

Porównanie strat ciśnienia przy zastosowaniu parametrów płynu newtonowskiego i nienewtonowskiego w przepływie przez kanał okrągły

Aleksandra Nowakowska, Bartosz Ziegler

Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, ul. Piotrowo 3, 61-001 Poznań

Streszczenie

W niniejszej pracy dokonano analizy porównawczej przepływu płynu newtonowskiego i nienewtonowskiego przez kanał okrągły. Oszacowano straty ciśnienia przy przepływie przez przeszkodę, jaką jest kształtka hydrauliczna. Straty te różnią się w zależności od stężenia przepływającego płynu oraz zastosowanej lepkości. Dla płynu o stałej lepkości zaobserwowano mniejsze straty energii, natomiast płyn, którego lepkość zmienia się na skutek zmiany szybkości ścinania, wykazuje straty większe. W przypadku płynów, które istotnie zmieniają zakres lepkości podczas przepływu, należy zwrócić uwagę na dostosowanie parametrów armatury użytej do celów technologicznych. Może to znacząco wpłynąć na obniżenie kosztów poniesionych na przetłoczenie medium.

Słowa kluczowe: płyn nienewtonowski, obliczeniowa mechanika płynów, wodny roztwór karboksymetylocelulozy

1. Wstęp

Analiza strat ciśnienia dla płynów polega na wyznaczeniu ich całkowitej wartości w celu dostosowania parametrów urządzeń i elementów instalowanych na rurociągach. Straty te dzielą się na liniowe i miejscowe. Straty miejscowe spowodowane są przez przeszkody umieszczone w przewodzie, takie jak: elementy zmieniające kierunek przepływu płynu (kolanka), elementy zmieniające średnicę kanału (dyfuzory, kryzy), odgałężenia przewodów (trójniki), filtry, zawory itp. Straty ciśnienia dla płynów obliczane są na podstawie normy [1].

Płyn nienewtonowski to płyn, który nie spełnia hydrodynamicznego prawa Newtona. Oznacza to, że lepkość takiego płynu zależy nie tylko od ciśnienia, temperatury i rodzaju czynnika, ale także od szybkości ścinania płynu [2]. W płynach newtonowskich natomiast lepkość jest zależna jedynie od analizowanego czynnika oraz ciśnienia i temperatury. Lepkość płynu nienewtonowskiego nie jest stała w warunkach izobarycznych [3]. Dla płynów nienewtonowskich stosuje się różne modele lepkości opisujące zmianę lepkości płynu podczas przepływu [4]. Aby oszacować wartość strat przepływu dla takich substancji, należy się posłużyć metodami numerycznymi. Metoda, którą często stosuje się w celu przeprowadzenia pomiarów, to obliczeniowa mechanika płynów. Jest to działanie, które umożliwia programowanie symulacji przepływu płynów [5].

Płyn nienewtonowski zastosowany w niniejszych badaniach to wodny roztwór karboksymetylocelulozy (Na-CMC). Karboksymetyloceluloza to zmodyfikowana chemicznie celuloza, którą stosuje się w przemyśle spożywczym. Ma ona funkcje zagęszczające, stabilizujące, wypełniające i emulgujące. Dodawana jest między innymi do syropów, napojów owocowych, wyrobów piekarniczych i cukierniczych, a także lodów i innych produktów spożywczych [6]. Jej dodatkowym atutem jest to, że zatrzymuje wilgoć i powstrzymuje powstawanie fazy olejowej i wodnej w produktach [7]. Na-CMC stosowana jest także jako płyn modelowy do przeprowadzania badań przepływowych płynów nienewtonowskich [8].

W pracy [9] weryfikowano modele płynów nienewtonowskich oraz model płynu newtonowskiego w celu sprawdzenia, w jakim stopniu parametry przepływu przez przeszkodę różnią się w zależności od zastosowanego równania modelu. Praca doprowadziła do wniosku, że przy dużych wartościach szybkości ścinania badany płyn wykazuje cechy płynu newtonowskiego. Przy małych wartościach szybkości ścinania wartości lepkości różnią się znacząco dla każdego modelu. Celem niniejszych badań jest weryfikacja, jakich strat ciśnienia można oczekiwać przy przepływie przez przeszkodę oraz jakie błędy może generować w obliczeniach strat ciśnienia uznanie cieczy za newtonowską. Przy pokonywaniu przez płyn miejsc generujących straty miejscowe dochodzi do zakłóceń przepływu w postaci zmiany rozkładu prędkości. Wszelkie zakłócenia tego typu wpływają na zmianę lepkości płynów nienewtonowskich, natomiast płyny newtonowskie zachowują stałą lepkość w każdym punkcie przepływu. Oszacowanie da odpowiedź na to, czy są to straty pomijalne, czy jednak powinny być uwzględniane.

2. Obliczenia numeryczne

Wodny roztwór karboksymetylocelulozy zaliczany jest do grupy cieczy nienewtonowskich. Oznacza to, że lepkość takiego płynu nie jest wartością stałą i opisuje się ją przy użyciu modeli reologicznych. Do wyznaczenia lepkości materiału wykorzystanego w celu przeprowadzenia badania posłużono się modelem Ostwalda–de Waele’a, który opisany jest za pomocą poniższego równania [10]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = m * \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

gdzie: η – naprężenie styczne [N/m^2], $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania [$1/\text{s}$], m – współczynnik konsystencji [$\frac{\text{N*s}}{\text{m}^2}$], n – wykładnik płynięcia [–].

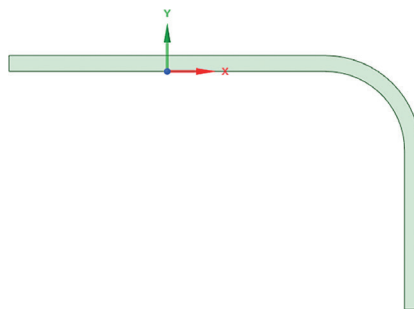
W symulacji wykorzystano trzy stężenia wodnego roztworu Na-CMC: roztwór 0% (woda); roztwór 1% Na-CMC z wodą; roztwór 1,5% Na-CMC z wodą.

Roztwory 1% i 1,5% Na-CMC różnią się od siebie lepkością. W badaniu zostaną one potraktowane jako płyny newtonowski i nienewtonowski. Roztwór 0%, powstały jedynie z wody, będzie potraktowany jako płyn newtonowski. Badaniu zostanie zatem poddanych pięć substancji różniących się lepkością i zastosowanymi modelami lepkości. Dane wybranego płynu wraz z jego parametrami zestawiono w tabeli utworzonej na podstawie literatury [8] i pomiarów własnych.

Tabela 1. Parametry materiału zastosowane w symulacji

Stężenie	0% Na-CMC	1% Na-CMC (newtonowski)	1,5% Na-CMC (newtonowski)	1% Na-CMC (nienewtonowski)	1,5% Na-CMC (nienewtonowski)
ν [Pa*s]	0,001003	0,000000025	0,00000018	–	–
m [Pa*s]	–	–	–	0,2103	0,9253
n [–]	–	–	–	0,8436	0,8099

Do badania wykorzystano podstawowy element armatury wpływający na parametry przepływu płynu, czyli kształtkę hydrauliczną, która zmienia kierunek przepływu płynu o 90° . Średnica kształtki wynosi 0,02 m. Geometrię rozpatrywanego problemu przepływowego prezentuje rys. 1.



Rys. 1. Geometria kształtki hydraulicznej

Siatka numeryczna zastosowana w obliczeniach składa się z elementów heksagonalnych i tetragonalnych. Geometrię oraz siatkę, a także obliczenia symulacyjne wykonano przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS FLUENT, który bazuje na równaniach Naviera–Stokesa, dyskretyzując je za pomocą metody elementów skończonych. Kryteria przepływowe, jakie zastosowano w celu wykonania symulacji, zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Kryteria przepływowe zastosowane w symulacji

Kryterium	Wartość
Prędkość wlotowa	2 [m/s]
Ciśnienie na wylocie	1 [bar]
Gęstość płynu	998,2 [kg/m ³]

Przepływ wody oraz płynów nienewtonowskich zastosowanych w badaniu ma charakter laminarny, natomiast pozostałe płyny newtonowskie wykazują przepływ turbulentny.

3. Wyniki i dyskusja

Przeprowadzenie symulacji komputerowej pozwoliło na otrzymanie wyników w postaci rozkładu ciśnienia dla każdego omawianego przypadku. Na podstawie tych wartości można odczytać, że najmniejszy zakres ciśnienia został wygenerowany dla płynów newtonowskich Na-CMC, największy natomiast odnotowano dla płynu nienewtonowskiego o stężeniu 1,5% Na-CMC. Zależnie od wybranego w badaniu płynu otrzymano straty ciśnienia spowodowane przepływem przez kształtkę. Wyniki zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wyników strat ciśnienia

Badany płyn	Straty ciśnienia [Pa]
Roztwór Na-CMC 0% (woda)	501,76
Roztwór Na-CMC 1% (newtonowski)	101,14
Roztwór Na-CMC 1,5% (newtonowski)	134,78
Roztwór Na-CMC 1% (nienewtonowski)	2561,65
Roztwór Na-CMC 1,5% (nienewtonowski)	8291,87

Wnioski

Płyn nienewtonowski w stosunku do płynu newtonowskiego wykazuje znaczące różnice w stratach ciśnienia spowodowanych pokonywaniem oporów przepływu przez przeszkodę. Dla roztworu newtonowskiego o stężeniu 1% straty ciśnienia wynoszą 101,14 Pa, natomiast dla tego samego stężenia, przy założeniu że jest to płyn nienewtonowski, straty wynoszą 2561,65 Pa. Dochodzi więc do 25-krotnego zwiększenia wartości oporów, jakie musi pokonać płyn. W przypadku roztworu Na-CMC o stężeniu 1,5% straty dla płynu newtonowskiego wynoszą 134,78 Pa, natomiast dla tej samej substancji o charakterze nienewtonowskim straty wynoszą 8291,87 Pa. Jest to więc ponad 60-krotny wzrost strat ciśnienia. W sytuacji zwiększenia liczby przeszkód w instalacji hydraulicznej straty ciśnienia będą proporcjonalnie większe, gdyż będą obejmowały każdą przeszkodę.

W przypadku płynów, które znacznie zmieniają zakres lepkości podczas przepływu, należy zwrócić uwagę na dostosowanie parametrów armatury użytej do celów technologicznych. Może to spowodować obniżenie kosztów poniesionych na przetłoczenie medium.

Literatura

- [1] PN-76/M-34034 – Rurociągi – Zasady obliczeń strat ciśnienia.
- [2] Matras Z. Podstawy mechaniki płynów i dynamiki przepływów cieczy nienewtonowskich. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [3] Dziubiński M., Kiljański T. Podstawy reologii i reometrii płynów nienewtonowskich. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2002; 5: 3–8.
- [4] Steller R. Novel models for description of steady shear flow curves of non-Newtonian liquids. *Polimery. Journal on Chemistry, Technology and Polymer Processing* 2015; 60: 636–643.
- [5] Anderson J.D. Obliczeniowa dynamika płynów: podstawy z aplikacjami. McGraw-Hill, New York 1995.
- [6] Casaburi A. et al. Carboxymethyl cellulose with tailored degree of substitution obtained from bacterial cellulose. *Food Hydrocolloids* 2018; 75: 147–156.
- [7] Janicki S., Fiebig A. Farmacja stosowana, podręcznik dla studentów farmacji. PZWL, Warszawa 1998.
- [8] Różańska S. Właściwości reologiczne wodnych roztworów soli sodowej karboksymetylocelulozy w przepływie wzdłużnym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2013; 52: 557–558.
- [9] Rosińska A., Lewandowska N. Weryfikacja wybranych modeli lepkości krwi. *Nauka dla obronności i środowiska. Tom 2. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych*, Warszawa 2020.
- [10] Wiśniowski R., Skrzypaszek K. Analiza modeli reologicznych stosowanych w technologiach inżynierskich. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz* 2006; 23/1: 523–532.

Eksperymentalno-numeryczna analiza cyklu pracy systemu magazynowania ciepła w złożu skalnym

Jakub Ochmann, Łukasz Bartela

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, ul. S. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

e-mail: jakub.ochmann@polsl.pl; lukasz.bartela@polsl.pl

Streszczenie

Magazynowanie ciepła jest procesem wskazywanym obecnie jako kluczowy dla zwiększania elastyczności krajowego systemu elektroenergetycznego, szczególnie z uwagi na potrzebę zwiększania w nim roli odnawialnych źródeł energii. Proponowane i stosowane zasobniki ciepła opierają się głównie na technologiach jednofazowych wykorzystujących wodę, oleje termalne czy stopione sole. Wodę jako nośnik ciepła użytkuje się powszechnie i z powodzeniem w ramach systemów ciepłowniczych. Olej termalny oraz stopione sole umożliwiają magazynowanie ciepła przy wyższych temperaturach, co jest wskazane w przypadku układów wykorzystujących koncentratory promieniowania słonecznego, jak również w ramach zyskujących popularność wielkoskalowych adiabatycznych systemów magazynowania energii w sprężonych gazach. Systemy takie coraz częściej proponowane są także jako elementy uelastyczniające konwencjonalne jednostki węglowe, jak również bloki jądrowe. Proces magazynowania ciepła może być też prowadzony z wykorzystaniem stałych złóż porowatych. Materiał akumulacyjny, który najczęściej stanowią materiały skalne lub ceramiczne, wymienia ciepło bezpośrednio z przepływającym przez zasobnik płynem. Dla wysokiej efektywności takich systemów ważne są zapewnianie minimalnych spadków ciśnienia nośnika wymieniającego ciepło z materiałem akumulacyjnym, jak również ograniczenie rozpraszania ciepła w ramach złoża.

Niniejsza praca prezentuje wyniki analizy eksperymentalno-numerycznej, której przedmiotem jest smukły zasobnik ciepła o wypełnieniu bazaltowym. Konstrukcja stanowiska laboratoryjnego umożliwiła dwukierunkowy przepływ powietrza. Autorski model numeryczny utworzony w programie MATLAB i zwalidowany na podstawie danych eksperymentalnych pozwala na przeprowadzenie wielowariantowych symulacji etapów ładowania, magazynowania ciepła i rozładowania zasobnika w stanie nieustalonym. Analizie poddano wpływ stopnia napełnienia zasobnika ciepła i wielkości strumienia masowego przepływu na długość okresu utrzymania wysokiej temperatury powietrza. Istotnym elementem analizy jest także konfiguracja wlotu i wylotu płynu z zasobnika ciepła.

