

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Młynarczyk**  
**pt. „Badania porównawcze metod oceny efektywności chłodzenia materiałów**  
**zawierających związki zmiennofazowe, w zależności od typu zastosowanych**  
**symulatorów cieplnych”**

Recenzję opracowano na podstawie pisma CIOP-PIB nr TP-477/2394/2017 z dnia 07.06.2017 r.

**1. Charakterystyka rozprawy**

Przedłożona do recenzji *Rozprawa doktorska* wraz z załącznikami obejmuje 195 stron. Rozprawa została podzielona na 6 rozdziałów poprzedzonych:

- Podziękowaniami,
- Streszczeniem w języku polski,
- Streszczeniem w języku angielskim (*Abstract*),
- Zestawieniem oznaczeń i indeksów.

Ponadto po ostatnim (szóstym) rozdziale umieszczono:

- Bibliografię,
- Spis ilustracji,
- Spis tabel,
- Załączniki.

W *Rozdziale 1* zawarto krótkie *Wprowadzenie*, w którym omówiono przesłanki podjęcia tematyki badań, podkreślając brak jednolitych metod i procedur oceny materiałów zawierających związki zmiennofazowe. Następnie dokonano przeglądu literatury dotyczącej zagadnień będących tematyką badań przedstawionych w *Rozprawie*. *Rozdział 2* zawiera cel naukowy rozprawy oraz hipotezy badawcze.

Kolejne rozdziały poświęcone są badaniom wykonanym w ramach realizacji *Rozprawy doktorskiej*. W *Rozdziale 3* omówiono badania podstawowych właściwości materiałów ze związkami zmiennofazowymi. Materiały te wykorzystano w toku realizacji wszystkich prac badawczych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

*Rozdział 4* zawiera szczegółowy opis badań materiałów ze związkami zmiennofazowymi za pomocą czterech symulatorów cieplnych. Z kolei w *Rozdziale 5* przedstawiono badania użytkowe z udziałem ochotników.

*Rozdział 6* zawiera *Podsumowanie*, *Wnioski* oraz *Kierunki dalszych badań*.

*Bibliografia* obejmuje 96 pozycji, wśród których znajdują się: artykuły naukowe opublikowane w krajowych i międzynarodowych czasopismach naukowych, monografie naukowe, referaty prezentowane podczas krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych oraz normy krajowe i międzynarodowe.

W Załącznikach umieszczono karty badanych materiałów, opis zastosowanych procedur badawczych, szczegółowe wyniki instrumentalnych badań materiałów ze związkami zmiennofazowymi przeprowadzonych na różnych symulatorach cieplnych oraz wyniki badań subiektywnych wykonanych z udziałem ochotników. Łącznie *Rozprawa* zawiera 7 załączników.

*Rozprawa doktorska* została napisana starannie, zrozumiale, poprawnym językiem. Redakcja techniczna rozprawy, jakość tabel i rysunków nie budzą zastrzeżeń. Układ rozprawy jest poprawny, konsekwentny, bardzo logiczny, pozwala stopniowo zagłębiać się w prezentowane zagadnienia oraz uzyskane wyniki badań.

## 2. Merytoryczna ocena rozdziałów rozprawy doktorskiej

### Rozdział 1 - Wprowadzenie

Rozdział ten niemal w całości poświęcony jest przeglądowi literatury naukowej dotyczącej zagadnień, będących tematem badań w niniejszej *Rozprawie*. Na początku rozdziału znajduje się jednostronicowe *Wprowadzenie*, w którym Doktorantka uzasadnia potrzebę podjęcia badań porównawczych metod oceny efektywności chłodzenia materiałów zawierających związki zmiennofazowe. Pomimo prac zainicjowanych przez komitet techniczny CEN/TC 248 Europejskiej Komisji Standaryzacji, nie dopracowano się ujednoczonych procedur badawczych pozwalających na ocenę efektywności działania związków zmiennofazowych.

