

## ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. MAGDALENA MŁYNARCZYK

### **BADANIA PORÓWNAWCZE METOD OCENY EFEKTYWNOŚCI CHŁODZENIA MATERIAŁÓW ZAWIERAJĄCYCH ZWIĄZKI ZMIENNOFAZOWE, W ZALEŻNOŚCI OD TYPU ZASTOSOWANYCH SYMULATORÓW CIEPLNYCH**

#### **STRESZCZENIE**

W czasie aktywności fizycznej, jak również w spoczynku, w organizmie człowieka produkowane jest ciepło, które w warunkach zapewniających komfort, powinno być w całości oddane do otoczenia. Na skutek utrudnionej wymiany ciepła, w organizmie człowieka może dojść do jego akumulacji, co skutkuje wzrostem temperatury wewnętrznej. Jedną z opracowanych koncepcji, dotyczących ochrony organizmu człowieka, jest stosowanie elementów odzieży zawierających związki zmiennofazowe (PCM – ang. *Phase Change Materials*), które pozwalają na odbiór ciepła, przez co umożliwiają jego schłodzenie. Akumulacja ciepła w PCM następuje w czasie zmiany fazy ze stałej na ciekłą.

Analiza piśmiennictwa wykazała wzrost zainteresowania wykorzystaniem właściwości odbierania ciepła przez materiały zawierające związki zmiennofazowe (PCM). Wyniki badań oceny efektywności działania materiałów z PCM nie są jednak w piśmiennictwie jednoznaczne. Obecnie badania prowadzone są na różnych urządzeniach badawczych (symulatorach cieplnych) oraz z wykorzystaniem różnych procedur badawczych. Brak ujednoczonych: metodyki badań oraz wskaźników oceny efektywności działania materiałów z PCM, uniemożliwia bezpośrednio porównywanie uzyskiwanych wyników.

Celem rozprawy doktorskiej była ocena efektywności działania materiału zawierającego związki zmiennofazowe (PCM), w badaniach z zastosowaniem różnych symulatorów cieplnych oraz opracowanie takiej procedury prowadzenia badań, która umożliwi standaryzację wyników uzyskanych na różnych symulatorach.

Do badań wybrano dwa materiały zawierające PCM, różniące się głównie wartością entalpii przemian fazowych oraz materiał referencyjny bez elementów chłodzących. We wstępnych badaniach przeprowadzono pomiary ich podstawowych właściwości, takich jak: entalpia przemian fazowych ( $\Delta H$ ), kąt zwilżania (DSA) oraz gęstość zaaplikowania PCM

w materiale. Dokonano analizy stosowanych metodyk badania oceny efektywności działania materiałów z PCM uwzględniających: stałą wartość strumienia strat ciepła z urządzenia badawczego, stałą temperaturę powierzchni pomiarowej, jak również zastosowanie symulacji odpowiedzi fizjologicznych (z wykorzystaniem modelu fizjologicznego). Badania z wykorzystaniem jednosegmentowego symulatora Torso pozwoliły na zaproponowanie jednej metody prowadzenia badań na pozostałych symulatorach cieplnych. Wskazana metoda prowadzenia badań zakładała stałą wartość temperatury powierzchni pomiarowej.

Badania zasadnicze, w warunkach nieizotermicznych i izotermicznych, prowadzono w różnych układach doświadczalnych, z zastosowaniem czterech typowych symulatorów cieplnych: model sztucznej skóry, dwa pełnowymiarowe manekiny termiczne: Diana i Newton oraz jednosegmentowe urządzenie Torso. W przypadku modelu sztucznej skóry oraz Torso, badane materiały pokrywały całą powierzchnię pomiarową, natomiast w przypadku manekinów termicznych, znajdowały się na segmentach *plecy* (ze względu na możliwość najlepszego dopasowania materiału do powierzchni). Pola powierzchni pomiarowych dla wymienionych symulatorów cieplnych mieściły się w zakresie od 0,04 m<sup>2</sup> do 0,43 m<sup>2</sup>. Dla wyeliminowania zmiennej, związanej z polem powierzchni zastosowanego materiału z PCM, do analiz wyznaczono wartość gęstości strumienia strat ciepła dla poszczególnych symulatorów.

Do oceny efektywności działania materiałów ze związkami zmiennofazowymi zaproponowano dwa wskaźniki: ilość zakumulowanego ciepła wyznaczoną na podstawie analizy odpowiedzi symulatorów (za pomocą programu Matlab® wyposażonego w pakiet Spline Toolbox) oraz zmierzony czas działania PCM.

W zależności od zastosowanego symulatora cieplnego, uzyskano różne wartości wskaźników oceny efektywności działania materiałów z PCM. Wykazano, że ilość zakumulowanego ciepła obserwowana dla pełnowymiarowych manekinów termicznych była niższa, zaś dla jednosegmentowego symulatora Torso, znacząco wyższa od tej wyznaczonej na modelu sztucznej skóry.

Jako czynniki wpływające na obserwowane różnice w odpowiedziach symulatorów zidentyfikowano zarówno czynniki konstrukcyjne i technologiczne (takie jak: moc cieplną symulatora, sposób działania układu regulacji temperatury powierzchni symulatora, częstość rejestracji danych, stopień dopasowania badanej próbki materiału

do powierzchni pomiarowej symulatora), jak i czynnik ludzki (wybór procedury oraz staranność przeprowadzenia badań).

Na podstawie analizy porównawczej wyników, z obliczeń teoretycznych i z przeprowadzonych pomiarów, zaproponowano model sztucznej skóry jako symulator referencyjny (cechujący się wartościami najbardziej zbliżonymi do wartości teoretycznych). Wyznaczono także zależność pomiędzy wynikami uzyskanymi na urządzeniu referencyjnym, a uzyskanymi na pozostałych, wykorzystanych w badaniach, symulatorach cieplnych.

Dodatkowo, w celu zbadania wpływu odzieży z materiałem PCM na odpowiedź człowieka oraz porównanie ich z wynikami uzyskanymi na symulatorach cieplnych, przeprowadzono badania z udziałem grupy ochotników (*case study*). W badaniach dokonano analizy zmian odczuć cieplnych, średniej temperatury skóry ochotników oraz temperatury na zewnętrznej powierzchni materiałów. Otrzymane wyniki potwierdziły długość czasu działania (chłodzenia) materiałów z PCM, wyznaczoną w badaniach z wykorzystaniem symulatorów cieplnych.

Uzyskane rezultaty potwierdziły trafność wyboru, dla osiągnięcia zakładanego celu, procedury prowadzenia badań materiałów z PCM z wykorzystaniem różnych symulatorów cieplnych w trybie stałej temperatury powierzchni pomiarowej. Zarekomendowano również prowadzenie badań w warunkach nieizotermicznych, które pozwalają na lepsze odwzorowanie rzeczywistych warunków późniejszego użytkowania badanych materiałów.

Przeprowadzone badania z użyciem różnych symulatorów cieplnych oraz analiza otrzymanych wyników, pozwoliły na jakościowe i ilościowe określenie różnic, w wynikach oceny efektywności działania materiałów z PCM. Na tej podstawie opracowano zależności pomiędzy ilością zakumulowanego w materiałach z PCM ciepła, a maksymalną mocą nominalną symulatora cieplnego.

Przedstawione wyniki będą wkładem w światową dyskusję o potrzebie ujednoczenia procedury badawczej oceny efektywności działania materiałów z PCM, problemu bardzo istotnego zarówno dla celów badawczych, jak i do celów praktycznych.