Słowa kluczowe: magazynowanie energii, sprawność energetyczna, sprawność egzenergetyczna, badania eksperymentalne, badania numeryczne

1. Wstęp

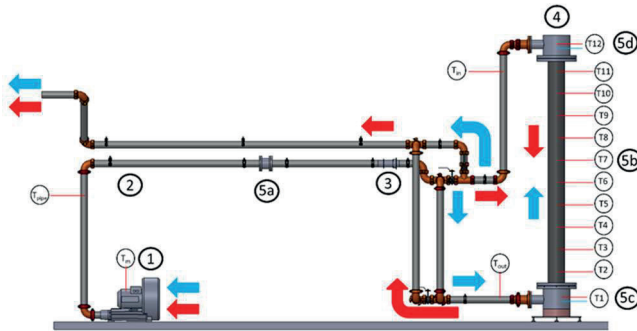
Magazynowanie ciepła w stałym złożu porowatym jest jedną z proponowanych koncepcji magazynowania ciepła obok np. technologii wykorzystujących materiały płynne lub zmiennofazowe [1–3]. Wymienione technologie wiążą się z szeregiem charakterystycznych zjawisk towarzyszących, które utrudniają wymianę i magazynowanie ciepła, co prowadzi do obniżenia potencjału magazynowanej energii. Magazynowanie ciepła w stałym złożu porowatym gwarantuje stabilność strukturalną materiału akumulacyjnego przy zachowaniu warunków ograniczających erozję materiału, np. cykliczna praca w zdefiniowanym zakresie temperaturowym czy ograniczenie sił nacisku wyższych warstw materiału na dolne elementy akumulujące poprzez stosowanie podziału na sekcje. Ponadto górna granica potencjału temperaturowego magazynowanego ciepła jest ograniczana przez temperaturę mięknięcia materiału stałego, niemniej w przypadku zastosowania skał wulkanicznych, jak bazalt, możliwe jest stosowanie temperatur na poziomie nawet 560°C [4, 5]. Dotychczasowe doświadczenie zespołu badawczego obejmuje badania eksperymentalne i numeryczne procesów magazynowania ciepła w zasobniku ciepła o wypełnieniu skalnym. Badania numeryczne prowadzone były w programie ANSYS Fluent i skupiały się na identyfikacji współczynnika wnikania ciepła pomiędzy

powietrzem a materiałem skalnym [4], wyznaczonego na podstawie korelacji literaturowych na liczbę Nusselta. Wykazano również, że wymiary geometryczne zasobnika mają wpływ na jego sprawność energetyczną i egzergetyczną [6].

2. Metodyka

2.1. Stanowisko laboratoryjne

Podstawą opracowania są wyniki eksperymentalne uzyskane dzięki badaniom prowadzonym na stanowisku laboratoryjnym, które znajduje się w zasobach Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Konfiguracja stanowiska laboratoryjnego [5]

Główny element stanowiska to zasobnik ciepła (4) o objętości 0,1 m³ i kamiennym wypełnieniu porowatym o średniej granulacji 16 mm. Średnia porowatość w całej objętości złoża skalnego wynosi 38%. Bazalt charakteryzuje się współczynnikiem przewodzenia ciepła równym 2,2 W/mK i pojemnością cieplną równą 920 J/kgK przy temperaturze referencyjnej wynoszącej 20°C. Powietrze do układu tłoczone jest za pomocą dmuchawy SC40A 750T Venture Industries o mocy 7,5 kW. Maksymalne produkowane nadciśnienie wynosi 40 kPa. Stanowisko wyposażone jest w nagrzewnicę elektryczną powietrza Lester LE 10000 (3) o mocy 17,5 kW, która umożliwi ogrzanie przepływającego gazu do maksymalnie 650°C. Układ rurociągów i zaworów (2) pozwala na zmianę kierunku przepływu gazu przez zasobnik TES, co daje możliwość badania różnych konfiguracji wlotów i wylotów powietrza. Rozkład temperatury bazaltu wzdłuż osi symetrii złoża porowatego rejestrowany jest za pomocą dziesięciu równomiernie rozłożonych czujników temperatury PT100. Stanowisko pomiarowe umożliwia rejestrację spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez złożo porowate. Pomiarom podlega również temperatura powietrza wlotowego, wylotowego, a także jego strumień masowy [6].

2.2. Model numeryczny

Model numeryczny zasobnika ciepła został autorsko skompilowany przy wykorzystaniu oprogramowania MATLAB R2022b wraz z rozszerzeniem Coolprop 6.4.3 wprowadzającym tablice termodynamiczne gazów i cieczy. Powietrze, będące czynnikiem przenoszącym ciepło, modelowane jest na podstawie danych przedstawionych przez Lemmona i in. [7]. Stosowność modelu określono na zakres temperaturowy powietrza 60–2000 K w ciśnieniach do 2000 MPa. Model numeryczny wykorzystuje równania [8], które uwzględniają konwekcyjną wymianę ciepła i przewodzenie osiowe, rozwiązywane dla objętości skalnych (1) i gazowych (2):

$$\frac{\partial T^s}{\partial t} = \frac{k^s}{(1 - \varepsilon)(\rho c_p)^s} \frac{\partial^2 T^s}{\partial^2 y^2} + \frac{h_{sf} A_0}{(1 - \varepsilon)(\rho c_p)^s} (T^s - T^f) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T^f}{\partial t} + v^f \frac{\partial T^f}{\partial y} = \frac{k^f}{\varepsilon(\rho c_p)^f} \frac{\partial^2 T^f}{\partial^2 y^2} + \frac{h_{sf} A_0}{\varepsilon(\rho c_p)^f} (T^s - T^f) \quad (2)$$

gdzie T^f i T^s to odpowiednio temperatura powietrza i materiału skalnego, k^f i k^s to odpowiednio współczynnik przewodzenia ciepła powietrza i materiału skalnego, ε to wartość porowatości złoża skalnego, v^f to prędkość przepływu powietrza przez objętość złoża, ρ to gęstość, c_p to pojemność cieplna w stałym ciśnieniu, a A_0 to właściwa powierzchnia wymiany ciepła pomiędzy powietrzem a materiałem skalnym w objętości złoża. Współczynnik wnikania ciepła h_{sf} jest dynamicznie determinowany przy pomocy empirycznej korelacji na liczbę kryterialną Nusselta, zaproponowanej przez Wakao i Kaguei [8]:

$$Nu_d = \frac{h_{sf} D_p}{k^f} = 2 + 1.1 Re^{0.6} Pr^{1/3} \quad (3)$$

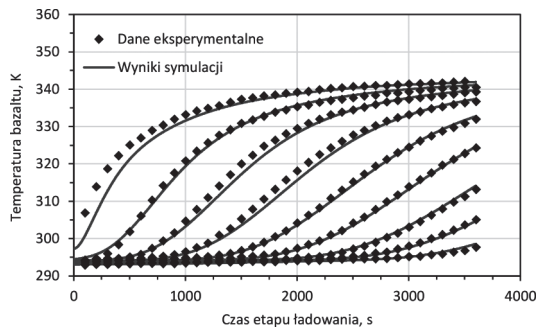
gdzie D_p to przyjęta średnica ekwiwalentna elementów złoża skalnego, Pr to bezwymiarowa liczba Prandtla, Re to liczba Reynoldsa definiowana jako:

$$Re = \frac{\varepsilon v^f D_p}{\nu} \quad (4)$$

gdzie ν to lepkość kinematyczna.

Wyniki

Na rys. 2 zaprezentowano porównanie danych eksperymentalnych i wyników numerycznych uzyskanych dla serii pomiarowej o średniej wartości strumienia masowego przepływu równej 112 kg/h i maksymalnej temperaturze powietrza wlotowego równej 70,1°C.

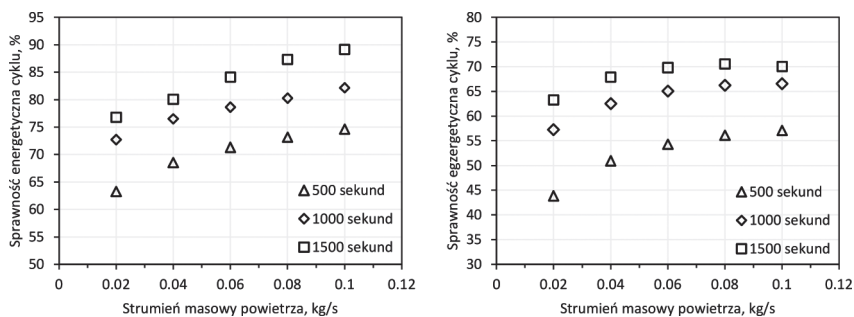


Rys. 2. Porównanie danych eksperymentalnych i wyników symulacji z wykorzystaniem autorskiego modelu numerycznego

Wykorzystywany autorski model numeryczny w zadowalającym stopniu symuluje przyrost temperatury materiału skalnego na długości zasobnika ciepła. Model numeryczny cechuje się wysoką elastycznością, a jego struktura umożliwia wykonanie wielowariantowych analiz z zakresu zarówno zmiennych parametrów wejściowych powietrza, jak i konfiguracji zasobnika. Analiza numeryczna przedstawiona w ramach niniejszej pracy objęła badanie sprawności energetycznej i egzergetycznej cyklu działania zasobnika, który składa się z etapów ładowania, magazynowania ciepła i rozładowania. Zmianie poddano wartość strumienia powietrza przepływającego przez zasobnik w czasie etapów ładowania i rozładowania. Dodatkowo rozpatrzono trzy przypadki długości trwania tych etapów. W każdym z rozpatrzonych przypadków etap magazynowania ciepła trwał 1000 sekund. Wyniki badań numerycznych przedstawiono na rys. 3.

Wykazano, że dla wszystkich trzech przypadków długości trwania etapów ładowania i rozładowania zasobnika ciepła sprawność energetyczna rośnie wraz ze wzrostem strumienia powietrza. Jest to związane ze wzrostem intensywności wymiany powietrza pomiędzy powietrzem a materiałem skalnym, co zmniejsza ilość energii rezydualnej po zamknięciu cyklu działania zasobnika. Wykazano także, że strumień powietrza optymalny z perspektywy sprawności egzergetycznej zasobnika wynosi około 0,07 kg/s dla tej konfiguracji zasobnika. Na

spadek wartości sprawności egzergetycznej powyżej tej wartości strumienia może mieć wpływ wartość spadku ciśnienia powietrza, zależna od prędkości przepływu gazu przez objętość zasobnika.



Rys. 3. Sprawność energetyczna (a) i sprawność egzergetyczna (b) cyklu działania zasobnika ciepła dla różnych parametrów wejściowych powietrza i długości etapów ładowania i rozładowania

Podziękowania

Prezentowane w pracy badania zostały zrealizowane w ramach środków na badania statutowe.

Literatura

- [1] Praveen R.P., Chandra Mouli K.V.V. Performance enhancement of parabolic trough collector solar thermal power plants with thermal energy storage capability. *Ain Shams Engineering Journal* 2022; 13: 101716.
- [2] Zhang A. et al. Investigation of the compressed air energy storage (CAES) system utilizing systems-theoretic process analysis (STPA) towards safe and sustainable energy supply. *Renewable Energy* 2023; 206: 1075–1085.
- [3] Bartela Ł. et al. Repowering a coal power unit with small modular reactors and thermal energy storage. *Energies* 2022; 15: 5830.
- [4] Ochmann J. et al. Experimental and computational analysis of packed-bed thermal energy storage tank designed for adiabatic compressed air energy storage system. *Applied Thermal Engineering* 2022; 213: 118750.
- [5] Martin C. et al. Investigation of the long-term stability of quartzite and basalt for a potential use as filler materials for a molten-salt based thermocline storage concept. *Solar Energy* 2028; 171: 827–840.
- [6] Rusin K. et al. Influence of geometrical dimensions and particle diameter on exergy performance of packed-bed thermal energy storage. *Energy* 2022; 260: 125204.
- [7] Lemmon E. et al. Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon, and oxygen from 60 to 2000 K at pressures to 2000 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 2000; 29: 331–385.
- [8] Kaviany M. Principles of heat transfer in porous media. Springer, New York 1995.

Analiza wpływu parametrów pracy zespołu turbiny parowej determinowanych przez warunki lokalizacyjne na jej charakterystyki pracy

Jakub Ochmann, Henryk Łukowicz, Łukasz Bartela

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, ul. S. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

e-mail: jakub.ochmann@polsl.pl; henryk.lukowicz@polsl.pl; lukasz.bartela@polsl.pl

Streszczenie

Transformacja przemysłu, obejmująca przede wszystkim dekarbonizację sektora energetycznego, jest jednym z głównych celów gospodarek europejskich. W ostatnich latach w Polsce zintensyfikowano działania ukierunkowane na budowę pierwszych reaktorów jądrowych pracujących na rzecz krajowej energetyki. Według planów pierwszy reaktor AP1000 Westinghouse ma zostać uruchomiony w 2033 roku. Celem jest osiągnięcie do roku 2040 6–9 GW mocy z energetyki jądrowej. Jedną ze ścieżek dekarbonizacji jest koncepcja *Coal-to-Nuclear*, zakładająca budowę bloku jądrowego na terenie dotychczasowej działalności konwencjonalnej elektrowni węglowej. Tak sprofilowana inwestycja z uwagi na możliwość wykorzystania infrastruktury technicznej bloku węglowego może prowadzić do skrócenia czasu budowy oraz sporych oszczędności finansowych. W przypadku reaktorów generacji III możliwe jest wykorzystanie ujęć wody chłodzącej, układu wyprowadzenia mocy, infrastruktury transportowej. W przypadku potencjalnego wykorzystania w przyszłości reaktorów IV generacji możliwe z technicznego punktu widzenia jest wykorzystanie nawet wyspy turbinowej. W ramach zrealizowanych prac ocenie poddano lokalizację jednostek wytwórczych, które mogą stanowić przedmiot ścieżki dekarbonizacji *Coal-to-Nuclear*. Opracowano model obiegu ciepłego turbiny parowej, stanowiącej element bloku jądrowego, który umożliwia wielowariantową analizę porównawczą dla różnych konfiguracji i różnych warunków pracy bloku. Dla analizowanych lokalizacji, właściwych dla posadowienia obecnie pracujących dużych systemów wytwórczych wykorzystujących węgiel, przeprowadzono analizę pozwalającą na ocenę możliwości zabudowy systemu jądrowego z uwagi na dostępność wody chłodzącej. Uwzględniano przy tym sposób połączenia pracujących kondensatorów. Dokonano obliczeń mocy bloku ze względu na warunki chłodzenia układu kondensatora. Wyniki analizy wskazują na potencjalne problemy związane z wymaganiami dotyczącymi dostępności wody chłodzącej.

