

Arkadiusz Małek<sup>1</sup>, Konrad Pietrykowski<sup>1</sup>, Rafał Sochaczewski<sup>2</sup>

## BADANIA MODELOWE GENERATORA PARY WODNEJ W PROGRAMIE AVL FIRE

**Streszczenie.** W ramach projektu Lider realizowanego na Politechnice Lubelskiej została opracowana konstrukcja generatora pary wodnej oparta o wtryskiwacz wody. Przedmiotowy generator pary będzie wykorzystywany w badaniach do zasilania elektrolizera w parę wodną o określonych parametrach (temperaturze i ciśnieniu). Użyte środowisko projektowania bryłowego 3D Catia v5 R20 posiada możliwość generowania dokumentacji w formatach akceptowalnych przez programy służące do dynamicznych obliczeń przepływowych CFD. Objętość modelu komory parowej elektrolizera została poddana przestrzennej dyskretyzacji na elementy skończone. Kształt komory parowej elektrolizera został zoptymalizowany pod względem wielkości i kształtu (przede wszystkim gorącego denka) w celu generowania homogenicznego (w wyniku dobrego mieszania) strumienia pary wodnej. Możliwość zapewnienia stabilnego w czasie przepływu pary jest kluczowa w zapewnianiu optymalnych warunków pracy wysokotemperaturowego elektrolizera HTPEM (*ang. High Temperature Proton Exchange Membrane*) oraz rzutuje w znacznym stopniu na utrzymanie jego sprawności na odpowiednim poziomie.

**Słowa kluczowe:** Elektrolizer HTPEM, badania CDF, generator pary wodnej

### BUDOWA MODELU

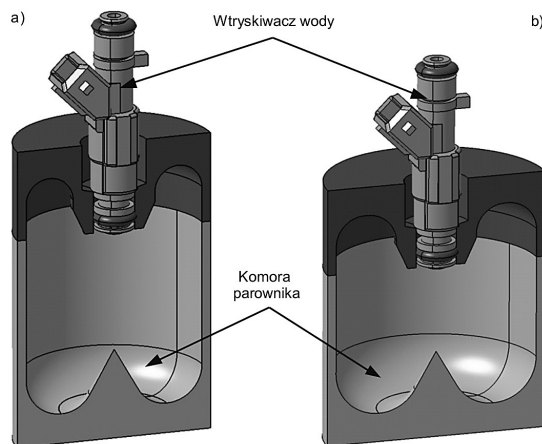
W ramach projektu Lider realizowanego na Politechnice Lubelskiej została opracowana konstrukcja generatora pary wodnej oparta o wtryskiwacz wody. Przedmiotowy generator pary będzie wykorzystywany w badaniach do zasilania elektrolizera w parę wodną o określonych parametrach (temperaturze i ciśnieniu) [2]. Generator pary wodnej stanowi ważny element wysokotemperaturowego elektrolizera typu PEM i może on podlegać efektywnemu sterowaniu w celu optymalizacji jego osiągnięć [1,4,5]. Wydajny i o dużej sprawności elektrolizer będzie urządzeniem do produkcji bardzo czystego wodoru wykorzystywanego do zasilania ekologicznych systemów generowania mocy opartych na ogniwach paliwowych typu PEM i HTPEM [3].

Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch przypadków geometrii generatora pary. Kształt generatora zachowano podobny, natomiast w drugim przypadku zmieniono wymiary komory parownika zmniejszając jej wysokość oraz po-

