metodę obliczania strumieni ciepła generowanego przez maszyny na podstawie pomiarów termowizyjnych. Wyniki prac oraz doświadczenie uzyskane przez Autora mają nie tylko walor poznawczy ale również mogą prowadzić do wykorzystania ich w praktyce.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Adama Wróblewskiego p.t.: „Metoda wyznaczania strumieni ciepła procesów technologicznych dla określenia bilansu cieplnego rejonów robót górniczych w kopalniach rud miedzi”, spełnia

wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.