Słowa kluczowe: energetyka jądrowa, *Coal-to-Nuclear*, turbiny parowe, dekarbonizacja

1. Wstęp

Projekt „Plan dekarbonizacji krajowej energetyki zawodowej na drodze modernizacji z wykorzystaniem reaktorów jądrowych” o akronimie DESire realizowany jest przez pięć podmiotów: Politechnikę Śląską, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Instytut Sobieskiego i Energoprojekt-Katowice i jest współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu GOSPOSTRATEG. Projekt DESire wpisuje się w plany rozwoju energetyki jądrowej w Polsce [1]. Jego podstawowym celem jest przygotowanie planu modernizacji bloków węglowych przez wykorzystanie reaktorów jądrowych. Plan dekarbonizacji będzie spójny z „Polityką energetyczną Polski do 2040 r.”.

2. Metodyka

W ramach dotychczasowych analiz dowiedziono, że w przypadku modernizacji konwencjonalnego układu węglowego poprzez zastąpienie kotłów opalanych węglem reaktorami SMR o mocy ograniczonej do 300 MWe możliwa jest modernizacja wyspy turbinowej z zachowaniem niektórych elementów obiegu [2–4]. Reaktory wodno-ciśnieniowe dużej mocy wytypowane do niniejszej analizy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe informacje na temat referencyjnych reaktorów jądrowych wytypowanych w ramach projektu DESIRE

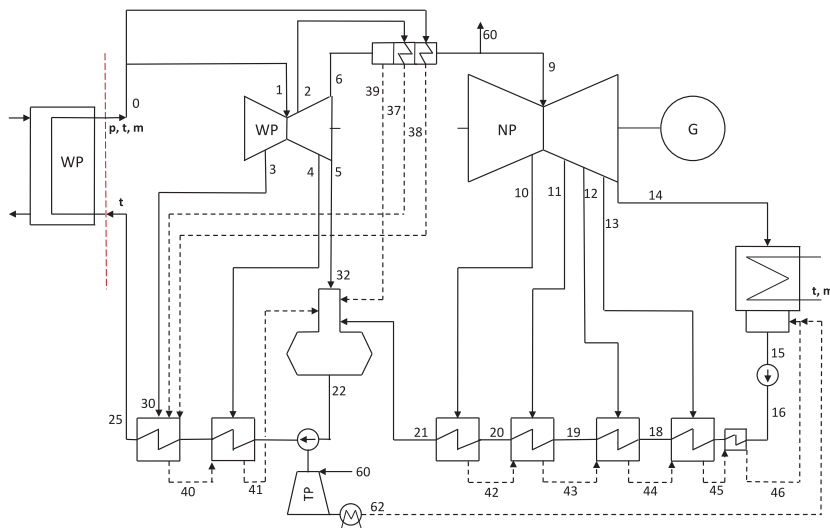
Dostawca	Oznaczenie	Typ reaktora	Moc elektryczna brutto/netto	Sprawność bloku brutto	Status (w ruchu/w budowie)
Westinghouse (USA)	AP-1000	PWR	1250/1150 MW	34%	4/2
KEPCO (Korea Południowa)	APR-1400	PWR	1420/1350 MW	36%	4/6
EDF (Francja)	EPR-1600	PWR	1720/1600 MW	38%	3/3

W tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry pary w obiegu turbinowym dla przyjętych reaktorów PWR [5–7].

Tabela 2. Parametry pary dla przyjętych reaktorów PWR

Parametr	Jedn.	Blok z reaktorem AP-1000	Blok z reaktorem APR-1400	Blok z reaktorem EPR-1600
Ciśnienie pary wylotowej z generatora pary	MPa	5,76	6,84	7,8
Temperatura/wilgotność pary wylotowej z generatora pary	°C/%	272,8/2,5	284,3/2,5	293
Strumień pary wylotowej z generatora pary	kg/s	1889	2261	2443
Temperatura wody zasilającej na wlocie do generatora pary	°C	226,7	232	230
Ciśnienie w skraplaczu	kPa	8,5	–	2,5

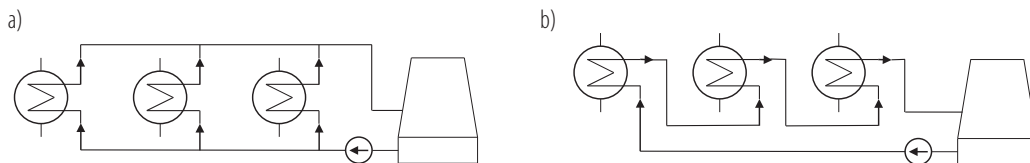
Na rys. 1 zaprezentowano analizowany schemat obiegu bloku jądrowego. Para nasycona z wytworzycy pary płynie do wysokoprężnej części turbiny, po czym jest kierowana do separatora wilgoci i dwusekcyjnego przegrzewacza pary. Pierwsza sekcja zasilana jest parą z upustu turbiny, druga – parą świeżą z wytworzycy pary. Skropliny ze skraplaczy podgrzewane są w chłodnicy skroplin i czterech podgrzewaczach niskoprężnych, a następnie płyną do odgazowywacza i przez pompę wody zasilającej są kierowane przez dwa podgrzewacze wysokoprężne do wytworzycy pary.



Rys. 1. Schemat obiegu bloku jądrowego

Pompa wody zasilającej może być napędzana za pomocą silników elektrycznych lub pomocniczej turbiny parowej. Dla uproszczenia na schemacie pokazano tylko jedną część niskoprężną NP, natomiast w obliczeniach uwzględniono wszystkie części niskoprężne. W analizie obiegu z reaktorem APR-1400 przyjęto turbinowy napęd pompy wody zasilającej, a obiegów z reaktorami AP-1000 i EPR-1600 – napęd silnikami elektrycznymi.

Głównym celem prowadzonej analizy była ocena ilości wody potrzebnej do chłodzenia skraplaczy turbinowych. Para wylotowa z części NP skraplana jest w trzech skraplaczach połączonych równolegle (rys. 2a) lub szeregowo (rys. 3b).



Rys. 2. Schemat równoległego (a) i szeregowego (b) połączenia skraplaczy

Przyjęto, że temperatura wody chłodzącej na wlocie do skraplacza wynosiła 30°C dla obiegów z reaktorami AP-1000 i APR-1400 oraz 10°C dla obiegu z reaktorem EPR-1600.

Wyniki

Dla obiegu z danym reaktorem analizowano równoległe i szeregowe połączenie skraplaczy turbinowych. Dla szeregowego połączenia skraplaczy przyjęto stały przyrost temperatury wody chłodzącej w każdym skraplaczu wynoszący 4,65 K, natomiast dla połączenia równoległego 9 K. Odpowiadające tym wartościom temperatury ciśnienia w skraplaczach przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Przyrost temperatury wody chłodzącej i ciśnienia w skraplaczach

Parametr	AP-1000			APR-1400			EPR-1600		
	Skr. 1	Skr. 2	Skr. 3	Skr. 1	Skr. 2	Skr. 3	Skr. 1	Skr. 2	Skr. 3
ΔT_{wchl} , K	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65
p_{skr} , kPa	6,51	8,34	10,6	6,51	8,34	10,6	2,02	2,69	3,56
ΔT_{wchl} , K	9			9			9		
p_{skr} , kPa	8,21			8,21			2,65		

W tabeli 4 podano wyniki obliczeń wskaźników pracy bloku pracującego z referencyjnym reaktorem dla równoległego i szeregowego połączenia skraplaczy. Sprawność brutto zdefiniowano jako iloraz mocy elektrycznej brutto do strumienia ciepła doprowadzonego do obiegu turbinowego.

Tabela 4. Termodynamiczne wskaźniki pracy bloku

Wskaźnik	Jedn.	AP-1000 poł. skrapl. równ./szer.	APR-1400 poł. skrapl. równ./szer.	EPR-1600 poł. skrapl. równ./szer.
Moc elektryczna brutto	MW_e	1211/1207	1430/1426	1740/1729
Moc cieplna do obiegu turbinowego	MW_t	3431/3431	4003/4003	4331/4314
Moc cieplna przekazana w skraplaczu	MW_t	2199/2202	2530/2464	2566/2560
Sprawność brutto	%	35,29/35,18	35,73/35,63	40,17/40
Jednostkowe zużycie ciepła	kJ/kWh	10 203/10 232	10 076/10 104	8961/8981

Strumień ciepła przejęty przez wodę chłodzącą w skraplaczu jest proporcjonalny do ilości wody chłodzącej i przyrostu jej temperatury w skraplaczu. Zwiększając przyrost temperatury wody, można zatem uzyskać zmniejszenie jej strumienia. Obliczony strumień wody chłodzącej dla równoległego i szeregowego połączenia skraplaczy przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Strumień wody chłodzącej dla równoległego i szeregowego połączenia skraplaczy

Strumień wody chłodzącej	Jedn.	Blok z reaktorem AP-1000	Blok z reaktorem APR-1400	Blok z reaktorem EPR-1600	Blok 900 MW Opolo
Równoległe połączenie skraplaczy	t/h	210 418	242 101	245 022	79 726
Szeregowe połączenie skraplaczy	t/h	135 988	152 165	157 762	–

W przypadku modernizacji bloków węglowych bardzo istotne będą zapotrzebowanie na wodę chłodzącą i jej dostępność w rozpatrzonej lokalizacji. Porównując blok z reaktorem AP-1000 z nadkrytycznym blokiem nr 5 z Opolo o mocy 900 MW (posiadającym trzy chłodzone równoległe skraplacze), otrzymano 2,6 razy większy strumień wody dla równoległego połączenia skraplaczy i 1,7 razy większy dla połączenia szeregowego. Na korzyść szeregowego połączenia skraplaczy przemawia fakt niewielkiego spadku mocy elektrycznej i sprawności bloku brutto w stosunku do znacznej redukcji zapotrzebowania na wodę chłodzącą. W przypadku referencyjnego układu 2×900 MW w Opolu strumień wody chłodzącej w układzie równoległym jest zbliżony do strumienia bloków z reaktorami EPR-1600 i APR-1400 z szeregowymi połączeniami skraplaczy. Nie jest on jednak wystarczający w przypadku zachowania równoległego połączenia skraplaczy.

Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu pt.: „Plan dekarbonizacji krajowej energetyki zawodowej na drodze modernizacji z wykorzystaniem reaktorów jądrowych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG (umowa nr: Gospostrateg VI/0032/2021-00 z dn. 15.03.2022 r.).

Literatura

- [1] Program polskiej energetyki jądrowej; <https://www.gov.pl/web/polski-atom/program-polskiej-energetyki-jadrowej> [dostęp 31.05.2023].
- [2] Qvist S. et al. Retrofit decarbonization of coal power plants – a case study for Poland. *Energies* 2021; 14: 120.
- [3] Bartela Ł. et al. Repowering a coal power unit with small modular reactors and thermal energy storage. *Energies* 2022; 14: 5830.
- [4] Łukowicz H. et al. Repowering a coal power plant steam cycle using modular light-water reactor technology. *Energies* 2023; 16: 3083.
- [5] United States Nuclear Regulatory Commission. Nuclear Reactors.
- [6] International Atomic Energy Agency. Advanced Reactors Information System (ARIS).
- [7] Wichtmann A. Raising steam on an unprecedented scale. *Modern Power Systems*. Siemens AG 2004: 43–46.

Dydaktyka przedmiotów (nie tylko) związanych z techniką cieplną – gdzie jesteśmy teraz i czy jest coś ciekawszego niż tradycyjny styl nauczania?

Ziemowit Ostrowski

Politechnika Śląska, Katedra Techniki Ciepłej, ul. S. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice

e-mail: ziemowit.ostrowski@polsl.pl

Tell me something, girl (**Student**)

Are you happy in this modern world?

Or do you need more?

Is there something else you're searchin' for?

Tell me something, boy (**Doc, Professor**)

Aren't you tired trying fill that void? Or do you need more?

*Ain't it hard keepin' it so hardcore?*¹

Powiedz jedną rzecz... (**Studencie**)

Czy wystarczy ci ten świat czy nie?

Może więcej chcesz?

Ciągłe szukasz, ciągle błędzisz gdzieś

Powiedz jedną rzecz... (**Doktorze, Profesorze**)

Czy nie męczy cię donikąd bieg?

Czyżbyś więcej chciał? Ciągła walka swe granice ma?

Streszczenie

Czymiędzy dzisiejszym studentem a tradycyjną uczelnią wyższą pojawiła się przepaść? Zastanówmy się nad problemem rosnącego niezrozumienia pomiędzy wykładowcami/nauczycielami stosującymi tradycyjne schematy nauczania a współczesnymi studentami. Rozdźwięk ten jest źródłem licznych nieporozumień i frustracji. W rezultacie obie strony relacji nauczyciel–uczeń mogą odczuwać niezadowolenie lub być zdemotywowane. Jako tło do dyskusji przedstawiono wybrane niestandardowe metody dydaktyczne, które autor przetestował w nauczaniu na Politechnice Śląskiej, m.in. wykorzystanie Facebooka jako narzędzia pomocniczego w procesie nauczania (czy nam się to podoba, czy nie, studenci nie czytają podręczników, ale czytają Facebooka) oraz ideę angażowania studentów w projekty, np. typu PBL – *Project Based Learning*.

Młodzież nie jest dzisiaj ani lepsza, ani gorsza – jest inna. Inne są też potrzebna wiedza, pożądane kompetencje i umiejętności. Inne też powinny więc być także sposoby nauczania i komunikacji.

Słowa kluczowe: dydaktyka, komunikacja, metody nauczania, media społecznościowe, kognitywistyka

1. Motywacja

Jako nauczyciele/wykładowcy/profesorzy jesteśmy ostatnio często przygnębieni niskim poziomem zaangażowania studentów, niskim poziomem ich wiedzy, niską umiejętnością rozwiązywania problemów itp. Studenci zaś są rozczarowani staromodnymi wykładami, skostniałym (a może już zwyczajnie zdezaktualizowanym) schematem wykład–ćwiczenia–laboratorium, brakiem motywowania do nauki itp. Wreszcie jest też trzecia strona: rynek – pracodawcy jako konsumenci naszych „produktów” (tj. absolwentów) też mogą być niezadowoleni z jakości (kompetencji, wiedzy) absolwentów.

Oczywiście, co autor wie i w co głęboko wierzy, istnieją liczne przypadki uczelni i wykładowców stosujących dobre, nowoczesne techniki nauczania i jest też wielu dobrze zmotywowanych, zdolnych i zaangażowanych studentów. Ale czy tak jest wszędzie? Niestety nie.

