

Zakład Ogrzewnictwa, Wentylacji, Klimatyzacji i Chłodnictwa  
Instytut Energii  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Politechnika Gdańska  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Miklasa**

*„Wpływ parametrów projektowych i operacyjnych systemów wyposażenia technicznego na zużycie energii i komfort klimatyczny w budynku energooszczędnym”*

### **1. Wprowadzenie**

Opiniowana praca jest poświęcona analizom z obszaru efektywności energetycznej w budownictwie. Badania teoretyczne i eksperymentalne przeprowadzono bazując na sześciolletnim monitoringu parametrów termiczno-przepływowych w systemie grzewczym, przygotowania ciepłej wody użytkowej i systemie wentylacyjnym wybranego budynku jednorodzinne. System wentylacji mechanicznej, wyposażony w rekuperator do odzysku ciepła z powietrza wywiewanego, współpracował w tym przypadku z gruntowym wymiennikiem ciepła w celu wstępnego podgrzewu/schłodzenia powietrza wentylacyjnego. Zgromadzono obszerny zbiór danych, który umożliwił opracowanie matematycznych modeli do: a) wyznaczania zapotrzebowania na ciepło i tzw. „chłód” w budynku; b) prowadzenia ciepłno-hydraulicznych analiz gruntowego rurowego wymiennika ciepła. W ramach pracy przeprowadzono również optymalizację wybranych parametrów projektowych i eksploatacyjnych w systemach technicznego wyposażenia budynku.

Poprawa efektywności energetycznej w budownictwie, rozpatrywana z perspektywy potrzeb użytkownika końcowego, jest przede wszystkim utożsamiana z termomodernizacją sektora budowlanego. Można wyróżnić dwa główne kierunki prac. Pierwszy z nich dotyczy poprawy izolacyjności termicznej przegród budowlanych, by minimalizować wartości strumienia ciepła przez nie przenikające, z dużą uwagą skupioną na wdrażaniu materiałów o mniejszym oddziaływaniu środowiskowym. Natomiast drugi dotyczy poprawy efektywności systemów technicznego wyposażenia budynków (przede wszystkim grzewczego, przygotowania ciepłej wody użytkowej, wentylacyjno-klimatyzacyjnego). Prace badawcze są w tym przypadku ukierunkowane na wielokryterialną optymalizację systemów już na etapie doboru i łączenia technologii energetycznych. Istotne jest także sterowanie parametrami operacyjnymi podczas ich późniejszej eksploatacji. Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Miklasa doskonale wpisuje się w ten nurt badawczy.



## 2. Zakres rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i liczy 179 stron. Obejmuje ona 9 zasadniczych (numerowanych) rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz oznaczeń, bibliografię oraz 2 załączniki.

Pierwszy rozdział pracy jest wprowadzeniem, w którym Autor omawia m.in. zagadnienia związane z komfortem klimatycznym w budynku, przywołując z literatury wskaźniki do jego oceny, jak również wymagania energetyczne sformułowane dla budownictwa. W tym kontekście zaprezentowano składniki bilansu energii w budynku oraz pokrótce omówiono czynniki kształtujące w nim zapotrzebowanie na energię. W ostatnim podrozdziale zawarto uzasadnienie konieczności stosowania zintegrowanej oceny budynku z systemami technicznego wyposażenia, co stanowi tematykę podjętą w ramach pracy doktorskiej.

W drugim rozdziale przedstawiono cel pracy i zakres działań prowadzących do jego osiągnięcia. Ponadto, sformułowano dwie tezy. Zgodnie z pierwszą z nich, tylko „holistyczne podejście do budynku wraz z STW (*systemami technicznego wyposażenia*) daje możliwość oceny wpływu zmienności parametrów projektowych i operacyjnych na zużycie energii i komfort klimatyczny”. Druga teza dotyczy efektywności gruntowego rurowego wymiennika ciepła w kontekście wzajemnej relacji kierunku przepływu powietrza oraz kierunku nachylenia wzdłużnej osi tego wymiennika.

W rozdziale trzecim scharakteryzowano obiekt wytypowany do badań. Dane architektoniczno-lokalizacyjne uzupełniono informacjami o systemach technicznego wyposażenia budynku. Omówiono też wykorzystane układy pomiarowe.

Charakterystykę energetyczną obiektu badań, opracowaną na podstawie wyników pomiarów, przedstawiono w czwartym rozdziale. Wyznaczono dla niego wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną.