Przegląd literatury obejmuje tematykę związków zmiennofazowych, ich zastosowania w wyrobach włókienniczych i odzieżowych, symulatorów cieplnych oraz metod badania efektywności działania związków zmiennofazowych. Doktorantka definiuje związki przemiany fazowej (*PCM – Phase Change Materials*), sposób ich działania oraz parametry charakteryzujące te związki. Na podstawie licznych publikacji omówiono zastosowanie związków przemiany fazowej w materiałach włókienniczych i odzieży, a także różne możliwości wprowadzania tych związków do włókien, tekstyliów i odzieży. Następnie omówione zostały symulatory cieplne stosowane w ocenie procesów wymiany ciepła przez wyroby włókiennicze. Doktorantka opisuje 3 typy symulatorów: model skóry, jednosegmentowe manekiny termiczne oraz pełnowymiarowe manekiny termiczne odwzorowujące kształt ciała człowieka. Doktorantka omawia dotychczas publikowane badania wykonane z wykorzystaniem ww. symulatorów, w tym także badania związków przemiany fazowej. W tej części *Rozprawy* zabrakło nawiązania do innych symulatorów cieplnych stosowanych dość powszechnie w badaniach procesów wymiany ciepła przez materiały włókiennicze, jak np. przyrządów Alambeta i Thermo Labo II. Istnieje dużo publikacji opartych o wyniki z obu przyrządów. Być może należałoby sięgnąć po te przyrządy w dalszych badaniach związków zmiennofazowych. Z uwagi na fakt, że oba przyrządy są stosowane w instytucjach naukowych zajmujących się włókiennictwem na całym świecie, warto byłoby potwierdzić lub zaprzeczyć ich przydatności w badaniach tekstyliów zawierających związki przemiany fazowej.

W dalszej części przeglądu literatury opisano badania podstawowych właściwości oraz efektywności działania związków zmiennofazowych. Z uwagi na dużą liczbę prac opublikowanych w tym temacie sporządzono zestawienie tabelaryczne wybranych prac z wykorzystaniem symulatorów cieplnych, z uwzględnieniem rodzaju symulatora cieplnego, warunków prowadzenia badań, trybu pracy, obiektu badań, zastosowanych związków przemiany fazowej oraz wyznaczanych wskaźników. Takie ujęcie pozwoliło bardzo przejrzysto usystematyzować najważniejsze dotychczasowe prace badawcze nad związkami

zmiennofazowymi. W podobny sposób (tabelaryczny) ujęto również najważniejsze prace badawcze nad związkami przemiany fazowej prowadzone z udziałem ochotników. W tym przypadku uwzględniono liczbę ochotników, warunki prowadzenia badań, procedurę badawczą, testowany obiekt oraz wyznaczone wskaźniki.

W *Podsumowaniu przeglądu literatury* Doktorantka jednoznacznie stwierdza, że przegląd literatury wykazał brak ujednoczonej metodyki prowadzenia badań materiałów oraz wyrobów ze związkami przemiany fazowej, zarówno przy wykorzystaniu symulatorów cieplnych, jak i z udziałem ochotników. Wniosek ten uważam za słuszny.

## **Rozdział 2 - Cel naukowy *Rozprawy* i teza pracy**

W tym rozdziale zdefiniowano cel *Rozprawy*, jakim jest: „... ocena efektywności działania materiału zawierającego związku zmiennofazowe (PCM), możliwego do zastosowania w odzieży ochronnej, w badaniach z zastosowaniem różnych symulatorów cieplnych oraz opracowanie takiej procedury prowadzenia badań, która umożliwi standaryzację wyników uzyskanych na różnych symulatorach.”

Postawiono dwie hipotezy badawcze:

- Rodzaj wykorzystanego symulatora cieplnego i zastosowana procedura badań wpływają na wyniki oceny efektywności działania materiałów zawierających związku zmiennofazowe.
- Zastosowanie jednolitej procedury prowadzenia badań tych materiałów na symulatorach cieplnych jest niezbędne dla właściwej interpretacji otrzymanych wyników oceny efektywności ich działania.