¹ Na podstawie: Lady Gaga, Bradley Cooper, *Shallow* (Ścieżka dźwiękowa filmu *A Star is Born*), 2018.

² Tłumaczenie: Tomek Robaczewski, https://www.youtube.com/watch?v=48bU2qWhZzY&ab_channel=Ma%C5%82gorzataKoz%C5%82owska.

2. Próba diagnozy

2.1. Studenci

Młodzi ludzie zupełnie inaczej niż większość z nas (nauczycieli, wykładowców) korzystają z Internetu i urządzeń elektronicznych. Mają często zupełnie inne kompetencje, co często nas zaskakuje. Ale czy powinno?

Kiedyś za mędrców uznawano tych, którzy poza znajomością informacji (praw, faktów, itp.) wiedzieli, gdzie (np. w jakiej książce) znaleźć odpowiedź lub opis poszukiwanej rzeczy. Nieograniczone zasoby Internetu z niezliczonymi źródłami są dzisiaj dostępne, wraz z możliwością wyszukiwania po słowach kluczowych, dla każdego „na ekranie smartfona”. Czy zatem każdy posiadacz smartfona jest dzisiaj mędrcem? Oczywiście – nie.

W przeciwieństwie do informacji z Internetu, informacja drukowana, np. w postaci książek, była wiarygodna, podlegała bowiem skrupulatnej weryfikacji i recenzji. Stąd wymaganą obecnie kompetencją jest nie wiedza i informacja sama w sobie, ale umiejętność w zakresie filtrowania informacji pod względem ich wiarygodności. I tego powinniśmy uczyć!

Czy powinniśmy się także dziwić, że niektóre umiejętności, jak np. analityczne obliczanie całki, powoli zdają się, nawet w przypadku inżynierów, zanikać? W świetle narzędzi typu Wolfram Alpha³ (m.in. całkowanie analityczne) waga posiadania umiejętności całkowania maleje... Oczywiście należy zachować rozsądek, posiadanie kalkulatora nie zwalnia bowiem nikogo z umiejętności dodawania. W tym wypadku, co akurat się nie zmieniło, kluczową kompetencją jest umiejętność krytycznej oceny uzyskanego wyniku, np. oszacowania, czy rząd jego wielkości dla użytych danych wejściowych jest w ogóle możliwy.

Ponadto w naszych progach rozgościły się już także narzędzia chatbot, wykorzystujące modele sztucznej inteligencji (AI), jak np.: Chat GPT, Microsoft Bing, Google Bard.

2.2. System szkolnictwa wyższego na poziomie regulacji ogólnokrajowych i wewnętrznych

W ciągu ostatnich 20 lat na wielu uczelniach kilkakrotnie podnoszone były minimalne wymiary prowadzenia zajęć dydaktycznych (pensum). Przykładowo dla profesora tytularnego ze 120 godz./rok (ponad 20 lat temu) do 180 godz./rok (obecnie).

Jednocześnie w systemie ewaluacji/oceny okresowej pracowników naukowo-dydaktycznych środek ciężkości został w znacznym stopniu przeniesiony na działalność naukową (m.in. publikacje w czasopiśmie naukowych, realizację projektów), co sprawia, że marginalizuje się ocenę jakości prowadzonej dydaktyki. Spada zatem motywacja do wysiłku i wdrażania zmian.

Często kuleje też system ankietowania studentów pod względem ocen pracowników dydaktycznych. Niestety często za ankietami i wskazanymi w nich niedociągnięciami nie podążają żadne zmiany. Studenci widzą brak sprzężenia zwrotnego, co skutkuje lawinowo spadającą liczbą wypełnianych ankiet. Błędne koło.

2.3. Nauczyciele, wykładowcy, profesorowie

Obciążanie dydaktyką wzrosło (wyższe pensum). Nacisk na twarde wyniki prac naukowych (np. publikacje) wzrósł. Zmiany osobowości, charakteru młodych ludzi, wspomagane galopującym postępem technologicznym, obserwujemy już nie w skali pokolenia, ale co mniej niż 10 lat (następują szybciej niż kiedyś). Bardziej niż poprzednim pokoleniom doskwiera nam niezrozumienie tak szybko zmieniającego się świata, nie tylko w zakresie dydaktyki. Czy poradzimy sobie z tymi problemami? Czy i co nas zmotywuje do zmian? Co nas zmotywuje do tego, aby odciąć się od tego, co było, dostrzec sens zmian i je wprowadzić? Nie rewolucyjnie, a ewolucyjnie.

³ Np.: $\int \cdot x^2 \cdot \sin^3(x) dx$: <https://www.wolframalpha.com/input?i=integrate+x%5E2+sin%5E3+x+dx>

3. Co dalej?

Co my (nauczyciele, wykładowcy, profesorowie) powinniśmy zrobić, aby zniwelować przepaść między nami a dzisiejszymi studentami? Czy w ogóle to jest nasz obowiązek? Czy może powinniśmy oczekiwać, że studenci zmienią swój styl życia i uczenia się, aby dopasować się do naszych oczekiwań/przyzwyczajzeń? Czy jesteśmy gotowi zaakceptować fakt, że obecna sytuacja nie jest wyłącznie winą studentów? Czy istnieje przestrzeń do zmian w systemach nauczania na naszych uczelniach? Gdzie ogranicza nas narzucony ogólnie system studiów? Czy powinniśmy forsować dobrze nam znany styl nauczania, czy też podążać za zmianami mentalności studentów, ich potrzebami i oczekiwaniami? Gdzie leży złoty środek? Jak bardzo powinniśmy się zmienić? W którą stronę powinniśmy pójść? Czy boimy się zmian? Co nas ogranicza? I tak dalej.

To tylko wybrane pytania, które pojawiają się dzisiaj w głowach wielu wykładowców. Wszystkie te pytania są otwarte. Są trudne. Ale też wszystkie zdecydowanie wymagają odpowiedzi i podjęcia skutecznego działania. Dwie odpowiedzi wydają się niewątpliwie jednoznaczne i powinny natchnąć nas optymizmem:

- Tak, naszym – **nauczycieli, wykładowców, profesorów** – obowiązkiem (ale też i ogromnym przywilejem) jest znalezienie właściwych odpowiedzi, wdrożenie właściwych rozwiązań, poprawa (naprawa?) metod, stylu i jakości nauczania.
- **Tak, powinniśmy się/coś zmienić**, a już na pewno powinniśmy spróbować to zrobić. Działać musimy już, tu i teraz!

4. Ale jak? – propozycje metod nauczania

Współczesna nauka, kognitywistyka, opisuje, jak mózg zdobywa i wykorzystuje informacje. Istotne znaczenie ma obserwacja dobrych wzorców nauczania (wykładowców–mistrzów). Uwzględniając metody wspomagające przyswojenie materiału czy też prezentację rozwiązań modelowych, otrzymujemy zbiór pomocnych zasad, znanych jako zasady nauczania Rosenshine’a [1]: (1) codzienna powtórka materiału; (2) prezentacja nowego materiału metodą małych kroków; (3) zadawanie pytań; (4) prezentowanie modelowych rozwiązań; (5) ćwiczenia pod kierunkiem nauczyciela; (6) sprawdzanie poziomu zrozumienia przez uczniów; (7) osiąganie wysokiego wskaźnika sukcesu; (8) tworzenie tzw. rusztowań do pracy nad trudnymi zadaniami; (9) samodzielna praca; (10) powtórki cotygodniowe i comiesięczne.

Jako kanwę do dyskusji przedstawiono wybrane niestandardowe metody dydaktyczne, przetestowane przez autora (we wczesnej fazie, intuicyjnie, bez świadomości naukowego podłoża takiego działania) w nauczaniu przedmiotu transport ciepła i masy na Politechnice Śląskiej. Są to: wykorzystanie medium społecznościowego jako narzędzia pomocniczego w procesie nauczania (co wpisuje się m.in. w zasady 1, 3, 4, 10 z powyższej listy) oraz ideę angażowania studentów w projekty typu PBL [2] (m.in. zasady 5, 7, 9).

4.1. Media społecznościowe: Facebook

Borykając się z wieloma spośród wskazanych wyżej problemów, autor zastanawiał się, jak dotrzeć do studentów. Mimo że szczęśliwie frekwencja na wykładach drastycznie nie spadała, to materiały dydaktyczne publikowane w systemach uczelnianych i na stronach internetowych często trafiały w próżnię (zmotywowani studenci z nich korzystali, ale ci z grupy mało zmotywowanych nawet się tam nie logowali). O wizytach w bibliotece i korzystaniu z podręczników i ze zbiorów zadań nawet nie było co marzyć... Powracało pytanie: jak dotrzeć do statystycznej większości?

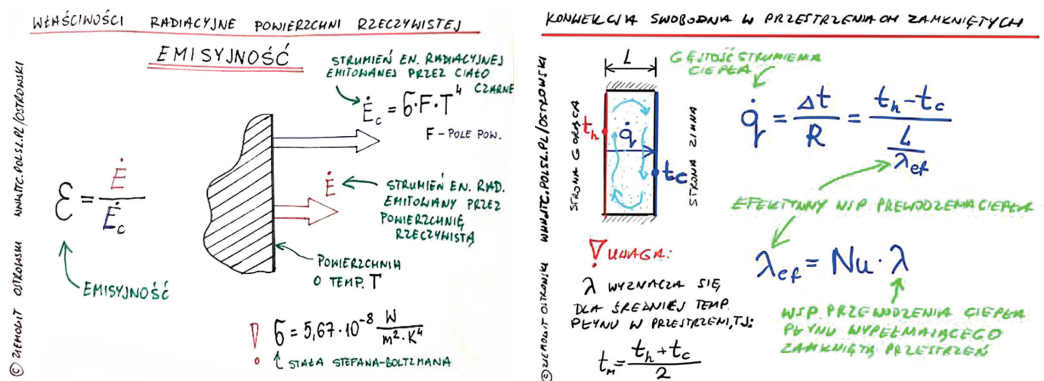
Rozwiązaniem okazały się media społecznościowe. Po rozpoznaniu autor wybrał w 2016 roku serwis Facebook, z którego korzysta przytłaczająca większość studentów, a odpowiednio zredagowane posty pojawiają się (powiadomienia!) od razu na ekranach odbiorców. Dodatkowo jest to forma komunikacji, do jakiej współcześni studenci są przyzwyczajeni, którą akceptują, lubią i której używają.

W świetle m.in. zasad 1 i 10 Rosenshine’a autor zdecydował się na publikowanie z częstotliwością 2–3 razy na tydzień krótkich, często graficznych, kolorowych, postów, których czas czytania nie przekroczy 3–4 minut (rys. 1)⁴, utrwalających materiał przekazany podczas

⁴ Prowadzone przez autora na FB tzw. „fanpage” zmieniają się; co semestr są otwierane nowe, a zamykane stare, tak aby materiał pojawiał się dla studentów przyrostowo w każdym roczniku. Można je wyszukać po hasło „TCiM”.

wykładu lub ćwiczeń tablicowych. Przyjęto, że taka powtórka powinna mieć miejsce ok. 1–2 tygodni po przerobieniu danego materiału na zajęciach.

Okazało się, że przekaz dociera także do tych mniej zmotywowanych, co więcej, zostało to bardzo ciepło przyjęte przez studentów: „Ciekawe wykorzystanie mediów społecznościowych Facebook z regularnie publikowanymi notkami z wykładów, które w przyjemny sposób pozwoliły powtarzać podstawową wiedzę”, „Profil na Facebooku stanowił ciekawą formę powtórki kluczowych wzorów, praw oraz pojęć”, „Rozwiązywanie zadań z kolokwium i wrzucenie ich na Facebooka 10/10” to tylko przykłady komentarzy wybrane z anonimowych ankiet.



Rys. 1. Przykładowe posty powtórzeniowe z przedmiotu transport ciepła i masy, kurs inżynierski

4.2. Projekty PBL – Project Based Learning

Według idei zaprezentowanej w [2] projekty realizowane od kilku lat m.in. na Politechnice Śląskiej zakładają podejście ukierunkowane na studenta: projekty—zadania realizowane w małych grupach (często interdyscyplinarnych). W ramach prac studenci identyfikują problem, podsumowują i uzupełniają konieczną wiedzę, poszukują danych i narzędzi wymaganych do rozwiązania problemu i zdobywają je, ostatecznie rozwiązują zadanie i przygotowują raport końcowy. Jednocześnie rozwijają umiejętności miękkie: zarządzają pracą zespołu i przepływem informacji, ćwiczą komunikację w zespole itp. Wpisuje się to m.in. w zasady nauczania 5, 7 i 9.

Podsumowanie

Przedstawione metody dydaktyczne są próbą realizacji nowoczesnych zasad nauczania. Zostały wybrane, ponieważ ich stosowanie jest możliwe nawet w istniejącej strukturze i w tradycyjnym schemacie dydaktyki (wykład—ćwiczenia—laboratorium) prowadzonej na uczelniach w Polsce, a więc także tam, gdzie nie wprowadzono jeszcze istotnych zmian obejmujących dydaktykę.

Autor wierzy, że ten krótki referat stanie się przyczynkiem do szerszej dyskusji. Podzielmy się naszymi obserwacjami, pomysłami, sposobami, doświadczeniami i dobrymi praktykami.

Literatura

- [1] Rosenshine B. Zasady nauczania. Fundacja Naukowa Evidence Institute, Warszawa 2019.
- [2] Nilson L.B. Teaching at its best: a research-based resource for college instructors. 2nd ed. Jossey-Bass, San Francisco, CA 2010.