Rozdział piąty jest najbardziej obszerny. Zawiera m.in. wyniki pomiarów parametrów termiczno-wilgotnościowych powietrza zewnętrznego i wewnętrznego, wyznaczone stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu wewnętrznym, termiczno-przepływowe warunki powietrza wentylacyjnego (również dla przepływu przez gruntowy wymiennik ciepła) oraz wyniki badań szczelności powietrznej budynku. W podrozdziale 5.5 zaprezentowano zasady sterowania przepływem powietrza przez rekuperator oraz gruntowy wymiennik ciepła. W kontekście składników obciążenia cieplnego budynku, w ramach podrozdziału 5.6 omówiono źródła wewnętrznych zysków ciepła, skrupulatnie prezentując dane dotyczące urządzeń elektrycznych i oświetlenia, harmonogramu użytkowania pomieszczeń przez ludzi, czy emisji ciepła z instalacji centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Omówiono też model do szacowania zewnętrznych zysków ciepła pochodzenia słonecznego (rozd. 5.7).

W szóstym rozdziale przedstawiono opracowane algorytmy do matematycznego modelowania zapotrzebowania na energię do ogrzewania/chłodzenia budynku oraz procesów transportu ciepła i oporów hydraulicznych związanych z przepływem powietrza przez rurowy gruntowy wymiennik ciepła. Model do wyznaczania zapotrzebowania na ciepło/chłód ma swoją genezę w analogii cieplno-elektrycznej. Model do wyznaczania spadków ciśnienia



w przepływie powietrza przez gruntowy wymiennik ciepła oraz temperatury powietrza na wylocie z wymiennika, opracowano z przywołaniem korelacji wiążących stosowne liczby kryterialne, zdefiniowane dla transportu ciepła i pędu w mechanizmie konwekcji wymuszonej. W modelowaniu uwzględniono zmiany zawartości wilgoci w powietrzu wskutek kondensacji pary wodnej z powietrza, po spadku jego temperatury poniżej wartości temperatury punktu rosy. Warto podkreślić, że modelowanie wymiennika gruntowego prowadzono dwuwariantowo: 1) traktując rurowy rekuperator jako jeden odcinek obliczeniowy i przyjmując w obliczeniach temperaturę gruntu na uśrednionej głębokości posadowienia wymiennika oraz 2) dzieląc rekuperator na  $n$  odcinków obliczeniowych z przyporządkowaną każdemu odcinkowi średnią temperaturą gruntu. Powyższe podejście badawcze pozwoliło w kolejnym etapie prac wyjaśnić przyczynę rozbieżności pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i teoretycznych gruntowego wymiennika ciepła ze znacznym nachyleniem jego wzdłużnej osi. Rozdział szósty zamyka porównanie wyników modelowania zapotrzebowania na ciepło za pomocą własnych algorytmów z wynikami symulacji wykonanych w programach TRNSYS i Audytor OZC.

Rozdział siódmy zawiera zestawienia wyników modelowania matematycznego, prezentowane głównie w formie graficznej, wraz z odniesieniem do wyników badań eksperymentalnych. W przypadku systemu grzewczego istotna jest informacja o poziomach rozbieżności w uzyskanych wynikach – do 34% przy obserwacji w skali doby oraz do 11% w ujęciu sezonowym. Dla gruntowego wymiennika ciepła, zaprezentowano efekt wpływu nachylenia osi przewodu rurowego oraz kierunku przepływu powietrza na transport ciepła i uzyskiwane wartości temperatury powietrza na wylocie wymiennika. W ujęciu sezonowym wyznaczono udział procentowy ilości ciepła dostarczonego do powietrza w wymienniku w całkowitym zapotrzebowaniu na ciepło (niezbędne do osiągnięcia zadanej temperatury w powietrzu nawiewanym). W ramach rozdziału przedstawiono również wyniki analizy sprawności rekuperatora w układzie odzysku ciepła z powietrza wywiewanego, rozkładu koncentracji CO<sub>2</sub> i częstości występowania określonych jej zakresów oraz zmienności temperatury powietrza jako głównego parametru do oceny komfortu cieplnego w trzech wybranych pomieszczeniach (gabinie, pokoju dziennym i sypialni). Należy podkreślić, że rezultaty badań zaprezentowane w tym rozdziale poddano każdorazowo interesującej i merytorycznej dyskusji.