W dalszej części pracy Doktorantka podjęła próbę udowodnienia postawionych hipotez. W tej części *Rozprawy* przedstawiono także zakres wykonanych prac badawczych.

Tematyka *Rozprawy doktorskiej* jest interesująca i bardzo aktualna. Dotyczy metod oceny materiałów włókienniczych z udziałem materiałów przemiany fazowej. Koncepcja badań jest przemyślana i spójna. Zastosowane przyrządy pomiarowe są uznane w świecie i powszechnie stosowane do oceny procesów wymiany ciepła przez barierę cieplną, jaką stanowią materiały włókiennicze. Wykorzystane metody pomiarowe są znormalizowane, jednakże tylko w zakresie pomiarów standardowych materiałów włókienniczych. Próba znalezienia najlepszej metody oceny efektywności działania chłodzącego tekstyliów zawierających związku zmiennofazowe jest w pełni uzasadniona i pożądana.

## **Rozdział 3 - Badania podstawowych właściwości materiałów ze związkami zmiennofazowymi**

*Rozdział 3* poświęcony jest badaniom materiałów z udziałem związków przemiany fazowej. Zastosowano dwa materiały włókiennicze, różniące się między sobą rodzajem naniesionego związku zmiennofazowego. Ponadto, jako materiał referencyjny zastosowano materiał bazowy, który nie zawiera związków przemiany fazowej. Badania miały na celu sprawdzenie oraz uzupełnienie danych podanych przez producenta zastosowanych w badaniach materiałów zawierających PCM. Zakres badań obejmował wyznaczenie: temperatury przemian fazowych, energii i entalpii topnienia badanego PCM, gęstości zaaplikowanych związków zmiennofazowych w materiale, oporu cieplnego badanych materiałów oraz kąta zwilżania. Uzyskane wyniki były w większości zgodne z danymi podanymi przez producenta. Tylko w przypadku materiału PCM\_1 wartość entalpii topnienia była nieznacznie mniejsza od deklarowanej. Badania wykazały, że materiał PCM\_2 powinien

zakumulować ok. 30 % więcej ciepła niż PCM\_1, a masa powierzchniowa materiału PCM\_2 jest o ok. 15 % większa w stosunku do masy powierzchniowej materiału PCM\_1. Wartości, które uzyskano w wyniku przeprowadzonych pomiarów, zastosowano w dalszych analizach i obliczeniach, opisanych w następujących rozdziałach.

#### **Rozdział 4 – Badania materiałów ze związkami zmiennofazowymi z wykorzystaniem symulatorów cieplnych**

*Rozdział 4* zawiera opis badań instrumentalnych materiałów zawierających związki przemiany fazowej. W badaniach zastosowano 4 symulatory cieplne: model skóry, jednosegmentowe urządzenie Torso oraz wielosegmentowe manekiny termiczne: Diana i Newton. Wykorzystane w badaniach symulatory cieplne zostały szczegółowo opisane.

Analiza literatury wykazała, iż badania oceny efektywności działania materiałów zawierających związki zmiennofazowe prowadzone są na różnych urządzeniach badawczych według różnych procedur badawczych. Dlatego też, przed przystąpieniem do badań właściwych, przeanalizowano dostępne procedury pomiarowe. Wykonano badania wstępne zmierzające do wyboru jednej procedury badawczej. W badaniach wstępnych zastosowano symulator Torso analizując 5 procedur badawczych. Szczegółowe wyniki badań wstępnych przedstawiono w Załączniku II. Na podstawie analizy uzyskanych danych stwierdzono, iż najbardziej odpowiednią metodą oceny efektywności działania materiałów z PCM, możliwą do zastosowania na wszystkich ww. symulatorach, jest tryb pracy urządzenia ze stałą temperaturą powierzchni pomiarowej. W związku z powyższym w dalszych badaniach zastosowano tę właśnie procedurę, przyjmując temperaturę powierzchni urządzenia równą 34 °C, zbliżoną do temperatury skóry człowieka w warunkach odczuwania komfortu cieplnego.