Zastosowanie OZE do zabezpieczenia produkcji kielków warzywnych o podwyższonych parametrach jakościowych doświetlanych światłem LED

Marcin Panowski

Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa

e-mail: marcin.panowski@pcz.pl

Streszczenie

Przemysłowa uprawa kielków warzywnych jest procesem energochłonnym, wymagającym znacznych ilości ciepła do przygotowania wody zużywanej do nawadniania wzrastających kielków oraz energii elektrycznej niezbędnej do napędu wszystkich niezbędnych urządzeń. Ponadto w uprawie kielków słonecznika energia elektryczna wykorzystywana jest w procesie doświetlania uprawy np. lampami LED, w celu przyspieszenia procesu uprawy i uzyskania produktu o określonych parametrach jakościowych. Badania przemysłowe zrealizowane w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0058/19 wykazały, że możliwe jest sterowanie procesem doświetlania światłem LED kielków słonecznika w taki sposób, aby produkt końcowy charakteryzował się określonymi cechami jakościowymi. W uprawie kielków kluczowe znaczenie ma jednak zapewnienie stałości parametrów procesowych w całym cyklu uprawy, a w szczególności zabezpieczenie dostaw energii elektrycznej niezbędnej nie tylko do zasilania systemu doświetlającego, ale także do napędu urządzeń w systemie dostarczania kielkom niezbędnej wody oraz zasilania systemu sterowania i kontroli. W pracy zaprezentowano rezultaty badań wpływu doświetlania uprawy kielków słonecznika sztucznym światłem typu LED na parametry jakościowe kielków, a także analizę możliwości zabezpieczenia uprawy kielków słonecznika poprzez zastosowanie instalacji fotowoltaicznej, dla różnych scenariuszy produkcyjnych. Wyniki prac wykazały, że dla analizowanej linii technologicznej do przemysłowej uprawy kielków słonecznika istnieje możliwość zabezpieczenia produkcji poprzez zastosowanie systemu fotowoltaicznego, niezależnie od wybranych scenariuszy produkcyjnych, jednak skuteczne zabezpieczenie produkcji, szczególnie w okresie zimowym, wymaga wykorzystania magazynu energii.

Słowa kluczowe: OZE, fotowoltaika, kielki, doświetlanie LED

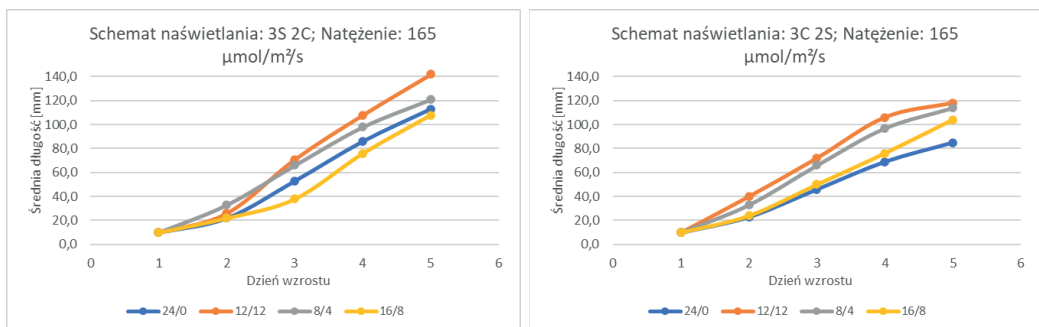
1. Wstęp

Sektor produkcji żywności i rolnictwa jest jednym z najważniejszych sektorów gospodarki, a energia elektryczna i ciepło są niezbędne zarówno w hodowli zwierząt, jak i w uprawie roślin [1]. Duże uzależnienie upraw roślinnych przede wszystkim od energii elektrycznej stwarza ryzyko utraty całych zbiorów w wyniku okresowych niedoborów energii [2]. Przerwy te mogą wynikać z różnego rodzaju awarii (np. przeciążenia sieci) lub ekstremalnych warunków pogodowych [3, 4]. Dla zapewnienia bezpieczeństwa i ciągłości produkcji niezbędne jest zastosowanie systemu zasilania awaryjnego, który poprawia jakość i bezpieczeństwo dostaw energii dla celów prowadzenia uprawy. Przemysłowa uprawa kielków warzywnych jest także procesem energochłonnym, wymagającym znacznych ilości ciepła oraz energii elektrycznej. Szczególnym z tego punktu widzenia procesem jest uprawa kielków słonecznika, które wymagają zapewnienia odpowiednich warunków klimatycznych (termodynamicznych powietrza) w komorze wzrostowej, dużych ilości odpowiednio przygotowanej ciepłej wody do nawadniania, znacznych ilości energii elektrycznej niezbędnej do napędu pomp systemu nawadniania oraz energii elektrycznej zużywanej przez system doświetlania uprawy w okresie wybarwiania kielków. Należy podkreślić, że w zakresie produkcji przemysłowej kielków warzywnych (nie tylko słonecznika) kluczowe znaczenie ma zapewnienie ciągłości dostaw energii w trakcie całego cyklu produkcyjnego, albowiem nawet krótkotrwały brak energii może doprowadzić do konieczności utylizacji całej partii produkcyjnej. Zabezpieczenie energetyczne uprawy może być zrealizowane z wykorzystaniem paneli PV wraz z magazynem energii (system PV-BESS), który to system może poprawić jakość i bezpieczeństwo dostaw

energii [5]. Magazyny energii są niezbędnym elementem systemu, który pozwala na zbilansowanie podaży i popytu na energię elektryczną. Wykorzystanie do tego celu akumulatorów jest uzasadnione ich skalowalnością, wysoką wydajnością, szybkim czasem reakcji oraz dużymi możliwościami sterowania [6–8]. W warunkach nadmiaru energii z systemu PV akumulatory są ładowane, a w przypadku przerw w zasilaniu sieciowym BESS przechodzi w stan rozładowania [9]. Jednak ze względu na wysokie koszty inwestycyjne systemów PV-BESS konieczne jest dokładne oszacowanie zapotrzebowania energetycznego zasilanego systemu, aby uniknąć przewymiarowania instalacji [10].

2. Zabezpieczenie uprawy z wykorzystaniem systemu PV-BESS

W celu określenia możliwości zabezpieczenia uprawy kielków słonecznika z wykorzystaniem systemu PV-BESS analizie poddano szereg scenariuszy produkcyjnych kielków, charakteryzujących się różnym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Analizowano scenariusze różniące się m.in. czasami i czasookresami doświetlania, rodzajami spektrum światła doświetlającego, natężeniem światła, jak również wydajnością systemu nawadniania oraz czasami i czasookresami nawadniania. Odpowiedni sposób doświetlania uprawy kielków słonecznika (np. lampami LED) oraz nawadniania uprawy ma istotne znaczenie nie tylko dla zapotrzebowania energetycznego uprawy, ale także dla uzyskania produktu o określonych parametrach jakościowych, takich jak np. odpowiednie wybarwienie kielków, wielkość i gramatura czy zawartość substancji prozdrowotnych. Przeprowadzone badania wpływu doświetlania uprawy kielków słonecznika sztucznym światłem typu LED wykazały, że możliwe jest sterowanie procesem doświetlania kielków słonecznika w taki sposób, aby produkt końcowy charakteryzował się określonymi cechami jakościowymi. Na rys. 1 przedstawiono przykładowe rezultaty badań wpływu schematu i czasookresów doświetlania na długość kielków dla wybranego spektrum światła i całkowitego natężenia $165 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, mierzonego na poziomie szczytu wzrastających kielków.



Rys. 1. Wpływ schematu i czasookresów doświetlania dla wybranego spektrum światła na długość kielków słonecznika

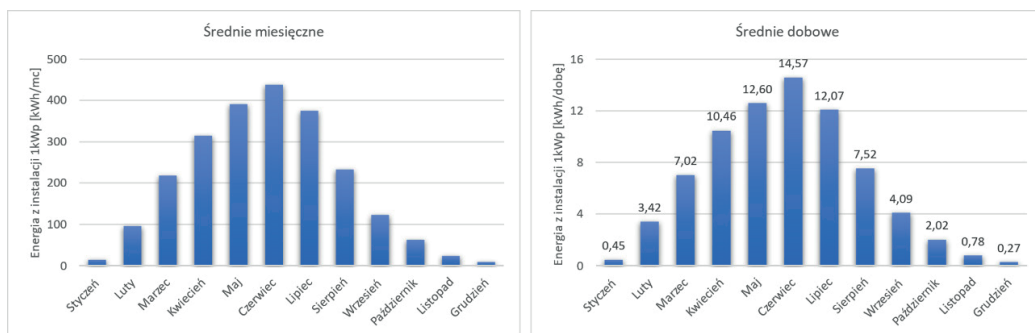
Schemat naświetlania oznaczony 3S 2C oznacza, że doświetlanie prowadzone było przez trzy pierwsze doby wzrostu, a przez dwie ostatnie doby wzrost prowadzony był w ciemności. Oznaczenie czasookresu doświetlania 8/4 oznacza, że w ciągu doby przez pierwsze 8 godzin realizowano doświetlanie, po czym następowały 4 godziny przerwy i ponownie kielki doświetlano przez 8 godzin, po czym następowały kolejne 4 godziny przerwy (sumarycznie w ciągu doby: 16 godzin doświetlania i 8 godzin w ciemności).

Wszystkie badania wpływu cech światła doświetlającego i sposobu doświetlania na jakość kielków umożliwiły wytypowanie warunków doświetlania uprawy pozwalających na dotrzymanie wymaganych parametrów jakościowych kielków i posłużyły następnie do określenia zapotrzebowania instalacji doświetlającej na energię elektryczną w ciągu całego cyklu produkcyjnego pojedynczej partii kielków słonecznika. Identyfikacji zapotrzebowania energetycznego systemu doświetlającego dokonano na podstawie badań modelowych. Na bazie opracowanych wytycznych w zakresie struktury i konstrukcji systemu doświetlania stworzono model symulacyjny, który posłużył do określenia zapotrzebowania energetycznego systemu doświetlającego dla różnych wytypowanych scenariuszy produkcyjnych uprawy. Przykładowe wyniki obliczeń dla wariantów przedstawionych na rys. 1 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowe zapotrzebowanie energetyczne systemu doświetlającego

Schemat doświetlania	Czasookres doświetlania	Ilość godzin naświetlania		Ilość lamp	Sprawność lampy	Natężenie światła	Moc zestawu lamp	Zużycie energii na	
		na dobę	na cykl					dobę	cykl
		h/dobę	h/cykl	szt.	%	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	W	kWh/dobę	kWh/cykl
3S 2C	24/0	24	72	34	58%	165	2108,6	50,6	151,8
	12/12	12	36					25,3	75,9
	8/4	16	48					33,7	101,2
	16/8	16	48					33,7	101,2
3C 2S	24/0	24	48	34	58%	165	2108,6	50,6	101,2
	12/12	12	24					25,3	50,6
	8/4	16	32					33,7	67,5
	16/8	16	32					33,7	67,5

W bezpośredniej okolicy lokalizacji instalacji do uprawy kielków znajduje się farma PV, dzięki której pozyskano informacje o rzeczywistej ilości energii dostępnej z systemu PV w tej lokalizacji. Dane pozyskano dla trzech lat eksploatacji instalacji, a rozkład uśrednionych wartości miesięcznych oraz dobowych w poszczególnych miesiącach, w przeliczeniu na instalację o mocy 1 kWp, zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Średnie trzyletnie i dobowe wartości energii elektrycznej z systemu PV o mocy 1 kWp

Na podstawie zapotrzebowania energetycznego systemu doświetlającego oraz potencjału energii słonecznej z systemu PV dokonano oszacowania wielkości systemu fotowoltaicznego dla różnych scenariuszy produkcyjnych, a przykładowe wyniki dla dobowego podtrzymania produkcji oraz podtrzymania produkcji pełnego cyklu uprawy zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Wielkości systemu fotowoltaicznego dla podtrzymania dobowego i pełnego cyklu uprawy

Schemat doświetlania	Czasookres doświetlania	Zapotrzebowanie		Podtrzymanie dobowe		Podtrzymanie cyklu	
		na dobę	na cykl	Moc PV	Pojemność akumulatora 50V	Moc PV	Pojemność akumulatora 50V
		kWh/dobę	kWh/cykl	kWp	Ah	kWp	Ah
3S 2C	12/12	25,3	75,9	50	400	160	800
	24/0	50,6	151,8	100	600	320	1600
3C 2S	12/12	25,3	50,6	50	400	100	600
	24/0	50,6	101,2	100	600	220	1000

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wpływu cech światła typu LED na jakość kielków słonecznika wykazały możliwość kształtowania cech jakościowych kielków poprzez odpowiednie sterowanie procesem doświetlania. Wymaga to jednak stałości dostaw energii elektrycznej dla podtrzymania produkcji w przypadku braku zasilania z sieci. Analizy zapotrzebowania energetycznego systemu doświetlającego dla różnych scenariuszy produkcyjnych wykazały zmienne zapotrzebowanie na energię elektryczną systemu doświetlającego, co powoduje trudności w odpowiednim doborze systemu zabezpieczenia energetycznego na bazie paneli PV z magazynem energii. W pracy zaprezentowano wybrane wyniki oszacowania wielkości systemu PV-BESS dla rzeczywistej instalacji do uprawy kielków słonecznika w różnych warunkach produkcyjnych.

Podziękowania

Badania współfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0058/19 oraz z dotacji statutowej Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej.

Literatura

- [1] Candélise C. et al. An empirical assessment of the effects of electricity access on food security. *World Dev.* 2021; 141: 105390.
- [2] Karkacier O. et al. A regression analysis of the effect of energy use in agriculture. *Energy Policy* 2006; 34: 3796–3800.
- [3] Staszewski Ł., Rebizant W. DLR-supported overcurrent line protection for blackout prevention. *Electr. Power Syst. Res.* 2018; 155: 104–110.
- [4] Perera A.T.D. et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nat. Energy* 2020; 5: 150–159.
- [5] Brudermann T. et al. Photovoltaics in agriculture: a case study on decision making of farmers. *Energy Policy* 2013; 61: 96–103.
- [6] Christiansen C., Murray B. Energy Storage Study. Funding and knowledge sharing priorities. AECOM Australia Pty Lts 2015; <https://arena.gov.au/assets/2015/07/AECOM-Energy-Storage-Study.pdf> (dostęp 2 maja 2022).
- [7] Rana M.M. Peak load shaving in isolated microgrid by using hybrid PV-BESS system. *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.* 2020; 8: 7–14.
- [8] Mendis N. et al. Active power management of a super capacitor-battery hybrid energy storage system for standalone operation of DFIG based wind turbines. In: 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, NV, USA, October 2012: 1–8.
- [9] Abdi H. et al. Energy storage systems. In: *Distributed generation systems*, Elsevier 2017: 333–368.
- [10] Barakat S. et al. Investigating grid-connected green power systems' energy storage solutions in the event of frequent blackouts. *Energy Rep.* 2022; 8: 5177–5191.

