

**Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski**  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Instytut Energetyki Przemysłowej  
Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 3  
60-965 Poznań

Poznań, 22 lipca 2021 r.

## RECENZJA

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Tokarczyka na temat Modelowanie akumulatora ciepła z dynamicznym rozładowaniem jako źródła energii w elektryczno-wodnym układzie ogrzewania budynku**

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Jarosława Tokarczyka stanowi pismo z dnia 22.06.2021 r. Prof. dra hab. inż. Stanisława M. Rybickiego dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej.

Praca zawarta jest na 70 stronach i jest podzielona na 10 rozdziałów poprzedzonych: spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, a w zakończeniu bibliografią liczącą 76 pozycji literaturowych związanych z tematem pracy. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Dawid Taler.

#### **1. Uwagi wstępne**

Ochrona klimatu w procesie pozyskaniu energii w celach ogrzewania różnych pomieszczeń wymaga stosowania nowoczesnych metod projektowania nowych urządzeń. Istotą pracy doktorskiej mgr inż. Jarosława Tokarczyka jest wykorzystanie nadmiarowej energii elektrycznej do magazynowania energii cieplnej w akumulatorach ciepła z dynamicznym rozładowaniem akumulatora w procesie ogrzewania pomieszczeń.

#### **2. Omówienie pracy**

Rozwój cywilizacyjny charakteryzuje rosnące zużycie energii elektrycznej i cieplnej ( wytwarzanej nie tylko z prądu elektrycznego lecz również za spalania gazu, węgla czy oleju ). Zarówno procesowi wytwarzania energii elektrycznej jak również cieplnej towarzyszy obciążenie środowiska szkodliwymi gazami ( dwutlenek węgla, dwutlenek siarki i inne ) i pyłami. Plany Unii Europejskiej zmierzają do wycofania kotłów gazowych, olejowych i węglowych wykorzystywanych do ogrzewania budynków mieszkalnych. Alternatywnym rozwiązaniem zmniejszającym obciążenie środowiska są akumulatory ciepła z dynamicznym rozładowaniem. Autor w swej pracy zajął się elektryczno-wodnym układem ogrzewania budynku mieszkalnego. Wybór tego rodzaju ogrzewania został poprzedzony szerokim przeglądem krajowej i zagranicznej literatury przedmiotu. Analiza możliwości zastosowania elektryczno-wodnego akumulatora ciepła pod względem sprawności jest niezwykle cenna w procesie optymalizacji procesu nagrzewania i ochładzania. Zamiana źródeł grzewczych opartych na spalaniu paliw stałych, gazowych i olejowych w budynkach w porównaniu z wykorzystaniem energii elektrycznej spowoduje zmniejszenie obciążenia środowiska pyłami i gazami szkodliwymi ( elektrownie wykorzystujące wspomniane paliwa stanowią mniejsze obciążenie środowiska niż suma lokalnych źródeł ciepła). Normy dopuszczalnych zanieczyszczeń powietrza a przede wszystkim ich przekraczanie stało się zatem impulsem do zwrócenia uwagi na inne sposoby ogrzewania budynków. Zatem praca doktorska mgr inż. Jarosława Tokarczyka wpisuje się w ten nowy trend. Jest to jeden z elementów zmniejszenia obciążenia środowiska. Polska na tle Unii Europejskiej oparła wytwarzanie energii elektrycznej na węglu, którego udział wynosił w 2019 roku 73,6%. Pozostała część w dużym wymiarze oparta jest na imporcie paliw takich jak gaz i

ropa naftowa ( wzrost o 60% w ciągu dekady ). Unia Europejska kładzie ponadto nacisk na wykorzystanie odnawialnych źródeł energii zmniejszających obciążenie środowiska.

W rozprawie doktorskiej Ewy Kozak-Jagięły została przeprowadzona analiza dotycząca zużycia energii w sektorze mieszkaniowym ( 40% energii przypada na sektor mieszkaniowy ) pokazuje podstawowe obszary jej zużycia, są to :

- ogrzewanie 63,6% w EU, 65,8% Polska,
- przygotowanie ciepłej wody użytkowej 14,8% w EU, 16,3% Polska,
- oświetlenie, urządzenia elektryczne 14,1%, w EU, 9,6% Polska.

Przedstawione dane wskazują kierunek działania dla zwiększenia udziału czystej energii pozwalającej na zmniejszenie klasycznych źródeł energii. Kierunek ten jest wyrażony w nowej strategii Unii Europejskiej z 2020 roku dotyczącej zrównoważonej gospodarki, gdzie głównym elementem jest rozdzielenie wzrostu gospodarczego od wykorzystania zasobów. Konsekwencją tego będzie istotne obniżenie emisji gazów cieplarnianych.