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, e-mail: lider@pollub.pl

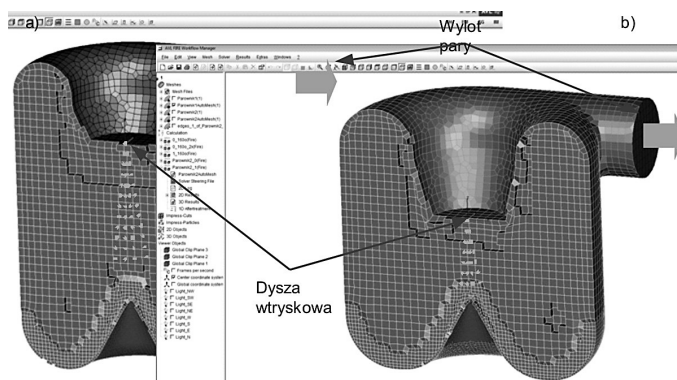
<sup>2</sup> Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, Politechnika Lubelska.

większając średnicę przy zbliżonej objętości. Model geometryczny opracowano w programie CATIA v5 r20 (rys. 1). Jest to model uproszczony nie zawierający układu dostarczania energii cieplnej, elementów mocujących oraz przewodów doprowadzających wodę i odprowadzających parę wodną.



Rys. 1. Model geometryczny: a) wersja 1, b) wersja 2

Dyskretyzację przestrzenną modelu komory parownika na elementy skończone przeprowadzono w programie AVL FIRE. Wydajność oraz dokładność obliczeń jest bezpośrednio związana z jakością wygenerowanej siatki. W celu wyeliminowania nieciągłości w geometrii oraz zapewnienia wymaganej dokładności obliczeń wykonano weryfikację poprawności opracowanej siatki za pomocą specjalnej funkcji zaimplementowanej w zastosowanym oprogramowaniu. Ostatecznie model w wersji pierwszej składał się z około 62 400 komórek oraz w wersji drugiej z 72 500 komórek (rys. 2). Ten poziom dyskretyzacji geometrycznej zapewnił wymaganą dokładność obliczeń przy jednoczesnym skróceniu czasu obliczeń.



Rys. 2. Siatka obliczeniowa: a) wersja 1, b) wersja 2

Obliczenia przepływu gazu przeprowadzono zgodnie z równaniami Naviera-Stokesa opisującymi zasadę zachowania masy i pędu dla płynów ściśliwych w zapisie tensorowym. Główne równanie całkowitej entalpii zostało przyjęte jako suma mechanicznej energii konwersji oraz entalpii chemiczno-termicznej. Rozwiązanie równania transportu dla całkowitej entalpii było wykonane zgodnie z zaleceniami dotyczącymi modelowania CFD. Dotyczyło to obliczenia liczby Eckerta'a ujmującej wpływ temperatury.

Z uwagi na występowanie przepływu burzliwego niezbędne było zdefiniowanie odpowiedniego modelu turbulencji. W czasie obliczeń zastosowano model k-zeta-f, który jest zalecany przez producenta oprogramowania AVL FIRE w obliczeniach CFD. W tym przypadku oprócz podstawowych równań transportu należy dodatkowo rozwiązać równania dla k, zeta i f. Obliczenia prowadzono przy założeniu modelu gęstości gazu idealnego, gdzie gęstość została określona funkcją ciśnienia i temperatury.

## ZAŁOŻENIA MODELU

Założono, że do generatora wtryskiwana jest woda, która po odparowaniu wpływa na zewnątrz przez otwór wylotowy. Woda dozowana jest do komory parownika przy użyciu modelu wtryskiwacza, którego geometria odpowiada kształtem i wymiarami oryginalnemu wtryskiwaczowi, który będzie zastosowany w prototypie generatora. Wtrysk realizowano funkcją skokową w zależności od czasu wtrysku paliwa, zapewniając stały wydatek w czasie całego procesu wtrysku.

W celu przeprowadzenia symulacji procesu wtrysku i odparowania wody wewnątrz generatora pary przyjęto następujące warunki brzegowe:

- temperatura wtryskiwanej wody 100 °C,
- temperatura ścianek 160 °C,
- stałe ciśnienie na wylocie 100 kPa,
- wydatek wtryskiwacza 1,4 g/s.