Metoda Trefftza w wymianie ciepła przy wrzeniu w przepływie przez prostokątny minikanal

Anna Pawińska¹, Mirosław Grabowski², Sylwia Hożejowska¹, Mieczysław E. Poniewski²

¹ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

² Politechnika Warszawska, Filia w Płocku, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock

e-mail: a.pawinska@tu.kielce.pl; miroslaw.grabowski@pw.edu.pl; ztpsf@tu.kielce.pl; mieczyslaw.poniewski@pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono eksperymentalne i numeryczne badania dotyczące wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie wody destylowanej przez asymetrycznie ogrzewany poziomy, prostokątny minikanal. W trakcie eksperymentu zmierzono: temperaturę na wlocie i wylocie minikanalu, temperaturę w trzech punktach miedzianego bloku, strumień objętości przepływającej wody, ciśnienie na wlocie, spadek ciśnienia, natężenie i spadek napięcia dostarczanego do czterech grzejników umieszczonych na zewnętrznej stronie bloku. Przez przezroczystą boczną ściankę kanału obserwowano i rejestrowano struktury przepływu dwufazowego.

W obliczeniach założono, że w module pomiarowym panuje stan ustalony, a właściwości termiczne stałych elementów modułu pomiarowego i przepływającej wody nie zależą od temperatury. Opory przepływu oszacowane na podstawie modelu homogenicznego posłużyły do wyznaczenia – z rozwiązania równania Poissona – prędkości mieszanej w minikanale. Założono też, że temperatura cieczy w minikanale spełnia równanie zachowania energii z warunkami brzegowymi zależnymi od danych eksperymentalnych. Oba równania różniczkowe rozwiązano metodą Trefftza z zastosowaniem dwóch różnych zbiorów funkcji Trefftza. Znajomość rozkładu temperatury w miedzianym bloku i minikanale pozwoliła wyznaczyć – na podstawie warunku brzegowego Robina – współczynnik przejmowania ciepła. W pracy zaprezentowano również krzywe wrzenia.

Słowa kluczowe: wrzenie w przepływie, minikanal, opory przepływu, metoda Trefftza

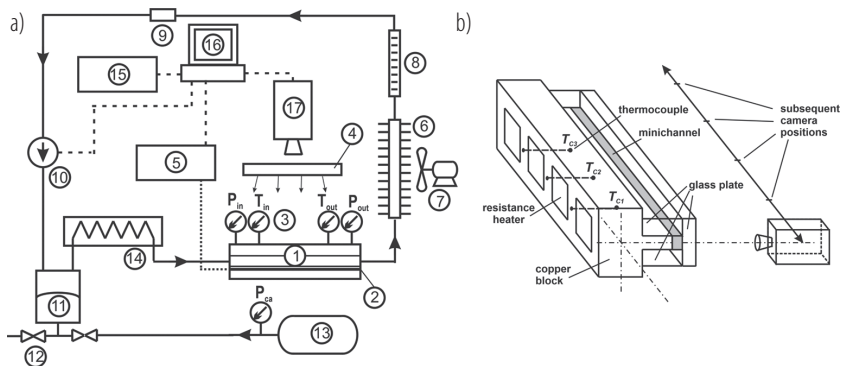
1. Wprowadzenie

Wymiana ciepła przy wrzeniu w przepływie przez minikanaly pozostaje wciąż przedmiotem szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych i numerycznych przedstawionych w [1–4]. Eksperymentalne badania przepływów w mini- i mikrokanalach skupiają się na przepływie z wrzeniem i – w mniejszym stopniu – na kondensacji. Złożone dwufazowe modele przepływu z wrzeniem wymagają wielu upraszczających założeń lub trudnych do zmierzenia danych eksperymentalnych. Z tego powodu opracowano szereg modeli dla specyficznych przypadków wrzenia, takich jak trójstrefowy model dla przepływu wydłużonych pęcherzyków pary [5, 6] czy model dla przepływu pierścieniowego [7], które są charakterystycznymi przepływami dla kanałów mini i mikro.

Prezentowane w pracy wyniki obliczeń uzyskano bezsiatkową metodą Trefftza, która pozwala na otrzymanie stabilnych rozwiązań zagadnień odwrotnych wymiany ciepła [8, 9]. Ideą metody Trefftza jest przybliżanie nieznanego rozwiązania równania różniczkowego kombinacją liniową funkcji, tzn. funkcji Trefftza, spełniających dokładnie równanie różniczkowe. Nieznane współczynniki kombinacji liniowej są wyznaczone przez minimalizację błędów średniokwadratowych pomiędzy nieznaną funkcją a przyjętymi warunkami brzegowymi [10]. W pracy wyznaczono metodą Trefftza prędkość cieczy w minikanale oraz jej temperaturę.

2. Stanowisko eksperymentalne

Stanowisko eksperymentalne (rys. 1) umożliwiło wymuszenie przepływu o niskiej liczbie Reynoldsa w minikanale i doprowadzenie przepływającej cieczy do wrzenia.



Rys. 1. Schemat stanowiska eksperymentalnego (a): 1 – sekcja pomiarowa z minikanalem, 2 – miedziany blok grzejny, 3 – czujniki temperatury i ciśnienia (Czaki K-type, TP-201; Kobold, 0–2,5 bar), 4 – oświetlacz LED, 5 – zasilacz wysokoprądowy (TDK Lambda), 6 – chłodnica, 7 – wentylator, 8 – rotametr (Heinrichs), 9 – filtr, 10 – precyzyjna pompa zębata (Tuthill Concord DGS 38 PP), 11 – zadajnik ciśnienia, 12 – zawory sterujące sprężonym powietrzem, 13 – zbiornik sprężonego powietrza, 14 – podgrzewacz wstępny, 15 – moduł kontrolno-pomiarowy (NI cDAQ-9178), 16 – komputer sterujący eksperymentem z oprogramowaniem utworzonym w środowisku LabView, 17 – kamera wideo o dużej szybkości działania (Phantom 711, Vision Research), P_{ca} – czujnik ciśnienia sprężonego powietrza; T_{in} , P_{in} – temperatura i ciśnienie na wlocie do minikanалу, T_{out} , P_{out} – temperatura i ciśnienie na wylocie z minikanалу; b) widok ogólny minikanalu oraz kolejnych położeni kamery wideo, T_{c1} , T_{c2} i T_{c3} – miejsca zamocowania termopar w bloku grzejnym

Podstawowym elementem stanowiska jest sekcja pomiarowa z minikanalem o przekroju prostokątnym i wymiarach: długość 180 mm, szerokość 4 mm, głębokość 1,5 mm. Minikanal powstał poprzez sklejenie trzech przezroczystych płyt szklanych i prostokątnego wyfrezowanego bloku miedzianego (rys. 1b). Ciepło generowane było przez umieszczone na zewnętrznej powierzchni bloku cztery płaskie rezystory grzejne, zasilane wysokoprądowym zasilaczem prądu stałego. Do oświetlenia kanału wykorzystano autorski system iluminatora oparty na elementach LED, a w module pomiarowym umieszczono pięć termopar: jedną na wlocie, jedną na wylocie z minikanalu i trzy wewnątrz miedzianego bloku. Na wlocie i wylocie kanału umieszczone zostały dwa czujniki ciśnienia. Przepływ wody destylowanej generowany był przez precyzyjną pompę zębatą.

3. Wyznaczanie prędkości cieczy i jej temperatury

W prezentowanym podejściu założono, że w module pomiarowym panuje stan ustalony, a temperatura miedzianego bloku T_c na powierzchni kontaktowej z rezystorami spełnia równanie Fouriera:

$$-\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial y} = q \quad (1)$$

gdzie q oznacza gęstość strumienia ciepła, a λ_c to współczynnik przewodzenia ciepła miedzianego bloku. Znajomość wyników pomiarów temperatury bloku w trzech jego punktach wewnętrznych T_{c1} , T_{c2} i T_{c3} (rys. 1b) oraz zastąpienie w (1) pochodnej $\partial T_c / \partial y$ ilorazem różnicowym pozwala wyznaczyć temperaturę bloku T_c na powierzchni kontaktowej z wodą.

Dla cieczy założono, że jej przepływ w minikanale jest laminarny o stałym natężeniu przepływu i wektorze prędkości z jedną niezerową składową v , równoległą do kierunku przepływu, która spełnia równanie Poissona:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -\frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (2)$$

z jednorodnymi warunkami Dirichleta na brzegu kanału. W równaniu (2) μ oznacza lepkość dynamiczną wody, a opory przepływu $\Delta p / \Delta L$ wyznaczono na podstawie modelu homogenicznego [11]. Temperatura cieczy T_f w minikanale spełnia równanie zachowania energii w postaci:

$$\lambda_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) = \rho_f c_p f \bar{v} \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad (3)$$

gdzie \bar{v} oznacza prędkość średnią, a ρ_f i $c_{p,f}$ to odpowiednio gęstość cieczy i jej ciepło właściwe. Dla równania (3) przyjęto, że znana jest temperatura wody na wlocie i wylocie do/z minikanalu oraz że blok miedziany i ciecz w minikanale są w idealnym kontakcie termicznym. Równania różniczkowe (2) i (3) rozwiązano, stosując metodę Trefftza, jak w [10].

Przyjęte założenia i znajomość rozkładów temperatur bloku miedzianego i cieczy pozwalają na wyznaczenie liczby Nusselta ze wzoru:

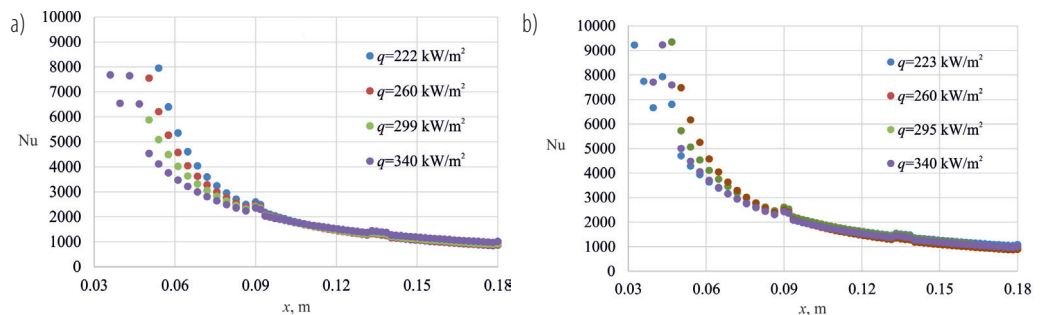
$$Nu = \frac{q}{T_c - \bar{T}_f} \cdot \frac{L}{\lambda_f} \quad (4)$$

gdzie średnią temperaturę odniesienia \bar{T}_f wyznaczono jak w [12].

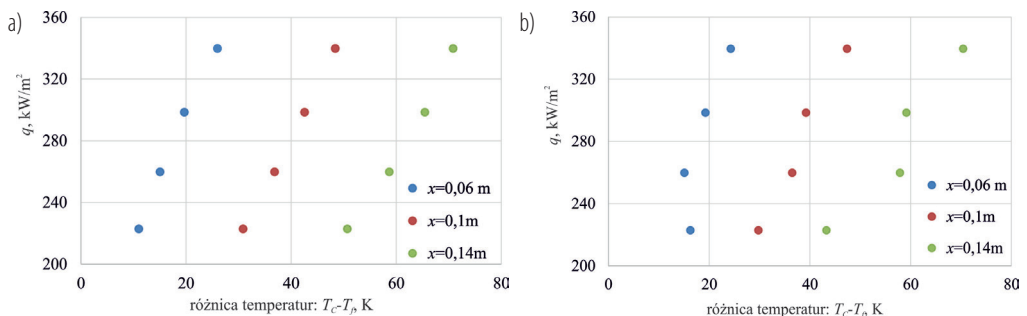
Wyniki i wnioski

Obliczenia wykonano dla: dwóch gęstości strumienia masy $G_1 = 60 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ i $G_2 = 104 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, gęstości strumienia ciepła z zakresu 223–340 kW/m^2 , ciśnienia na wlocie do minikanalu w zakresie 7,3–14,6 kPa. Przepływy realizowano przy niskiej liczbie Reynoldsa, tj. $390 < Re < 670$.

Z przeprowadzonych eksperymentów i analizy wyników otrzymanych metodą Trefftza wynika, że: (i) współczynnik przejmowania ciepła malejąca wraz z wzrostem odległości od wlotu do minikanalu, co było efektem wzrostu stopnia zapełnienia w minikanale; (ii) dla wyższych wartości strumienia masy współczynnik przejmowania ciepła osiągał wyższe wartości; (iii) kształt krzywych wrzenia dla wyższych wartości strumienia masy wskazywał na niestabilny przebieg procesu wrzenia; (iv) średnie względne błędy między oporami przepływu wyliczonymi z modelu jednorodnego i zmierzonymi eksperymentalnie wynoszą odpowiednio 13% dla $G_1 = 60 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ i 20% dla $G_2 = 104 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ (rys. 2, 3).



Rys. 2. Liczba Nusselta w funkcji długości kanału dla: a) $G_1 = 60 \text{ kg}/(\text{s m}^2)$; b) $G_2 = 104 \text{ kg}/(\text{s m}^2)$



Rys. 3. Krzywe wrzenia dla: a) $G_1 = 60 \text{ kg}/(\text{s m}^2)$; b) $G_2 = 104 \text{ kg}/(\text{s m}^2)$

W przyszłości planuje się kontynuację badań dla przypadków stanów nieustalonych opartych na modelu rozdzielonym Lockharta–Martinello. W wyznaczaniu rozkładu temperatury cieczy metodą Trefftza rozważa się uwzględnienie prędkości cieczy, zależnej od zmiennego w czasie oporu przepływu.

Podziękowania

Badania finansowane częściowo z grantu NCN nr UMO-2018/31/B/ST8/01199.

Literatura

- [1] Kandlikar S.G. History, advances, and challenges in liquid flow and flow boiling heat transfer in microchannels: a critical review. *J. Heat Transf.* 2012; 134: 034001.
- [2] Kharangate C.R. et al. Effects of two-phase inlet quality, mass velocity, flow orientation, and heating perimeter on flow boiling in a rectangular channel. Part 1: Two-phase flow and heat transfer results. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016; 103: 1261–1279.
- [3] Płaczkowski K. et al. Novel twofold use of photographic technique for simultaneous flow boiling image recording and void fraction computation in a minichannel experiment. *Energies* 2021; 14: 4478.
- [4] Cheng L., Xia G. Fundamental issues, mechanisms and models of flow boiling heat transfer in microscale channels. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017; 108: 97–127.
- [5] Thome J.R. et al. Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part I: Presentation of the model. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2004; 47: 3375–3385.
- [6] Dupont V. et al. Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part II: Comparison with the database. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2004; 47: 3387–3401.
- [7] Guo Z. et al. Numerical simulation of annular flow hydrodynamics in microchannels. *Comput. Fluids* 2016; 133: 90–102.
- [8] Maciąg A., Walaszczyk M. The usage of the Trefftz method to determine the Biot number. *J. Appl. Math. Comput. Mech.* 2017; 16: 47–55.
- [9] Movahedian B. et al. A Trefftz method in space and time using exponential basis functions: application to direct and inverse heat conduction problems. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2013; 37: 868–883.
- [10] Hożejowski L., Hożejowska S. Trefftz method in an inverse problem of two-phase flow boiling in a minichannel. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2019; 98: 27–34.
- [11] Asadi M. et al. A review of heat transfer and pressure drop characteristics of single and two-phase microchannels. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014; 79: 34–53.
- [12] Grabowski M. et al. Heat transfer coefficient identification in minichannel flow boiling with hybrid Picard–Trefftz method. *Energies* 2018; 11: 2057.