W dalszej części przeprowadzono badania materiałów zawierających związki zmiennofazowe za pomocą 4 symulatorów cieplnych stosując procedurę stałej temperatury powierzchni urządzenia. Badania wykonano w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych. W trakcie badań analizowano średnią gęstość strumienia strat ciepła oraz przebieg zmian temperatury powierzchni urządzenia. Analizie poddano również czas działania związków przemiany fazowej. Do oceny efektywności działania wytypowanych materiałów ze związkami zmiennofazowymi wybrano dwa wskaźniki: ilość zakumulowanego ciepła oraz czas działania materiałów zmiennofazowych. Uzyskane wyniki wykazały, że zarówno dla badań prowadzonych w warunkach nieizotermicznych jak i izotermicznych, manekiny termiczne wskazywały niższe wartości zakumulowanego ciepła w stosunku do modelu skóry, natomiast urządzenie Torso znacznie zawyżało te wartości.

W tej części *Rozprawy* dokonano również obliczenia teoretycznych wartości ilości zakumulowanego ciepła. Wartości uzyskane w drodze obliczeń porównano z wynikami badań instrumentalnych. Analiza porównawcza wykazała, że wartości teoretyczne ilości zakumulowanego ciepła, w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych, były najbardziej zbliżone do wartości zmierzonych za pomocą modelu skóry i manekina termicznego Newton.

W przedstawionych badaniach wykazano także wpływ maksymalnej mocy nominalnej symulatora na analizowane wskaźniki oceny efektywności działania PCM: ilość zakumulowanego ciepła oraz czas działania.

Ostatecznie, jako symulator referencyjny zaproponowano model skóry, gdyż w przypadku manekina termicznego Newton stwierdzono niedokładne przyleganie próbki badanego materiału do powierzchni pomiarowej manekina, co może zakłócać przebieg procesów cieplnych. Decyzję tę uważam za słuszną i w pełni uzasadnioną. Dodatkowo za zastosowaniem modelu skóry przemawia fakt, że jest to przyrząd ogólnie dostępny,

powszechnie rozpoznany i stosowany. Tym samym istnieje możliwość rozpowszechnienia badań materiałów ze związkami zmiennofazowymi wg procedury badawczej oraz w oparciu o wskaźniki zaproponowane przez Doktorantkę. Zatem będzie można mówić o realnym wkładzie Doktorantki w rozwój nauki, szczególnie w zakresie badań nad związkami przemiany fazowej.

W mojej ocenie badania instrumentalne przedstawione w *Rozdziale 5* zostały prawidłowo wykonane i szczegółowo opisane. Wyniki badań przedstawiono w formie tabel i wykresów. Uzyskane wyniki zostały dokładnie przeanalizowane i omówione. Na ich podstawie wyciągnięto interesujące wnioski pozwalające na ukierunkowanie przyszłych badań nad materiałami z PCM. Przede wszystkim uzyskane wyniki i ich analiza pozwoliły na wytypowanie metody referencyjnej do badań materiałów tekstylnych z udziałem związków zmiennofazowych oraz wskaźników umożliwiających ocenę efektywności działania chłodzącego tych związków.

### **Rozdział 5 – Badania z udziałem ochotników**

W *Rozdziale 5* przedstawiono badania z udziałem ochotników. Ochotnicy użytkowali koszulki wykonane z badanych materiałów: materiału referencyjnego oraz z materiału z udziałem związków przemiany fazowej PCM<sub>2</sub>. Badania prowadzono w komorze klimatycznej w ustalonych warunkach mikroklimatu. Badania obejmowały pomiary warunków mikroklimatu pododzieżowego, subiektywną ocenę odczuć cieplnych podczas użytkowania koszulek oraz pomiary temperatury powierzchni koszulek za pomocą kamery termowizyjnej.