Obliczenia wykonano dla trzech wariantów wtrysku pary wodnej zarówno dla wersji pierwszej jak i wersji drugiej modelu, co daje łącznie sześć przypadków obliczeń (tabela 1). We wszystkich przypadkach wydatek wtryskiwacza jest jednakowy, jednakże różnią się one częstotliwością i czasem wtrysku wody.

Na podstawie wykonanych wstępnych obliczeń symulacyjnych ustalono krok obliczeniowy równy 5 ms. Obliczenia wykonano dla 3 sekundowego procesu, co oznaczało wygenerowanie 30 kolejnych wtrysków dla częstotliwości 10 Hz i 60 dla 20 Hz. Pozwoliło to na ustabilizowanie się masy filmu wodnego na ściankach komory parownika w każdym punkcie badawczym z wyjątkiem v1\_20Hz\_x2. Na każdy krok obliczeniowy przypadało 15 iteracji, co daje w sumie 600 kroków i 9 000 iteracji dla każdego punktu obliczeniowego.

**Tabela 1.** Zakres badań modelowych

Wariant	Wersja siatki	Częstotliwość wtrysków	Czas wtrysku	Masa wtrysku	Wydatek wtryskiwacza
	[-]	[Hz]	[ms]	[mg]	[g/s]
v1_10Hz	1	10	20	28	1,4
v1_20Hz	1	20	10	14	1,4
v1_20Hz_x2	1	20	20	28	1,4
v2_10Hz	2	10	20	28	1,4
v2_20Hz	2	20	10	14	1,4
v2_20Hz_x2	2	20	20	28	1,4

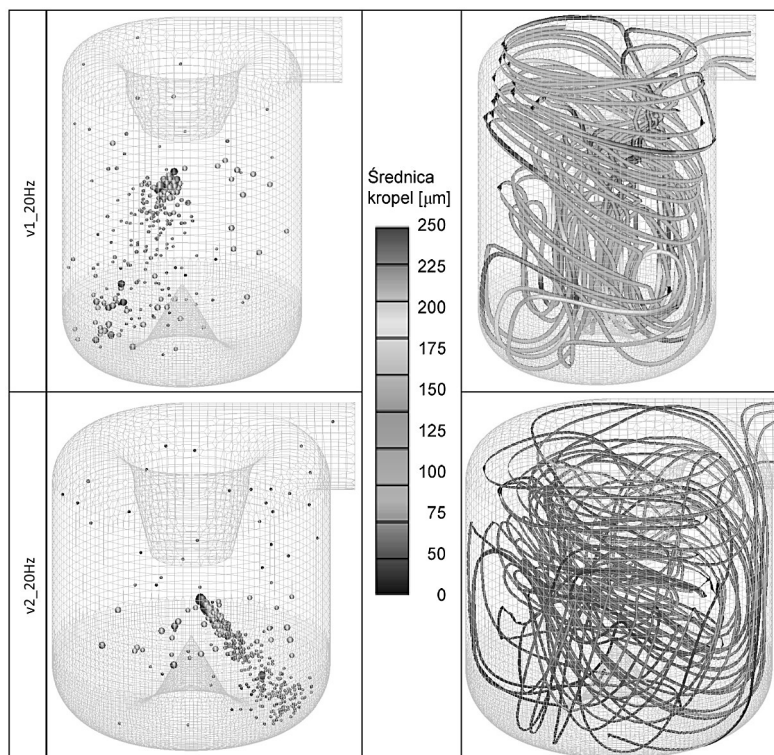
## WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych uzyskano przebiegi czasowe zmiany masy filmu wodnego w komorze parownika po wtrysku wody w zależności od kształtu komory oraz przyjętej strategii wtrysku. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki wpływu zastosowanej geometrii, częstotliwości oraz masy wtrysku na intensywność powstawania i parowania filmu wodnego. Ze względu na potrzebę właściwej wizualizacji i interpretacji wyników badań symulacyjnych, dla każdego punktu badawczego przyjęto stałe skale. Tabela 2 przedstawia wizualizację wtrysku wody dla punktu badawczego v1\_20Hz i v2\_20Hz. Widoczny jest przebieg wtrysku wody oraz zmieniający się pod wpływem wtrysku rozkład linii prądu pokazujący występowanie ruchu wirowego dla już ustalonych warunków pracy.