Analiza pracy pośredniego propanowego układu chłodniczego wyposażonego w pętlę cyrkulacyjną z dwutlenkiem węgla

Mateusz Pawłowski, Jerzy Gagan

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

e-mail: m.pawlowski@pb.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono modelowe rozważania dotyczące konfiguracji pośredniego propanowego systemu chłodzenia wyposażonego w pętlę cyrkulacyjną, wykorzystującą dwutlenek węgla jako medium robocze. Proponowana konfiguracja systemu jest przeznaczona przede wszystkim dla komercyjnych systemów chłodniczych. Szczególną uwagę zwrócono na rozważania analityczne dotyczące pętli cyrkulacyjnej z dwutlenkiem węgla. Model został sformułowany w celu określenia optymalnej wysokości słupa cieczy na podstawie określenia dwufazowych oporów przepływu i szybkości wymiany ciepła w procesach parowania i skraplania. Przeanalizowano wpływ zmiany wydajności chłodniczej układu na współczynnik efektywności COP całego układu pośredniego. Analizę przeprowadzono dla trzech różnych temperatur parowania dwutlenku węgla przy obciążeniu cieplnym parownika w zakresie od 0,5 kW do 10 kW. Udowodniono, że COP systemu wzrasta wraz ze wzrostem wydajności chłodniczej. Układy pośrednie współpracujące z naturalną pętlą cyrkulacyjną z dwutlenkiem węgla powinny więc być projektowane do pracy przy możliwie najwyższej wydajności.

Słowa kluczowe: pętla cyrkulacyjna, dwutlenek węgla, układy pośrednie, opory przepływu

1. Wprowadzenie

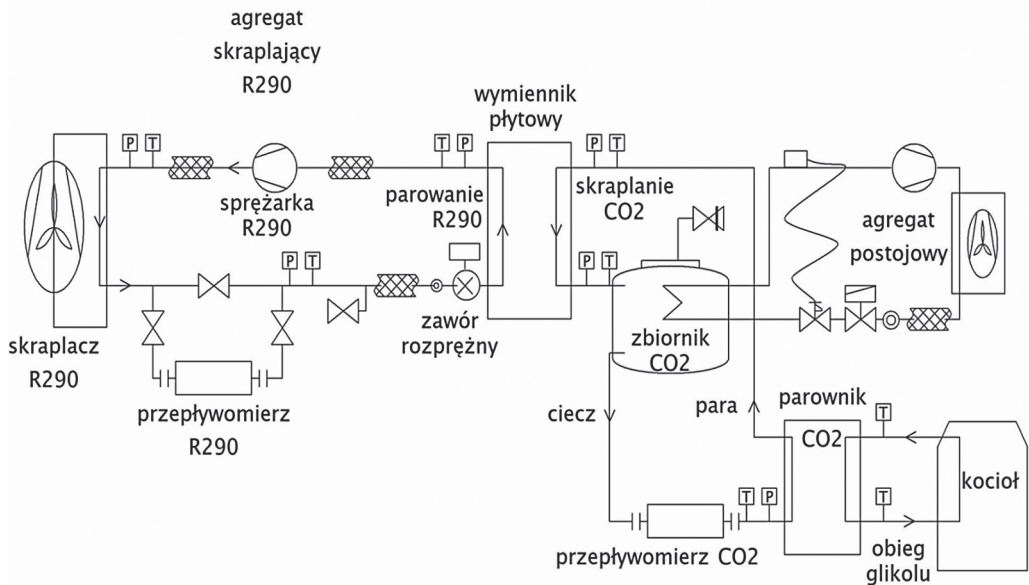
Chłodnicze układy komercyjne i przemysłowe, które wykorzystują naturalne czynniki robocze, zwykle muszą ograniczać ich ilość w obiegu z uwagi na palność czy wybuchowość. Interesującym rozwiązaniem jest wykorzystanie wymuszonej lub naturalnej pętli cyrkulacyjnej. Pierwszy przypadek dotyczy wymuszenia cyrkulacji pompy czy sprężarki, co znajduje zastosowanie m.in. w supermarketach czy instalacjach z kolektorami słonecznymi [1, 2]. Drugi przypadek to naturalna cyrkulacja czynnika wywołana wskutek różnicy gęstości faz oraz dobrania odpowiedniej wysokości słupa cieczy, czyli różnicy wysokości między parownikiem a skraplaczem. W takim przypadku samo ograniczenie liczby zastosowanych urządzeń daje wiele korzyści ekonomicznych i eksploatacyjnych. Efektem uproszczonej budowy i pasywnej pracy jest wysoka niezawodność tego systemu, który w rozwiązaniach chłodniczych znajduje zastosowanie np. do chłodzenia urządzeń elektronicznych [3], jako czynnik przenoszący ciepło w gruntowych pompach ciepła [4] oraz w domowych chłodziarkach [5].

W takich zastosowaniach korzystne staje się wykorzystanie jako czynnika roboczego dwutlenku węgla, z uwagi na jego niepalność oraz przyjazność wobec środowiska. Wraz z pojawiającymi się nowymi i interesującymi badaniami można zauważyć coraz większe zainteresowanie takimi układami. Podczas projektowania takich systemów bardzo istotne jest określenie odpowiedniej wysokości słupa cieczy, która gwarantuje poprawną pracę. Bai i in. [6] wykazali, że zbyt duża różnica wysokości między parownikiem a skraplaczem powoduje zbyt duże opory cieplne uniemożliwiające grawitacyjny obieg czynnika, natomiast zbyt mała wysokość nie pozwala na pracę systemu, ponieważ powoduje zalewanie parownika. Ważnym aspektem jest również dobranie odpowiedniej średnicy rurociągu. Tong i Zang [7] przeprowadzili badania pętli cyrkulacyjnej służącej do chłodzenia elektroniki w zależności od średnic rurociągu. Wyniki pokazały, że zbyt mała średnica powoduje znaczące przeciążenia systemu, natomiast zbyt duża powoduje liczne oscylacje, a nawet uniemożliwia pracę.

W pracy zostały podjęte rozważania na temat wpływu obciążenia termicznego pętli cyrkulacyjnej na efektywność całego układu chłodniczego. Przedstawiono model pozwalający na określenie optymalnej wysokości słupa cieczy w zależności od oporów przepływu dla zadanych parametrów początkowych pracy systemu.

2. Model układu chłodniczego

Analizowany system chłodniczy przedstawiono na rys. 1. Składa się on ze sprężarkowego propanowego agregatu i naturalnej pętli cyrkulacyjnej z dwutlenkiem węgla. Propanowy agregat chłodniczy ma główny obieg chłodniczy, składający się z półtermicznej sprężarki tłokowej, parownika płytowego i elektronicznego zaworu rozprężnego, oraz obieg pomocniczy z wymiennikiem wbudowanym w zbiornik do awaryjnego chłodzenia CO₂. Jednostka zasilająca ten obwód jest włączana sygnałem generowanym przez alarm ciśnieniowy na zbiorniku. Drugi obieg to pętla wymuszana grawitacyjnie, gdzie istotna jest prawidłowa wysokość słupa cieczy. W pętli cyrkulacyjnej znajdują się parownik płytowy CO₂, zbiornik oraz skraplacz CO₂, który jednocześnie pełni rolę parownika propanowego. Dodatkowym aspektem w badanym systemie jest osiągnięcie samoregulacyjnej pracy. Należy zauważyć, że brak elementu rozprężnego w pętli cyrkulacyjnej zmniejsza koszty inwestycyjne i eksploatacyjne oraz zwiększa atrakcyjność systemu.



Rys. 1. Schemat pośredniego propanowego układu chłodniczego sprzężonego z pętlą cyrkulacyjną z dwutlenkiem węgla (opracowanie własne)

2.1. Proces modelowania pętli cyrkulacyjnej

Modelowanie pracy naturalnej pętli cyrkulacyjnej jest procesem złożonym i pracochłonnym. Kluczowy aspekt stanowi wyznaczenie optymalnej wysokości skroplonego słupa CO₂. Wysokość musi być optymalna, ponieważ zbyt niska uniemożliwi pracę układu, natomiast zbyt wysoka znacząco zwiększy opory cieplne, prowadząc do destabilizacji [7]. Praca układu jest możliwa, gdy zostanie spełniony poniższy warunek:

$$\rho_L g \Delta h > \Delta p_g + \sum \Delta p_l + \sum \Delta p_m + \Delta p_p \quad [Pa] \quad (1)$$

gdzie: ρ_L – gęstość fazy ciekłej [kg/m³]; g – przyspieszenie ziemskie [m/s²]; Δh – wysokość słupa cieczy [m]; $\sum \Delta p_l$ – suma strat ciśnienia na długości w pętli (z wyjątkiem parownika) [Pa]; $\sum \Delta p_m$ – suma miejscowych strat ciśnienia w pętli [Pa]; Δp_p – straty ciśnienia w parowniku [Pa]; Δp_g – ciśnienie wywierane przez słup gazu zawarty w pionowej części przewodu gazowego.

Analizę pracy pętli oparto na wyznaczeniu oporów, rozpatrując poszczególne struktury przepływu w układzie z uwzględnieniem procesów parowania i skraplania CO₂ oraz poszczególnych strat miejscowych. Obliczone wartości przy przepływie dwufazowym CO₂ dla temperatury parowania –10°C oraz skraplania –8°C zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Obliczone opory przepływu w pętli cyrkulacyjnej

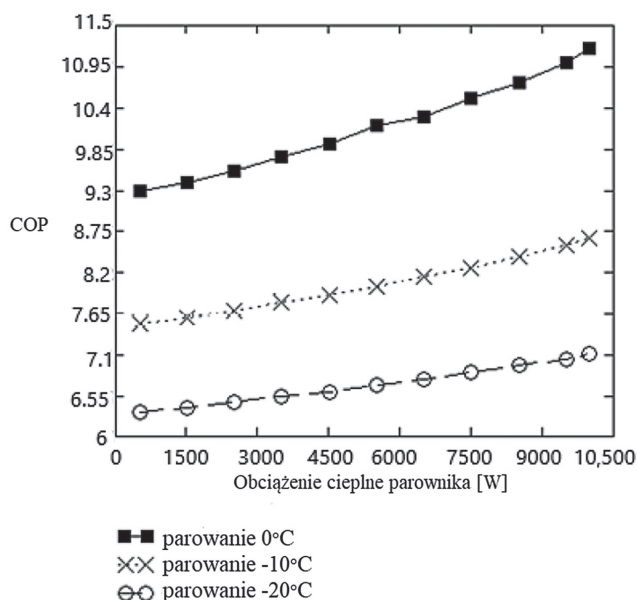
Całkowita strata ciśnienia w parowniku	$\Delta p_{total} = 10401,92 \text{ [Pa]}$
Całkowita strata ciśnienia w rurociągu ciekowym	$\Delta p_c = 582,151 \text{ [Pa]}$
Całkowita strata ciśnienia w rurociągu gazowym	$\Delta p_g = 23765,33 \text{ [Pa]}$
Suma strat ciśnienia w obiegu	$\Sigma \Delta p_{stat} = 34749,4 \text{ [Pa]}$

Przy wybranych parametrach obliczona optymalna wysokość słupa cieczy wynosi 3,9 m i dla takiej wysokości został zaprojektowany i wykonany układ badawczy. Rys. 2 przedstawia zdjęcie stanowiska eksperymentalnego, gdzie na górze podestu znajduje się agregat propa-nowy, natomiast na dole pętla cyrkulacyjna z dwutlenkiem węgla.



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego

Miejszem sprzężenia ze sobą dwóch obiegów jest wymiennik płytowy. W praktyce oznacza to, że zwiększenie temperatury skraplania CO_2 powoduje podwyższenie temperatury parowania propanu, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia współczynnika efektywności COP zgodnie z właściwościami termodynamicznymi czynników roboczych. Co więcej, wraz ze wzrostem obciążenia cieplnego parownika CO_2 wartość COP stale rośnie, co zostało pokazane na rys. 3.



Rys. 3. Wpływ temperatury parowania i obciążenia cieplnego na COP układu chłodniczego [8]

Wnioski

Podczas projektowania należy zwrócić szczególną uwagę na uzyskanie odpowiedniej różnicy wysokości między wymiennikami pętli cyrkulacyjnej, ponieważ ma to kluczowe znaczenie i umożliwia samoregulacyjną pracę systemu. Najwyższy współczynnik COP uzyskano dla temperatury parowania 0°C oraz przy najwyższym obciążeniu cieplnym parownika wynoszącym 10 kW. Wobec tego układ powinien pracować przy możliwie najwyższej wydajności chłodniczej, a temperatury parowania pozwalają na wykorzystanie systemu m.in. przy przechowywaniu żywności. Realizowane prace eksperymentalne nad układem pozwolą na wykonanie walidacji analizy modelowej i praktyczne wyznaczenie najbardziej optymalnych parametrów pracy obiegu.

Literatura

- [1] Karampour M., Sawalha S. State-of-the-art integrated CO₂ refrigeration system for supermarkets: a comparative analysis. *Int. J. Refrig.* 2018; 86: 239–257.
- [2] Allouhi A. et al. Forced-circulation solar water heating system using heat. *Energy* 2019; 180: 429–443.
- [3] Usman H. et. al. An experimental study of PCM based finned and un-finned heat sinks for passive cooling electronics. *Heat and Mass Transf.* 2018; 54: 3587–3598.
- [4] Oschner K. Carbon dioxide heat pipe in conjunction with a ground source heat pump. *Appl. Therm. Eng.* 2008; 28: 2077–2082.
- [5] Kumar A., Khalid S. CO₂ based natural circulation loops for domestic refrigerators. *Saudi J. Eng. Technol.* 2019; 4: 192–200.
- [6] Bai Y. et al. Numerical analysis of a closed loop two-phase thermosyphon under states of single-phase and supercritical. *Int. J. Heat Mass Flow Transf.* 2019; 135: 354–367.
- [7] Tong Z., Zang G. Effect of the diameter of riser and downcomer on an CO₂ thermosyphon loop used in data centre. *Appl. Therm. Eng.* 2021; 182: 116101.
- [8] Pawłowski M. et al. Assessment of efficiency of heat transportation in indirect propane refrigeration system equipped with carbon dioxide circulation loop. *Sustainability* 2022; 14: 10422.