W rozdziale ósmym przeprowadzono optymalizację wybranych parametrów projektowych i operacyjnych systemów technicznych wyposażenia budynku. Jej celem było minimalne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania budynku oraz minimalne zapotrzebowanie na sumaryczną ilość energii termicznej (ogrzewanie, chłodzenie) i energii elektrycznej do napędu wentylatora przetłaczającego powietrze przez gruntowy wymiennik ciepła. Do zmiennych optymalizacyjnych włączono poziom szczelności budynku, efektywność rekuperatora do odzysku ciepła z powietrza wywiewanego, objętościowy strumień powietrza wentylacyjnego, długość gruntowego wymiennika ciepła, średnią głębokość jego posadowienia i nachylenie wzdłużnej osi oraz strategię sterowania



przepływem powietrza przez gruntowy wymiennik ciepła. Każdą z w/w zmiennych cechowała wielowariantowość (od 2 do 5 wariantów), co wykorzystano przy budowie macierzy wariantów dopuszczalnych, zaprezentowanej w rozdz. 8.3. W wyniku analizy wskazano wariant zapewniający uzyskanie minimalnych wartości obydwu parametrów przyjętych za cele procesu optymalizacji.

Główną część rozprawy kończy rozdział dziewiąty, gdzie zamieszczono wnioski i wskazano kierunki dalszych prac nad poprawą efektywności energetycznej systemów technicznego wyposażenia i komfortu klimatycznego w rozpatrywanym obiekcie.

Spis literatury zawiera 149 pozycji, przy czym pozycje [135]-[149] nie zostały przywołane w głównym tekście rozprawy.

### 3. Ocena rozprawy

- 1) Podjęta tematyka jest ważna i aktualna. Poprawa efektywności energetycznej systemów wyposażenia technicznego w budownictwie mieszkaniowym, przy jednoczesnym dopełnieniu warunków komfortu klimatycznego dla użytkowników, gwarantuje oszczędności w eksploataowaniu źródeł energii i ma pozytywny wydźwięk środowiskowy.
- 2) Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest spójna tematycznie, ma wartość badawczą, poznawczą i użyteczną.
- 3) Opracowano modele obliczeniowe zapotrzebowania na energię do ogrzewania/chłodzenia budynku oraz analizy transportu ciepła i oporów hydraulicznych w gruntowym wymienniku ciepła. Obliczenia przeprowadzono w autorskim programie przygotowanym w środowisku VBA (*Visual Basic for Applications*).
- 4) Na uwagę zasługują systematyczne badania eksperymentalne systemów wyposażenia technicznego budynku, przeprowadzone w rzeczywistych warunkach ich eksploatacji. Zbiór danych, zgromadzony w okresie 6 lat, posłużył do weryfikacji wyników modelowania matematycznego.
- 5) Zidentyfikowano takie warunki posadowienia i eksploatacji rurowego gruntowego wymiennika ciepła, dla których niezbędna jest korekta stosowanej obecnie metodyki jego projektowania.
- 6) W ramach rozwiązania problemu optymalizacyjnego, dokonano wielokryterialnej analizy mającej na celu minimalizację zapotrzebowania na energię, uwzględniając ogrzewanie i chłodzenie budynku oraz pobór energii elektrycznej do napędu wentylatora przetłaczającego powietrze przez gruntowy rekuperator.

### 4. Uwagi o charakterze dyskusyjnym

- 1) s. 19: W równaniu (1.3) występuje parametr  $T_u$  opisany jako „intensywność turbulencji”. Zabrakło informacji, jak zdefiniowany jest ten parametr i skąd zaczerpnąć jego wartość.
- 2) W procesie weryfikacji własnego modelu obliczeniowego wykorzystano wyniki symulacji wykonanych w programie TRNSYS. Wątpliwości budzi zasadność wykorzystania tych wyników, jeśli „w przypadku symulacji (...) wykorzystano budynek

o zbliżonych parametrach geometrycznych do budynku badanego. W obliczeniach nie uwzględniono pracy wymiennika gruntowego, a sprawność temperaturową odzyskiwania ciepła z powietrza wentylacyjnego przyjęto z zerową wartością.”