Badania z udziałem ochotników zostały szczegółowo opisane, wykonane prawidłowo, dokonano wszechstronnej oceny, zarówno subiektywnej jak i instrumentalnej, efektywności działania chłodzącego materiału ze związkami przemiany fazowej. Zarówno ocena subiektywna, jak również wyniki pomiarów instrumentalnych temperatury i wilgotności potwierdziły różnicę odczuć cieplnych pomiędzy badanymi koszulkami. Jednocześnie badania wykazały bardzo krótkotrwałe działanie związków przemiany fazowej.

### **Rozdział 6 – Podsumowanie i wnioski**

W *Rozdziale 6* Doktorantka dokonuje podsumowania całości prac wykonanych w ramach realizacji badań przedstawionych w *Rozprawie*. Doktorantka krótko przedstawia metodykę badań oraz uzyskane wyniki. Rozdział ten zawiera również wnioski oraz określenie kierunków dalszych badań. Najważniejszy wniosek dotyczy wytypowania modelu skóry jako symulatora referencyjnego do badań efektywności działania materiałów włókienniczych z udziałem związków zmiennofazowych. Wytypowanie symulatora referencyjnego jest bardzo ważne, gdyż badania niezbicie wykazały, że rodzaj symulatora cieplnego wpływa na wartości wskaźników oceny efektywności działania materiałów ze związkami zmiennofazowymi. Jako wskaźniki oceny efektywności działania materiałów z PCM Doktorantka zaleca zastosowanie: ilości zakumulowanego ciepła oraz czasu działania PCM. Podsumowanie nie budzi zastrzeżeń. Przeprowadzone badania oraz uzyskane wyniki znalazły odzwierciedlenie we wnioskach końcowych.

Kierunki dalszych badań zostały zidentyfikowane prawidłowo. Szczególnie ważne wydaje mi się wykonanie badań dla większej liczby materiałów z udziałem związków przemiany fazowej oraz dla związków zmiennofazowych o większej efektywności działania chłodzącego. Ponadto za celowe uważam wykonanie badań porównawczych dla kilku modeli skóry, w celu potwierdzenia możliwości wykorzystania tego przyrządu jako przyrządu referencyjnego.

## Bibliografia

Analiza stanu wiedzy w oparciu o przegląd literatury jest bardzo ważnym aspektem prac naukowych. Wnikliwa analiza literatury fachowej pozwala na prawidłowe ukierunkowanie badań, przyjęcie odpowiedniej metodyki badań oraz krytyczną analizę uzyskanych wyników. Bibliografia stanowi skwantyfikowaną formę oceny wnikliwości dokonanego przeglądu stanu wiedzy. W przypadku recenzowanej *Rozprawy* analizę istniejącego stanu wiedzy oparto o 96 pozycji literatury. W tym są: monografie, artykuły naukowe, referaty naukowe i normy. Większość pozycji bibliograficznych stanowią pozycje angielskojęzyczne. Literatura jest bardzo aktualna, większość pochodzi z ostatniego dziesięciolecia. O tym, że Doktorantka na bieżąco śledziła literaturę naukową dotyczącą zagadnień związanych z tematyką rozprawy, świadczy fakt, że wśród pozycji bibliograficznych znalazła się pozycja opublikowana w bieżącym roku.