Gold nanoparticles for photothermal water disinfection

Francesca Petronella¹, Daniela de Biase², Federica Zaccagnini², Maria Laura Sforza², Arianna Avitabile², Luciano De Sio²

¹ National Research Council of Italy, Institute of Crystallography CNR-IC, Area della Ricerca Roma 1 Strada Provinciale 35d, n. 9 - 00010 Montelibretti (RM), Italy

² Sapienza University of Rome, Department of Medico-Surgical Sciences and Biotechnologies, Corso della Repubblica, 79 04100 - Latina (LT), Italy

e-mail: francesca.petronella@ic.cnr.it

Abstract

New strategies are urgently required to contrast the fast spread of pathogens and their resistance to commonly used antibiotics. In this regard, gold nanoparticles, particularly gold nanorods (AuNRs), show enormous potential. Indeed, they are optimal thermo-optical transducers. Therefore, the absorbed electromagnetic radiation can be converted into heat, which can be exploited under suitable experimental conditions for pathogens inactivation. The present contribution overview our latest achievements in the field of AuNRs-mediated pathogens disinfection, starting from AuNRs dispersion in a water medium to AuNRs-based platforms, able to promote photo-thermal disinfection of medical tools from bacterial contamination under white light irradiation.

Keywords: gold nanorods, photothermal disinfection, *Escherichia coli*, thermoplasmonics

1. Introduction

The benefits of from humankind's cultural and technological progress come abreast by several issues that can endanger people's health. For instance, climate change, urbanization, overpopulation, globalization, and economic inequality add up to the spread of infectious diseases of the twenty-first century, causing outbreaks and re-emerging infections.

Water resources are deeply involved in these phenomena as most anthropic activities pollute water, threaten ecosystems, and cause an imbalance in the microorganism population, thus contributing to the spreading of infectious diseases. In particular, there is an increasing number of infections caused by antibiotic-resistant bacteria. Antimicrobial resistance has been caused by the massive use or misuse of antibiotics over the decades, with the risk of generating millions of deaths annually in the future [1]. For this reason, the scientific community is increasingly investigating new disinfection strategies [2]. In this direction, nanostructured materials offer a plethora of sustainable and effective solutions encompassing photocatalysis [3], controlled release [4], or antimicrobial coatings [5]. In this scenario, plasmonic nanoparticles (NPs), and gold NPs in particular, can be exploited to realize, at the nanoscale, the disinfection approach advanced by Louis Pasteur in the XIX century, relying on the effectiveness of heating to disinfect and sterilize surgical instruments, dressing, objects, and liquids [2].

Plasmonic NPs are characterized by the localized surface plasmon resonance phenomenon (LSPR). The electric field associated with the incident wave induces the formation of dipoles that oscillate due to the restoring forces. If the wavelength of the incident radiation is greater than or comparable to the size of the NP, the conditions exist for generating electron resonance. This phenomenon is amplified in noble metal NPs (Au, Ag, Cu, Pt) because the conduction electrons can freely travel through the material, an extremely localized object due to its dimension. The dipoles oscillate in different directions for each facet of the NP; therefore, there is a determined resonance frequency for each NP facet. Such a resonance frequency for noble metal NPs lies in the visible light's wavelength range. Therefore, the LSPR phenomenon can be easily observed by measuring the absorption spectrum of metallic (plasmonic) NPs. In the case of gold nanorods (AuNRs), having two main dimensions, there are two resonance frequencies and, consequently, two peaks, one associated with the longitudinal oscillations (LSPR_L) and the other with the transversal one (LSPR_T) [6].

LSPR determines a considerable amount of energy concentration in a very small area. At the resonant wavelength, absorption and scattering cross-section are significantly enhanced. Light is then converted into heat (photothermal conversion or thermoplasmonic effect), and this process takes the name of thermoplasmonic heating [7].

This photothermal (PT) conversion originates from the surface plasmons excitation and damping according to three PT effect mechanisms.

The first is thermoplasmonic heating in a metallic nanostructure. When light irradiates a plasmonic material, this material can absorb photons (and, consequently, energy) thanks to the significant number of free and polarizable electrons that can be promoted to an excited level. In particular, when the energy of an impinging photon equals the one associated with the LSPR band frequency, a resonant light absorption happens. The excited free electrons go from their intrinsic equilibrium state to a new configuration where they are redistributed on the surface and oscillate in phase with the external electromagnetic wave. Plasmons lose their coherent motion and decay very quickly. At this point, two different processes can happen to restore thermal equilibrium. The extra energy can be released through the following: the emission of photons; the Landau damping, which leads to the creation of electron-hole pairs.

A plasmon quantum takes 1 to 100 fs to transfer its energy to an electron-hole pair through the Landau damping. In this process, the absorbed photon energy is not lost. Indeed, the electrons generated due to the plasmons decay are energetic and, therefore, are called hot charge carriers. These particles lose energy through inelastic collisions with slow electrons, converting the lost energy into heat. The scattering timescale ranges from 100 fs to 1 ps. Then, the entire structure thermalizes thanks to the collisions between the low energy electrons and the metallic lattice phonons, with a single interaction characteristic time that goes from several ps to hundreds of ps. The electrons finally reach the ground state in the timescale of 100 ps/10 ns through phonon-phonon collisions, and all the extra thermal energy is transferred to the surrounding medium [7].

The thermoplasmonic properties of AuNPs are widely investigated for PT tumor ablation [8], however, the extremely localized heat generation can also be exploited as a very effective weapon for disinfection purposes.

2. Selected results

This work provides an overview of the latest efforts in utilizing AuNPs for achieving thermoplasmonic disinfection. Our efforts in this field mainly focus on near-infrared (NIR) absorbing AuNRs for their high PT conversion efficiency (η_{heat} or photothermal efficiency (PTE)). The PTE quantified for NPs irradiated at the LSPR_L wavelength, is illustrated by equation (1):

$$\eta_{heat} = \frac{(c_m m_m + c_{np} m_{np}) \Delta T}{I A \Delta t} \quad (1)$$

where c_m and m_m are the specific heat capacity and mass of surrounding medium, respectively, whereas c_{np} and m_{nm} are the specific heat capacity and mass of NPs. Equation (1) considers a source with power density I that illuminates an area A , covered with AuNRs, for a time Δt . For AuNRs, the efficiency has been estimated between 55% and 100%.

We have investigated the ability of colloidal dispersion of AuNRs in performing *Escherichia coli* (*E. coli*) disinfection, with the ultimate goal of enabling light-assisted antimicrobial therapies. The experimental procedure was designed to minimize both the amount of AuNRs and the amount of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), namely the capping agent necessary to synthesize AuNRs and ensure colloidal stability [9]. After the synthesis, AuNRs were subjected to several washing procedures to keep only a minimal amount of CTAB, suitable to ensure colloidal stability and *E. coli* viability. Indeed, the CTAB shows an intrinsic cytotoxicity that would hinder the investigation of the thermoplasmonic disinfection ability of AuNRs. The AuNRs ($C = 8.76 \times 10^{-11}$ M), once purified from the CTAB, were introduced in an Eppendorf tube containing *E. coli* dispersion 10^6 CFU/mL. The mixture was irradiated with a continuous wave laser emitting at 810 nm, and the thermoplasmonic heating was measured by a high-resolution thermal camera. The analysis of thermographic images allowed to build temperature plots in Fig. 1 from an elliptical region of interest (ROI), including the center of the illuminated area.

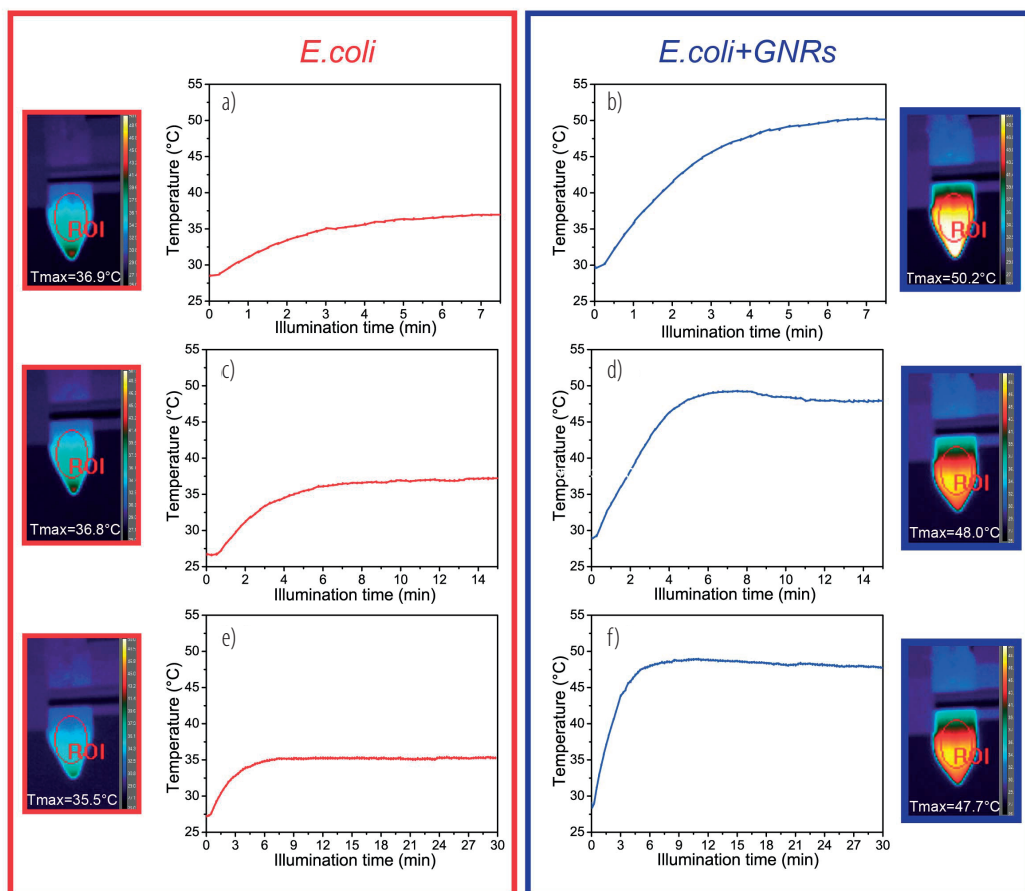


Fig. 1. Time-temperature profiles of the *E. coli* water dispersion in the absence (a, c, e), and in the presence of AuNRs (b, d, f), along with the corresponding thermographic image of the Eppendorf tube under NIR laser irradiation. Reproduced from reference [9]

Three illumination times were considered: 7.5 min (Fig. 1a, b), 15 min (Fig. 1c, d), and 30 min (Fig. 1e, f). Results reported in Fig. 1 highlight how the presence of AuNRs in the *E. coli* dispersion, irrespectively on the irradiation time, produced a temperature increase that accounts for the thermoplasmonic properties of AuNRs. An irradiation time of 5 min is sufficient to increase the temperature to 50°C. Under such a laser light irradiation, the thermoplasmonic heating produced by AuNRs was able to suppress living *E. coli* cells of about 2 log CFU, thus demonstrating the ability of AuNRs to behave as PT transducers to achieve disinfection.

Conclusion

We have demonstrated the potential of AuNRs as optical transducers to realize photothermal disinfection. In the first part, we showed the photothermal disinfection properties of AuNRs dispersed in a water medium contaminated by bacteria. This experience drove the realization of AuNRs-substrates that could promote *E. coli* inactivation under resonant light irradiation, namely with a laser emitting at 808 nm.

Most recently, with the support of a solid theoretical model [2, 10], we demonstrated that the PT heating produced by irradiating the AuNRs-substrates with white light could kill bacteria, thus enabling the decontamination of medical tools.

Acknowledgments

This work has been supported by the “NATO – Science For Peace and Security Programme (SPS-G5759, NANO-LC)”; by the Air Force Office of Scientific Research, Air Force Material Command, U.S. Air Force. “Digital optical network encryption with liquid-crystal grating metasurface perfect absorbers” FA8655-22-1-7007 (Pi.L. De Sio, EOARD 2022–2025), by the PHC Galilée 2022 “Photo-thermal therapy of melanoma cancer cells via antibody functionalized biomassderived carbon nanodots G22_63”; and by EU funding within the NextGenerationEU-MUR PNRR Extended Partnership initiative on Emerging Infectious Diseases (Project no. PE00000007, INF-ACT).

Literature

- [1] Petronella F. et al. Label-free and reusable antibody-functionalized gold nanorod arrays for the rapid detection of *Escherichia coli* cells in a water dispersion. *Environmental Science: Nano* 2022; 9: 3343–3360.
- [2] Zaccagnini F. et al. White light thermoplasmonic activated gold nanorod arrays enable the photo-thermal disinfection of medical tools from bacterial contamination. *Journal of Materials Chemistry B* 2023; 11: 6823–6836.
- [3] Petronella F. et al. Uniform TiO₂/In₂O₃ surface films effective in bacterial inactivation under visible light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2014; 279: 1–7.
- [4] Haider M.S et al. Aminated polyethersulfone-silver nanoparticles (AgNPs-APES) composite membranes with controlled silver ion release for antibacterial and water treatment applications *Materials Science and Engineering C* 2016; 62: 732–745.
- [5] Duygu Kışla et al. Recent developments in antimicrobial surface coatings: various deposition techniques with nanosized particles, their application and environmental concerns. *Trends in Food Science & Technology* 2023; 135: 144–172.
- [6] Eustis S. et al. Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: Noble metal surface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes. *Chemical Society Reviews* 2006; 35: 209–217.
- [7] Baffou G., *Thermoplasmonics: heating metal nanoparticles using light*. Cambridge University Press, Cambridge 2017.
- [8] Frantellizzi et al. 99mTc-labeled keratin gold-nanoparticles in a nephron-like microfluidic chip for photo-thermal therapy applications. *Materials Today Advances* 2022; 16: 100286.
- [9] Annesi F. et al. Thermo-plasmonic killing of *Escherichia coli* TG1 bacteria. *Materials* 2019; 12: 1530.
- [10] Radomski P. et al. Heat transfer of the multicolor-laser-sources-irradiated nanoparticles in reference to thermal processes. *Proceedings of ECOS Conference, 2023, June 25–30, Las Palmas de Gran Canaria, Spain*.