Rozwój technologiczny istotnie przyczynił się do obniżenia kosztów produkcji energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii powodując, że jest ona tańsza od energii wytwarzanej metodami konwencjonalnymi. Istotną rolę odgrywają dwa źródła jej pochodzenia, są to : energia pozyskana z wiatru i energia słoneczna.

Przeciwdziałanie ocieplaniu klimatu stanowi istotny element polityki klimatycznej realizowanej przez Unię Europejską. Elementem tej polityki jest wspieranie i promowanie nowych rozwiązań w ogrzewnictwie.

**Przykładem takiego rozwiązania jest przedstawiony w pracy elektryczno-wodny akumulator ciepła z dynamicznym rozładowaniem.** Autor w swej pracy przedstawił oryginalną propozycję akumulatora ciepła o uporządkowanej strukturze. Dla zbadania własności akumulatora w zmiennych warunkach pracy Autor zbudował stanowisko pomiarowe składające się z dwóch obiegów : elektrycznego ( akumulator ciepła, układ chłodzenia powietrzem ) i wodnego ( wymiennik lamelowy, instalacja centralnego ogrzewania ). Obydwa obiegi są zaopatrzone w aparaturę zasilająco-pomiarową pozwalającą na dynamiczne sterowanie. Oryginalna autorska konstrukcja akumulatora ciepła polega na umieszczeniu w zewnętrznej żaroodpornej obudowie ośmiu rur wypełnionych walcami ceramicznymi o średnicy równej wysokości. Uporządkowana struktura walców zapewnia niski spadek ciśnienia ( przepływ laminarny ) jak również cichą pracę akumulatora. Materiałem wypełnienia walców jest beton korundowy, który posiada wysoką gęstość i ciepło właściwe. Praca akumulatora nie powoduje wysokich naprężeń termicznych w ceramice co sprzyja trwałości wkładów ( brak zarysowań i pęknięć ).

Podstawowym parametrem charakteryzującym porowaty wkład ceramiczny jest pojemność cieplna a w tym ciepło właściwe ceramiki ( masy wypełniającej rdzeń akumulatora ), które Autor wyznacza metodą kalorymetryczną posługując się standardową aparaturą.

Akumulator ciepła omawiany przez Autora znajduje swe zastosowanie do ogrzewania pomieszczeń jak również ogrzewania budynków ( w tym przypadku akumulator znajduje się w oddzielnym pomieszczeniu – charakter hybrydowy ). Ważną zaletą hybrydowego akumulatora ciepła jest niskotemperaturowe ogrzewanie wodne. **Oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne Autora wpisuje się w plany Unii Europejskiej.**

Zalety autorskiego akumulatora ciepła są przedstawione w zestawieniu 5.1. Poza cechami konstrukcyjnymi uwagę zwraca wysoka pojemność cieplna akumulatora ( przy zwartej budowie ), możliwość ogrzewania pomieszczeń o dużej kubaturze jak również duża trwałość wynikająca z małych gradientów temperatury wypełnienia.

Sterowanie pracą akumulatora wymaga wyznaczenia równania różniczkowego uwzględniającego zmienne obciążenie w czasie jak również zmienne parametry termofizyczne. W rozdziale 5 Autor wyprowadza równania różniczkowe zmiany temperatury w obszarze wypełnienia ceramicznego jak również w obszarze powietrza uzupełniając je stosownymi warunkami początkowo – brzegowymi. Dla stałych wartości współczynników przewodzenia ciepła i gęstości równania można rozwiązać metodami analitycznymi co stanowi znakomitą podstawę do sprawdzenia stosowania metod różnicowych ( dobór kroku przestrzennego i czasowego ). Ustalenie podstawowych parametrów kroku czasowego i przestrzennego pozwala na otrzymanie wiarygodnych wyników rozwiązania równań uwzględniających nieliniowość współczynników.