Jak wykazały badania już od początku inicjacji wtrysku następuje atomizacja strugi paliwa. Krople wody rozprzestrzeniają się w komorze parownika tworząc stożkowy kształt aerozolu. Po czasie około 5 ms od momentu rozpoczęcia wtrysku zatomizowana woda uderza o dolną ściankę komory parownika. Niemalże cała dawka wtrysniętej wody dociera do ścianki. Powstaniu filmu wodnego towarzyszą siły aerodynamiczne zawirowanego powietrza. Powietrze powoduje przemieszczanie się filmu wodnego promieniowo w kierunku od osi parownika na zewnątrz, jak również dodatkowo w kierunku otworu wylotowego w przypadku wersji pierwszej parownika. Wzdłużne rozciąganie powierzchni filmu paliwa wywołane jest niesymetrycznym rozkładem prędkości w przestrzeni parownika.

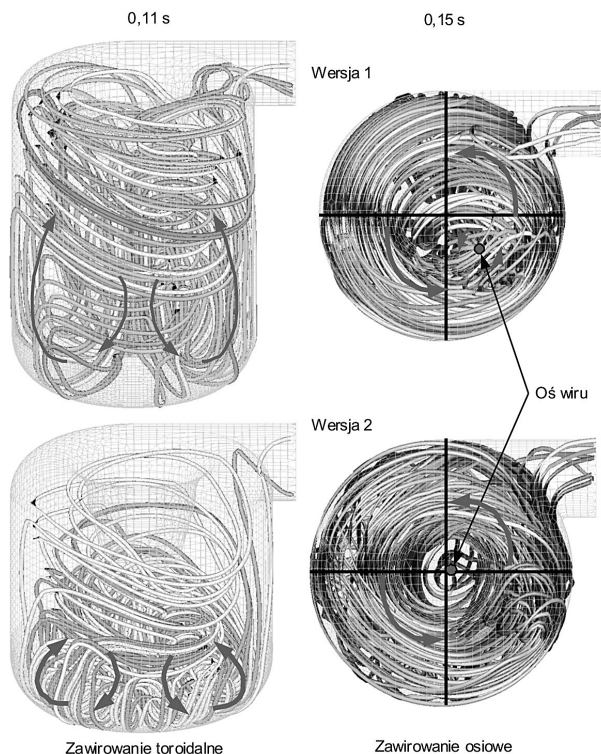
Powierzchnia filmu paliwowego przyjmuje kształt okrągły, jednakże tylko w przypadku wersji drugiej parownika. Maksymalna grubość filmu występuje w miejscu zderzenia strugi z powierzchnią. Grubość filmu osiąga większą wartość w przypadku pierwszej wersji parownika.

W przestrzeni parownika zauważono dwa typy zawirowań: toroidalne oraz osiowe (rysunek 3). Pierwsze zawirowanie powstaje na skutek przekazywania pędu rozpędzonych kropeł wody cząsteczkom pary wodnej, natomiast zawirowanie osio-

**Tabela 2.** Rozkłady kropeł i linii prądu końcem jednego cyklu wtrysku

we powstaje w drugiej fazie cyklu, czyli po zakończeniu procesu wtrysku i osiąga największą intensywność w chwili poprzedzającej kolejny wtrysk. Drugi typ zawirowania powstaje na skutek asymetrycznego umieszczenia wylotu pary. Z rysunku 4 przedstawiającego przebiegi czasowe prędkości zawirowania osiowego wynika, że zawirowanie to ustaje po czasie ok. 1 s. Wynika to prawdopodobnie z rosnącej masy filmu wodnego osiadającego na ściankach, który paruje z coraz większą intensywnością zakłócając ruch wirowy.