- 3) s. 74: Jeśli  $R$  w równaniu (5.9) oznacza uniwersalną stałą gazową, to jednostka masy cząsteczkowej jest błędna. Sprawdzenia wymaga również jednostka parametru  $C_l$ , bądź wzór opisujący ten parametr – podstawienie  $C_l$  do równania (5.8) nie pozwoli przy obecnej jednostce uzyskać ciśnienia różnicowego wyrażonego w [Pa].
- 4) s. 110: Co było przesłanką do przyjęcia założenia  $Q_{HC,nd}=10 \cdot A_f$  [W]?
- 5) s. 157: W ramach rozdz. 8.3 przedstawiono macierz wariantów dopuszczalnych, ale zabrakło informacji, w jaki sposób ją wyznaczono.
- 6) s. 115: W równaniu opisującym rozkład temperatury gruntu na danej głębokości (r-nie (6.36)) występuje „przesunięcie fazowe temperatury gruntu i temperatury powietrza -  $\tau_o$  [dni]” – w jaki sposób ustala się ten parametr?

## 5. Pozostałe uwagi do pracy

- 1) s. 11 (i inne miejsca w pracy): ciepło nie może być wyrażane w [W].
- 2) s. 20 (opis wielkości z równania (1.6): praca nie może być wyrażona w [W].
- 3) liczne miejsca w pracy: wyrażanie przyrostów/zmian temperatury w [°C] (zamiast w [K])
- 4) s. 29: „współczynnik przenikania ciepła z otoczenia do gruntu” – powinno być „współczynnik przejmowania ciepła...”
- 5) s. 41: w końcowej części zdania „Gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od temperatury gruntu otaczającego wymiennik, powietrze ogrzewa się, gdy jest niższa – ochładza” jest pomyłka (powinno być „... gdy jest wyższa – ochładza”).
- 6) s. 50: „jakość ciepła” – zapis jest merytorycznie niepoprawny, ponieważ „ciepło” nie ma formy substancjalnej. Ciepło jest jedynie formą transportu energii.
- 7) s. 65: niespójność oznaczenia jednostkowych, metabolicznych zysków ciepła w równaniu (5.1) i opisie wielkości pod tym równaniem.
- 8) s. 68: w zapisie „stała całkowania dla warunków brzegowych...” jest błąd edytorski w oznaczeniu  $S_{CO,0}$  (powinno być  $S_{CO2,0}$ ).
- 9) s. 80: dokładność bezwzględna temperatury niepoprawnie zapisano w procentach.
- 10) s. 90: jednostką mocy nie jest  $[W/m^2]$  (jest to jednostka gęstości strumienia energii/ciepła).
- 11) s. 109: błąd edytorski w równaniu (6.6) – w nawiasie zamiast „ $0,5 \cdot \Phi_m$ ” powinno być  $0,5 \cdot \Phi_{mt}$ .
- 12) s. 109: zapis składników w pierwszym nawiasie równania (6.7) wymaga weryfikacji (obecny zapis nie dostarczy wyniku w [W]).
- 13) s. 108-109: brak spójności w oznaczeniu „zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania lub chłodzenia budynku w danym kroku czasowym” na Rys. 6-2 i w równaniach (6.8) - (6.12).
- 14) s. 110: współczynnik „ $h_{ms}$ ” nie powinien być określany „współczynnikiem przenoszenia ciepła” (jest to współczynnik przejmowania ciepła).



- 15) s. 113: błąd w oznaczeniu „współczynnika lepkości kinematycznej” nad równaniem (6.29) (powinno być  $\mu_k$ ). Ponadto, sformułowanie powinno przyjąć zapis „współczynnik kinematyczny lepkości”.
- 16) s. 117: *NTU (number of transfer units)* nie powinno być opisane jako „ilość wymian ciepła” (parametr należy interpretować jako liczbę jednostek wymiany ciepła).
- 17) s. 118: niespójność oznaczenia oporów miejscowych w równaniu (6.52) i w zapisie poprzedzającym to równanie.
- 18) s. 125: oznaczenia entalpii właściwej powietrza na wlocie/wylocie gruntowego wymiennika ciepła, zastosowane w równaniu (7.1), nie są spójne z oznaczeniami tej funkcji stanu w wykazie symboli (s. 11). To samo dotyczy symbolu strumienia masy powietrza. Ponadto, równanie (7.1) powinno być opatrzone komentarzem, że w przypadkach schładzania powietrza do temperatury niższej od temperatury punktu rosy, należy w równaniu operować strumieniem masy powietrza suchego i entalpiami odniesionymi do masy gazu suchego (wyznaczonymi analogicznie do (6.40)).
- 19) Rys. 7-16 ÷ 7-21: niespójność jednostek przedstawionych na osiach Y wykresów i w legendach tych wykresów.
- 20) s. 158-161: niezrozumiałe jest operowanie w rozdz. 8.5 określeniem „grupy A” (w pracy nie ma informacji o podziale zmiennych decyzyjnych na grupy).
- 21) s. 160: w tabeli (Rys. 8-7) zestawiono wyniki obliczeń dla serii wariantów 8-10, a zatem informacja o „wariantach serii 8÷9”, zawarta w akapicie poprzedzającym tabelę i w podpisie Rys. 8-7, jest nieprawidłowa.
- 22) Rozdz. 8: w dyskusji wyników obliczeń pominięto wyniki uzyskane dla wariantów 11 i 12.

