

Data: Wrocław, 05.04.2023
Autor: mgr inż. Paweł Płuszka
Promotor: dr hab. inż. Ziemowit Malecha, prof. uczelni
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Daniel Lewandowski

Tytuł: *Modelowanie numeryczne chłodziarki magnetokalorycznej - badanie wpływu właściwości termofizycznych płynu roboczego i struktury złoża regeneratora na przekazywanie ciepła.*

STRESZCZENIE

Obszarem badawczym, którego dotyczy rozprawa doktorska jest modelowanie zjawisk ciepłno-przepływowych występujących w chłodziarce magnetokalorycznej, ze szczególnym uwzględnieniem intensyfikacji wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym, a porowatym złożem materiału magnetokalorycznego. Prace badawcze rozwijano w dwóch głównych kierunkach, skupiając się na ocenie wpływu właściwości termofizycznych czynnika roboczego oraz ocenie wpływu różnych wariantów geometrii złoża porowatego.

Przed wykonaniem właściwych badań numerycznych opracowano odpowiednie modele matematyczne, stworzone w środowisku numerycznej mechaniki płynów (ang. *CFD – Computational Fluid Dynamics*). W obu przypadkach standardowe warunki brzegowe symulacji ciepłno-przepływowej rozszerzono o autorskie rozwiązania implementacji efektu magnetokalorycznego w równaniu zachowania energii. Model dwuwymiarowego niestacjonarnego przepływu płynu sprężonego z wymianą ciepła w domenie ciała stałego (ang. *CHT – Conjugated Heat Transfer*) został zastosowany do prezentacji sposobu działania systemu chłodziarki magnetokalorycznej oraz wykonania studiów dotyczących czynnika roboczego. Badania geometrii złoża porowatego oparto z kolei na modelu trójwymiarowego przepływu stacjonarnego w domenie ograniczonej do komponentu komory wypełnionej materiałem magnetokalorycznym.

Niestacjonarny model systemu chłodziarki został zbudowany na podstawie bliźniaczego eksperymentu wykonanego na stanowisku badawczym. Celem testów doświadczalnych było zebranie danych umożliwiających porównanie predykcji modelu z odpowiadającymi wartościami zmierzonymi. Korelację oparto na pomiarach temperatur w wybranych lokalizacjach po stronie zimnej oraz gorącej układu. Zbudowany model osiągnął akceptowalną dokładność przewidywania różnicy temperatur panującej między końcami układu w stanie ustalonym pracy układu.

Po walidacji nieustalonego modelu chłodziarki w kolejnym kroku zbadano wpływ własności termodynamicznych płynu roboczego na wydajność pracy układu. Wykonane symulacje były zgodne z procedurą Planowania Eksperymentu (ang. *DOE - Design of Experiment*), zwaną również analizą czynnikową. Strategia DOE polega na obserwacji odpowiedzi (różnica temperatur pomiędzy zbiornikami, moc chłodnicza dostępna w zbiorniku zimnym) systemu poprzez arbitralną manipulację niezależnymi zmiennymi wejściowymi (zwanymi czynnikami). Za czynniki przyjęto cztery podstawowe własności termofizyczne

każdego płynu roboczego: gęstość, ciepło właściwe, lepkość dynamiczna oraz przewodność cieplna. Analizę statystyczną wyników DOE wykonano w oparciu o wykresy wpływu czynników (ujęte w postaci pojedynczych efektów głównych oraz efektów pochodzących od interakcji dwóch lub więcej czynników), analizę wariancji ANOVA oraz równanie regresji liniowej, będącej matematyczną postacią relacji badanych czynników z wielkościami odpowiedzi. W rezultacie przeprowadzonych badań otrzymano informację zwrotną o sile wpływu każdej z własności na badane zmienne odpowiedzi.

Stacjonarny model przepływu trójwymiarowego wykorzystano do zbadania wpływu geometrii złoża magnetokalorycznego. Na etapie przygotowania modeli CAD złożów dążono do maksymalnego odwzorowania rzeczywistej struktury porowatej. Zakres rozważanych kształtów elementów złoża obejmował cząstki sferyczne, płaskie płyty zorientowane równoległe lub poprzecznie do głównego kierunku przepływu oraz elementy walcowe w dwóch wariantach orientacji. Wszystkie złoża poza ostatnim zostały ponadto sprawdzone w trzech wariantach rozmiaru elementów. Do ewaluacji złożów przyjęto metryki spadku ciśnienia, użytecznej mocy cieplnej wymienionej między płynem i złożem oraz stosunku użytecznej mocy cieplnej do mocy hydraulicznej pompy cyrkulacyjnej. Wszystkie trzy wielkości analizowano w formie charakterystyk zależnych od strumienia przepływu medium.

Główne wnioski płynące z wyników uzyskanych dla obu modeli są następujące.

1. Wysoka przewodność cieplna oraz niska gęstość to pożądane cechy płynu roboczego aby zmaksymalizować różnicę temperatur między zbiornikami. Wzajemne interakcje między czterema badanymi własnościami nie mają znaczenia – dominują efekty główne.
2. Dla dostępnej mocy chłodniczej wysokie wartości wszystkich badanych własności przyczyniały się do wzrostu odpowiedzi układu, najsilniej dla gęstości oraz ciepła właściwego. Zaobserwowano silnie nieliniowe efekty związane ze wzajemnymi interakcjami czynników.
3. Złoża cząstek sferycznych pozwoliły na osiągnięcie najwyższych wartości mocy cieplnej przy umiarkowanym spadku ciśnienia. Geometria poprzecznych walców stanowiła dobrą alternatywę dla sfer. Koncepcja poprzecznych płyt była rozwiązaniem o skrajnych metrykach – gwarantowała wymianę ciepła na poziomie złoża sferycznego kosztem najwyższych notowanych poziomów spadków ciśnienia. Geometrie wzdłużnych płyt i walców wykazały niższe wartości spadków ciśnienia oraz mocy cieplnej.
4. Podczas prototypowania chłodziarek magnetokalorycznych powinno szukać się propozycji geometrycznych wydłużających drogę oraz czas przebywania płynu w komorze złoża porowatego.

Zestaw rozwiniętych w tej pracy narzędzi CFD pozwolił na pozyskanie w możliwie niewielkim czasie szerokiej wiedzy inżynierskiej o charakterze pracy układu, przy jednoczesnym zachowaniu dokładności opisu zjawisk fizycznych. Jest to szczególnie przydatne

na wczesnym etapie procesu projektowania demonstracyjnych prototypów magnetokalorycznych maszyn chłodniczych, gdzie istnieje konieczność przeprowadzenia wielowariantowych obliczeń koncepcyjnych. Przedstawiona koncepcja może w przyszłości zostać łatwo rozbudowana o kolejne aspekty zjawisk magnetyczno-ciepłno-przepływowych.

05.04.2023

Paweł Pluszka