Na rysunku 3 widoczne są różnice występujące w zawirowaniach wynikające z różnic w konstrukcji wersji 1 i 2 parownika. W wersji pierwszej większa wysokość komory skutkuje zmniejszeniem energii wtrysku i zmniejszeniem intensywności zawirowania toroidalnego. Widoczne jest też przesunięcie osi zawirowania osiowego. Jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ prowadzi do przesunięcia lokacji kropeł osiadających dolną ściankę komory parownika. Zjawisko to widoczne jest zarówno na rysunkach zamieszczonych w tabeli 2 jak i w tabeli 3, przedstawiającej rozkłady filmu wodnego. Niezależnie od zastosowanej strategii wtrysku w przypadku wersji pierwszej komory parownika rozkład filmu wodnego jest niesymetryczny i część filmu gromadzi się na ściankach bocznych komory. W przypadku v2\_20Hz\_x2, czy-

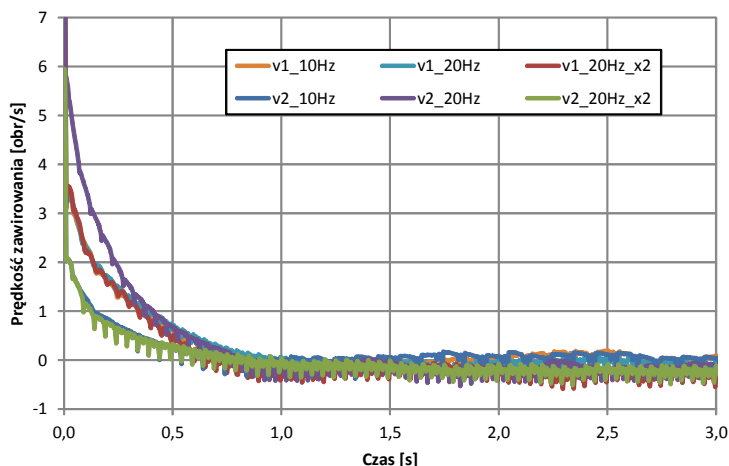


**Rys. 3.** Zawirowania w komorze parownika

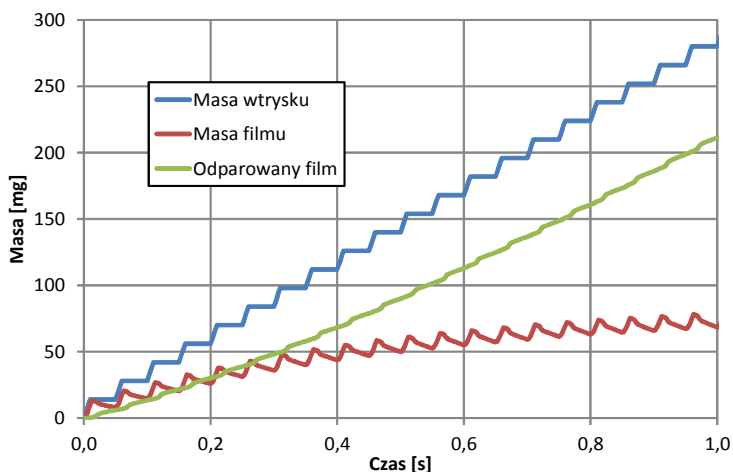
li przy zdwojonej dawce wtrysku, występuje nawet transport filmu do przewodu wylotowego. Z tej przyczyny nie nastąpiło ustalenie się masy filmu paliwowego widoczne m.in. na rysunku 11.

Na rysunku 5 przedstawiono przebieg czasowy masy wtrysku, masy filmu wodnego oraz masy odparowanego filmu. Można zaobserwować proces ustalania się masy wody w poszczególnych stanach skupienia. Po czasie ok. 0,8 s masa filmu przestaje się zmieniać, również różnica pomiędzy masą wtrysku a masą odparowanego filmu osiąga wartość stałą.