### 3. Uwagi szczegółowe

Tak, jak wspomniałam na początku, *Rozprawa* zredagowana jest starannie i prawidłowo pod względem językowym. Niemniej jednak znajdują się drobne nieprawidłowości:

- W *Rozprawie* Doktorantka wielokrotnie używa pojęcia: „model sztucznej skóry” do opisanego jednego z przyrządów stosowanych w badaniach. Jest to pojęcie nieprawidłowe. Wg normy nazywa przyrządu brzmi: „zaizolowana cieplnie pocąca się płyta”. W praktyce często używa się określenia potocznego. Jest to ogólnie przyjęte i akceptowane. Jednakże powinno to być określenie: „model skóry” lub „sztuczna skóra” (z ang. *skin model*), a nie „model sztucznej skóry”.
- Istnieje wątpliwość odnośnie rodzaju materiału włókienniczego poddanego badaniom. Doktorantka używa pojęcia „materiał bazowy” naprzemiennie z pojęciem: „tkanina bazowa/ tkanina poliestrowa”. Natomiast zdjęcia badanych materiałów sugerują, że materiałem bazowym jest raczej dzianina. Również w Tabeli 7 ( str. 50) użyto określenia: „dzianina”. Proponuję sprawdzenie rodzaju badanego materiału, przed opracowaniem przyszłych publikacji na bazie *Rozprawy*.

### 4. Wniosek końcowy

Reasumując przeprowadzoną analizę *Rozprawy doktorskiej* przedłożonej do recenzji stwierdzam, że badania przewidziane do realizacji wykonane zostały w pełnym zakresie, a postawiony cel pracy został osiągnięty. Uzyskane wyniki badań w pełni potwierdziły postawione hipotezy badawcze.

Doktorantka wykazała się znajomością obecnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem pracy, umiejętnością samodzielnego formułowania problemów badawczych, planowania i prowadzenia badań, w tym badań użytkowych z udziałem ochotników, analizy wyników badań oraz formułowania wniosków. Koncepcja badań jest dobrze przemyślana i konsekwentnie zrealizowana. Doktorantka ma świadomość, że liczba obiektów badań w przedstawionej dysertacji jest mała i nie pozwala na statystyczne opracowanie wyników w taki sposób, żeby uzyskane zależności można było uznać za statystycznie istotne. Dlatego też Doktorantka proponuje kierunki dalszych badań, między innymi uwzględniające większą liczbę obiektów badawczych.

Przedłożona do recenzji *Rozprawa doktorska* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest wytypowanie metody badawczej do oceny efektywności działania chłodzącego materiałów z udziałem związków zmiennofazowych. Dotychczasowe

badania nad działaniem materiałów zawierających związki przemiany fazowej prowadzone były w wielu instytucjach naukowych za pomocą różnych metod badawczych przy zastosowaniu różnych procedur badawczych. Jednakże nikt wcześniej nie dokonał porównania tych metod z punktu widzenia ich przydatności do oceny materiałów ze związkami zmiennofazowymi i nie wytypował metody referencyjnej. Zatem z tego punktu widzenia, badania przeprowadzone przez mgr inż. Magdalenę Młynarczyk należy uznać za oryginalne i stanowiące istotny wkład w rozwój nauki.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji *Rozprawa* mgr inż. Magdaleny Młynarczyk spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie o Stopniach i Tytułach i może być podstawą do ubiegania się przez Doktorantkę o uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska. Wnioskuje zatem do Rady Naukowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – PIB o dopuszczenie mgr inż. Magdaleny Młynarczyk do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie wnioskuje o wyróżnienie *Rozprawy doktorskiej* mgr inż. Magdaleny Młynarczyk. Za wyróżnieniem, w mojej ocenie, przemawiają następujące przesłanki:

- Bardzo aktualna tematyka badań, wpisująca się w obszary badań prowadzonych w renomowanych instytucjach naukowych na świecie,
- Istotne znaczenie uzyskanych wyników badań dla rozwoju nauki, zwłaszcza możliwość wdrożenia zaproponowanej metodyki jako metody referencyjnej oceny efektywności działania chłodzącego materiałów włókienniczych zawierających związki przemiany fazowej,
- Bardzo staranne opracowanie *Rozprawy doktorskiej*, w sposób logiczny i konsekwentny wprowadzający w zagadnienie oraz kolejne wyniki badań i ich analizę.

Olga Szustak