Szata graficzna pracy nie budzi zastrzeżeń. Uchybieniem jest natomiast brak przywołania w głównym tekście większości rysunków i tabel zamieszczonych w rozprawie. Poza tym podpisy tabel powinny być umieszczane nad tabelami. Nieuzasadnione jest w moim przekonaniu uznanie wszystkich tabel w rozdz. 8 za rysunki (na co wskazują podpisy).

Zastosowana nomenklatura techniczna nie budzi zastrzeżeń, lecz w pracy dostrzega się usterki literowe (nawet w tytułach rozdziałów). Występują też uchybienia w zakresie składni zdań - wybrane przykłady podaję poniżej:

- s.26: „*Będą zatem parametryzować dostępne z poziomu użytkownika budynku czynniki kształtujące komfort klimatyczny i zużycie energii w budynku.*” (zdanie pozbawione podmiotu, rozpoczynające trzeci akapit);
- s.28: „*Są rozwiązaniem, może nie powszechnie, ale chętnie stosowanym szczególnie w budownictwie energooszczędnym.*” (zdanie pozbawione podmiotu);
- s.39: „*Zaizolowane otulinami z pianki polietylenowej o grubości od 12 do 30 mm.*”.

Na stronie 81 ostatnie zdanie pierwszego akapitu zostało powtórzone pod tabelą 5-8. Na stronach 77 i 78 są widoczne „pozostałości” po wcześniejszym sposobie identyfikowania przywoływanych pozycji literatury. Ponadto w tekście pracy dostrzega się nieliczne

sformułowania potoczne typu „zużycie energii energetycznej” (s. 30), „wbudowany krzyż pomiarowy” (s. 43), czy „zbadane liczebności temperatury” (s.152). W spisie literatury autorów publikacji [7], [113] i [139] ukryto pod inicjałami.

Osobowa forma wypowiedzi (np. s. 16, 75, 154) nie powinna mieć miejsca w pracach naukowych.

Chciałbym w tym miejscu podkreślić, że w moim przekonaniu uwagi edytorskie nie obniżają merytorycznej wartości opiniowanej rozprawy, a jedynie utrudniają śledzenie jej treści.

## 6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jacka Miklasa pt.: „*Wpływ parametrów projektowych i operacyjnych systemów wyposażenia technicznego na zużycie energii i komfort klimatyczny w budynku energooszczędnym*” zawiera rozwiązanie sformułowanego problemu badawczego, ważnego w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Zrealizowany zakres prac, jak również dyskusja uzyskanych wyników, potwierdza gotowość Autora do prowadzenia badań naukowych.

Do głównych osiągnięć Autora zaliczam:

- podjęcie zadania badawczego ważnego w kontekście projektowania i eksploatacji systemów wyposażenia technicznego w budownictwie mieszkaniowym,
- opracowanie metodyki prowadzenia badań systemów w rzeczywistych warunkach ich eksploatacji,
- prowadzenie długookresowych badań eksperymentalnych,
- opracowanie algorytmów obliczeniowych, których funkcjonalność zweryfikowano wynikami własnych badań eksperymentalnych,
- wykonanie wielokryterialnej oceny wpływu wybranych parametrów projektowych i operacyjnych systemów wyposażenia technicznego na zużycie energii i komfort klimatyczny w budynku.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Jacka Miklasa spełnia wymagania określone w art. 186 ust. 1 pkt 5 (ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) i wniosuję o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Uwzględniając kompleksowość przeprowadzonych badań, wnikliwą analizę wyników modelowania matematycznego i badań eksperymentalnych (przeprowadzonych w okresie sześciu lat), konstruktywne wnioski oraz ich użyteczny charakter, wniosuję o wyróżnienie pracy.