Rysunki 6 i 7 przedstawiają przebiegi czasowe grubości i powierzchni filmu wodnego w komorze parownika, natomiast rysunki 8 – 11 porównanie przebiegów masy filmu, temperatury pary wodnej oraz powierzchni i grubości filmu dla poszczególnych punktów badawczych. Wyraźnie widoczny jest wpływ częstotliwości wtrysku na amplitudę wahań grubości filmu paliwowego. Przy zwiększeniu częstotliwości z 10 do 20 Hz następuje zmniejszenie amplitudy o ok. 30%. Wpływ częstotliwości na powierzchnię filmu jest dużo mniejszy. Z analizowanych przebiegów wynika również, że ustalona grubość filmu osiąga większą wartość dla pierwszej



Rys. 4. Przebieg czasowy prędkości zawirowania pary w komorze parownika



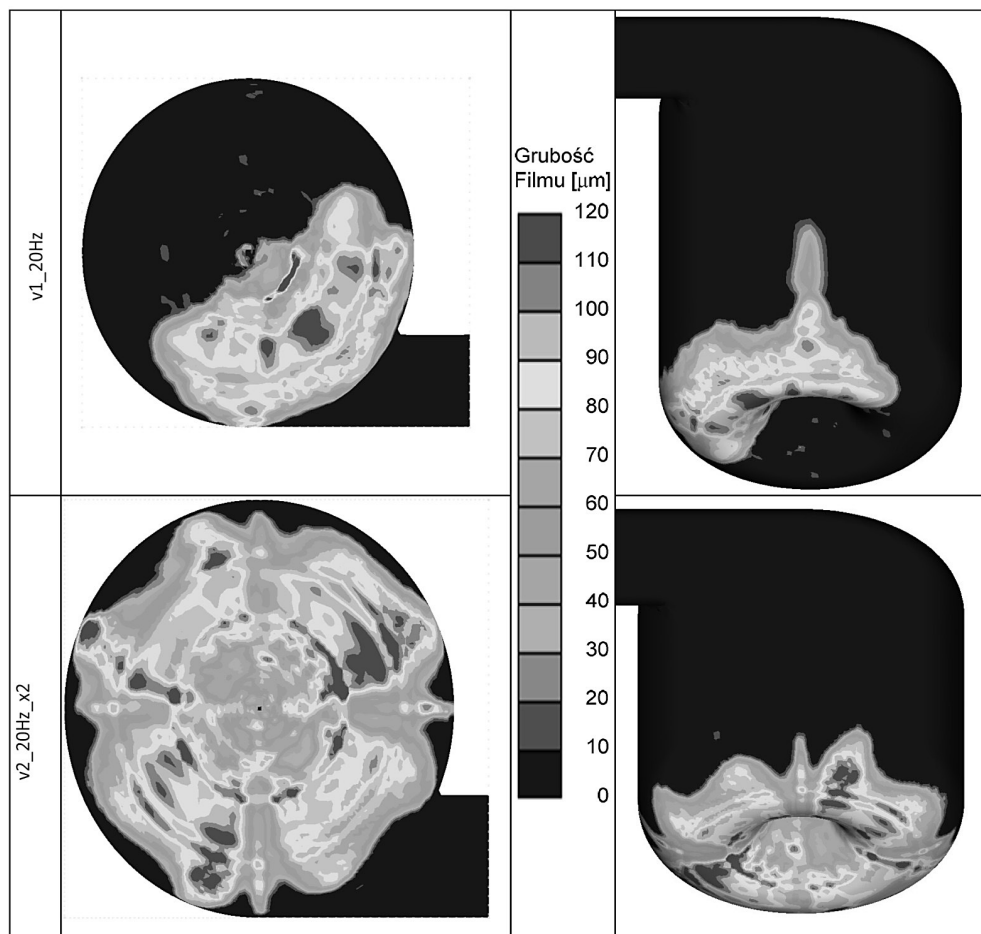
Rys. 5. Przebieg czasowy masy wtrysku, masy filmu i masy odparowanego filmu w komorze parownika dla przypadku  $v1_{20\text{Hz}}$

wersji parownika, natomiast w przypadku wersji 2 szybciej następuje ustalenie się grubości i powierzchni filmu.