Rozwiązania analityczne Autor przedstawia dla dwóch przypadków

- przy skokowej zmianie temperatury powietrza na wlocie do akumulatora ciepła,

- przy zmianie temperatury powietrza na wlocie do akumulatora ciepła, którą opisuje funkcja w postaci rampy. Rozwiązania analityczne, jak już wspomniano, służą Autorowi do oceny jakości stosowania czterech metod różnicowych ( są to : metoda jawna, metoda niejawna, metoda Cranka-Nicholsona i metoda MacCormac'a ) wyznaczania temperatury gazu i wkładu. Metody różnicowe charakteryzują się różną dokładnością wyznaczania temperatury gazu i ceramiki i dla przypadku nieliniowego są jedynymi metodami określania zmiennych temperatur w powietrzu i wypełnieniu. Autor szczegółowo opisał algorytmy wspomnianych metod różnicowych charakteryzujące się różnymi rzędami aproksymacji w czasie i przestrzeni. Skuteczność metody jawnej ( wymagającej spełnienia warunku Couranta-Friedrichsa-Levy'ego ) przedstawił autor na rys. 7.2. Rozwiązanie to odpowiada przypadkowi skokowej zmianie temperatury powietrza na wlocie do akumulatora od temperatury 600°C do temperatury 520°C; dokładność metody jawnej jest bardzo dobra. Drugim analizowanym przypadkiem jest wpływ temperatury wlotowej powietrza zmieniającej się najpierw skokowo od 0 do 100°C a następnie tempo wzrostu wynosi 0.25K/s aż do osiągnięcia temperatury 600°C. Również w tym przypadku wyznaczone przebiegi temperatury na wylocie z akumulatora ciepła wyznaczone metodą Cranka-Nicholsona w porównaniu z rozwiązaniami analitycznymi są bardzo dobre. ***Otrzymane wyniki stanowią bazę do przeprowadzenia symulacji dynamicznej pracy akumulatora ciepła dla danych rzeczywistych. Badania oryginalnej konstrukcji akumulatora ciepła mają szerokie zastosowanie w ogrzewnictwie.***

W praktyce spotyka się szereg różnych akumulatorów ciepła o różnym wypełnieniu dedykowanych do różnych procesów. Istotnym problemem staje się określenie liczby Nuselta i z niej wynikającego współczynnika przejmowania ciepła. W punkcie 8.1 Autor przedstawił szereg formuł empirycznych. Dla złoża usypanego przypadkowo zawierającego elementy kuliste, cylindryczne, sześciennie, pierścienie Raschig'a, siodła Berl'a korzysta się z wzoru Whitaker'a obejmującego również złoża usypane przypadkowo zawierające pęczki rur umieszczone szachownicowo. Autor uwzględnił rodzaj płynu przepływającego przez złożo, mający wpływ na współczynnik przejmowania ciepła. W zastosowaniach dąży się do tworzenia złóż uporządkowanych. Określeniu liczby Nuselta dla złoża uporządkowanego Autor poświęcił rozdział 8.2. Spośród wielu prac można wyróżnić prace D. Talera.

Specyficzna konstrukcja autorskiego akumulatora ciepła charakteryzująca się złożonym układem przepływowo-ciepłnym wewnątrz, wymaga dla określenia współczynnika przejmowania ciepła zastosowania ***oryginalnego podejścia*** opisanego w pracy, rozdział 9. W początkowym przedziale czasu, rys.9.3 występują różnice pomiędzy pomierzonym a policzonym przebiegiem temperatury powietrza na wlocie do akumulatora. Różnice te wynikają z przybliżonego modelu wymiany ciepła w cylindrycznych i stalowych elementach wypełnienia.

### 3. Wnioski

Autor wyprowadził równanie różniczkowe opisujące zachowanie się akumulatora ciepła w stanach rozładowania z uwzględnieniem nieliniowych własności termofizycznych ceramiki. Rozwiązanie równań nieliniowych dla masy wkładu i powietrza wymagało zastosowania metod różnicowych. Dobór kroku czasowego i przestrzennego Autor uzyskał z porównania rozwiązania zagadnienia liniowego i uzyskanego metodami różnicowymi. Otrzymane wyniki rozkładu czasowego temperatury powietrza na wylocie z akumulatora dla metody analitycznej i metod różnicowych są bardzo dobre.

Najważniejsze zalety akumulatora z dynamicznym rozładowaniem to:

- wykorzystanie taniej nadmiarowej energii elektrycznej ( nocnej lub z odnawialnych źródeł energii ),
- możliwość wykorzystania zmiennej pojemności cieplnej wkładu (nagrzewanie stałej masy do maksymalnej temperatury 600°C lub zmniejszenie masy akumulatora lub też nagrzewanie do niższej temperatury),
- możliwość sterowania procesu rozładowania w zależności od potrzeb ogrzewania pomieszczeń.

### 4. Podsumowanie

Praca doktorska mgr inż. Jarosława Tokarczyka przedstawia oryginalną konstrukcję akumulatora ciepła z dynamicznym rozładowaniem. Przedstawiony akumulator ma zastosowanie w ogrzewnictwie w kontekście

zmniejszenia obciążenia środowiska, gdyż do jego naładowania wykorzystuje się nadwyżkę energii elektrycznej w okresie nocnym jak również istnieje możliwość korzystania z energii z odnawialnych źródeł energii.

Przeprowadzone badania Doktoranta mgra inż. Jarosława Tokarczyka jednoznacznie świadczą o Jego wysokich umiejętnościach do prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie, zaś wnioski końcowe pracy wskazują na **nowe kierunki** badań służące rozwiązaniu szeregu problemów poznawczych i aplikacyjnych.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgra inż. Jarosława Tokarczyka spełnia wymogi obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie mgra inż. Jarosława Tokarczyka do publicznej obrony recenzowanej pracy.

*Michał Kiedrzycki*