## WNIOSKI Z BADAŃ SYMULACYJNYCH

Przeprowadzone badania modelu generatora pary wodnej miały na celu pozyskanie wiedzy na temat zjawisk zachodzących w komorze parownika podczas jego pracy, a także określenie zaleceń odnośnie projektowania prototypu generatora.

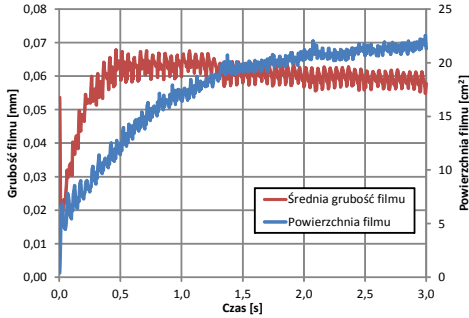
**Tabela 3.** Rozkłady filmu wodnego dla jednego cyklu wtrysku dla dwóch przypadków w chwili 3 s



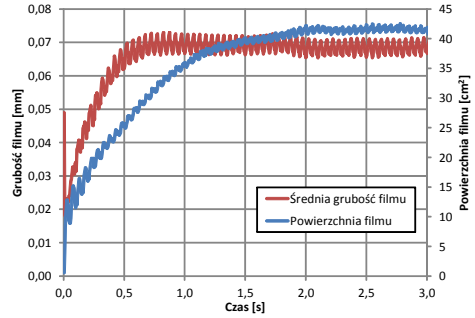
Z przeprowadzonych analiz wynikają następujące wnioski:

- Krople wody rozprzestrzeniają się w komorze parownika tworząc stożkowy kształt aerozolu. Na dolnej ścianie parownika powstaje film wodny, którego masa ustala się po ok. 1,5 s od momentu rozpoczęcia wtrysku. Wewnątrz komory parownika powstaje dwa rodzaje zawirowań: osiowe oraz toroidalne.
- Zwiększenie wysokości komory parownika powoduje pojawienie się asymetrii w rozkładzie prędkości i oddalenie się osi wiru osiowego od osi parownika. Asymetria rozkładu prędkości wpływa niekorzystnie na kształt filmu wodnego, który zaczyna się przemieszczać w kierunku otworu wylotowego.
- Ze względu na konieczność zapewnienia równomierności generowania pary zalecane jest zastosowanie w generatorze krótkiej i szerokiej komory parownika.

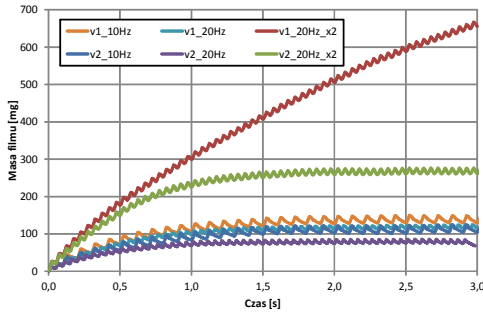




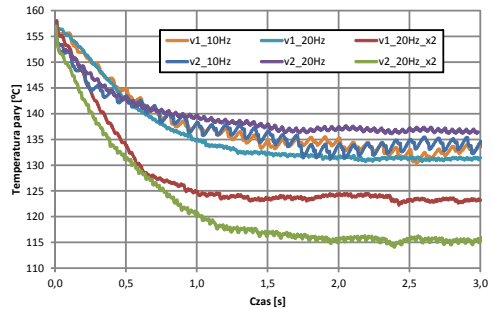
Rys. 6. Przebieg czasowy średniej grubości i masy filmu w komorze parownika dla przypadku v1\_20Hz



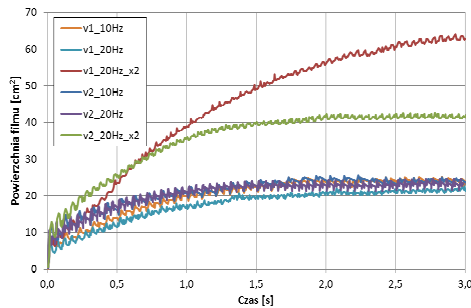
Rys. 7. Przebieg czasowy średniej grubości i masy filmu w komorze parownika dla przypadku v2\_20Hz\_x2



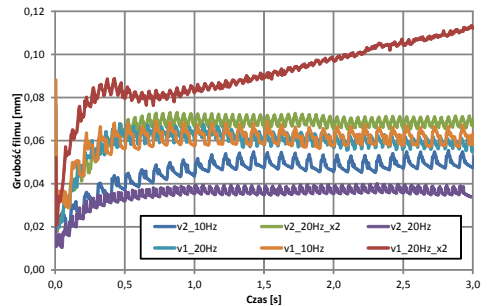
Rys. 8. Przebieg czasowy masy pary wodnej w komorze parownika



Rys. 9. Przebieg czasowy temperatury pary w komorze parownika



Rys. 10. Przebieg czasowy powierzchni filmu wodnego



Rys. 11. Przebieg czasowy grubości filmu wodnego

Na podstawie przedstawionych badań modelowych symulacyjnych została opracowana dokumentacja wtryskowego układu generowania pary wodnej dla potrzeb zasilania wysokotemperaturowego elektrolizera wodoru.

## LITERATURA

1. Kłonica M., Małek A.: Wpływ wilgotności powietrza zasilającego na pracę ogniwa paliwowego typu PEM. VII Międzynarodowe Sympozjum Studenckich Kół Naukowych „Inżynierowie Nowej Ery”, Lublin 15-16.05.2006 r.
2. Małek A., Grabowski Ł., Pietrykowski K., Sochaczewski R., Barański G., Szlachetka M., Gęca M.: Analiza możliwości pracy ogniwa paliwowego HTPEM w trybie elektrolizera. AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 10/2011 str. 305-311.
3. Małek A., Grabowski Ł., Wendeker M.: Ekologiczne systemy generowania mocy oparte na ogniwach paliwowych typu PEM. V Konferencja Naukowa Ekoenergia '2010, Lublin 17.12.2010. Materiały konferencyjne – AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe str. 219 – 227.
4. Taccani R., Radu R.: Effects of Control Strategies on the Performance of a PEM Fuel Cell Module. Alternative Fuels 2008, Maribor, January 10–11.
5. Wendeker M., Malek A., Czarnigowski J., Taccani R., Boulet P., Breaban F.: Adaptive airflow control of the PEM fuel cell system. 2007 JSAE/SAE International Fuels & Lubricants Meeting, Kyoto, Japan.


## STEAM GENERATOR MODELING IN AVL FIRE SOFTWARE

### Abstract

The purpose of this paper is to verify the construction assumptions for the regulator of water vapor flow in dynamic and static water vapor flow. The software owned to calculate compressible flow (CFD) - AVL FIRE enables completing this task, namely to develop geometric and mathematical models, and to do simulation calculation. The main problem to be solved is to determine the design parameters of water vapor flow which ensure the required dosing precision. The calculations allow for the verification of the construction assumptions for the control system.

**Keywords:** HTPEM electrolyzer, CFD modeling, steam generator.



**LIDER**  LIDER/04/45/L-2/10/NCBIR/2011  
Badania i rozwój sterowania energooszczędnym elektrolizerem PEM  
pracującym w podwyższonej temperaturze

