

XV KONFERENCJA
MŁODZI
W ENERGETYCE



PUBLIKACJE
KONFERENCYJNE



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

ORGANIZATORZY I PARTNERZY



Politechnika
Wroclawska



Wydział
Mechaniczno-Energetyczny

Wydział Mechaniczno-Energetyczny – Główny Organizator
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw



Koło Naukowe PWr Solar Boat Team
Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw



Koło Naukowe PWr in Space
Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw

KOMITET NAUKOWY

dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. uczelni – Przewodniczący
prof. dr hab. inż. Henryk Kudela – Honorowy Członek Komitetu Naukowego
Andrzej Jeżewski – Honorowy Członek Komitetu Naukowego
Remigiusz Nowakowski – Honorowy Członek Komitetu Naukowego

dr hab. inż. Wojciech Bujalski, prof. uczelni	dr hab. inż. Artur Rusowicz, prof. uczelni
prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz	dr hab. inż. Izabela Sówka, prof. uczelni
dr inż. Maciej Cholewiński	dr inż. Krystian Szczepański
dr hab. inż. Piotr Dzierwa, prof. uczelni	dr hab. inż. Piotr Szulc, prof. uczelni
dr hab. inż. Tomasz Hardy, prof. uczelni	dr inż. Przemysław Szulc
dr inż. Jakub Jurasz	dr hab. inż. Małgorzata Szulgowska-Zgrzywa, prof. uczelni
dr hab. inż. Bartosz Kaźmierczak, prof. uczelni	dr hab. inż. Kamil Śmierciew, prof. uczelni
prof. dr hab. inż. Piotr Kolasiński	prof. dr hab. inż. Dawid Taler
dr hab. inż. Tomasz Kujawa, prof. uczelni	dr hab. Grzegorz Tchorek, prof. uczelni
dr inż. Artur Machalski	dr hab. inż. Marcin Trojan, prof. uczelni
dr hab. inż. Ziemowit Malecha, prof. uczelni	dr hab. inż. Sławomir Wiśniewski, prof. uczelni
dr hab. inż. Magdalena Nems, prof. uczelni	dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski, prof. uczelni

KOMITET ORGANIZACYJNY

dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. uczelni – Przewodniczący

mgr inż. Beata Pytlík	dr inż. Maciej Cholewiński	Klaudia Szczepocka
mgr inż. Kamil Kowalski	dr inż. Przemysław Szulc	Kacper Tomaszewski
mgr inż. Jean-Marc Fařara	dr inż. Artur Machalski	Wiktoria Mrowiec
mgr inż. Dawid Sowa	mgr inż. Michał Lepszyc	mgr inż. Andrzej Frodyma
dr inż. Katarzyna Strzelecka	inż. Marta Stempniak	mgr Ewa Źuk



Ministerstwo
Edukacji i Nauki



Doskonała
Nauka

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa
w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Doskonała Nauka”

(nr projektu DNK/SP/547820/2022, kwota dofinansowania 150 000,00 zł,
całkowita wartość projektu 186 432,40 zł)

**XV Konferencja
„Młodzi w Energetyce”**

**PUBLIKACJE
KONFERENCYJNE**

Praca zbiorowa pod redakcją
Macieja Cholewińskiego, Beaty Pytlík
oraz Sławomira Pietrowicza



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2023

Kolegium redakcyjne:
Maciej Cholewiński, Beata Pytlik, Sławomir Pietrowicz

Opracowanie redakcyjne i korekta:
Maciej Cholewiński, Beata Pytlik

Korekta techniczna:
Stanisław Gancarz

Złożono na podstawie dostarczonych materiałów

Publikacja elektroniczna dostępna na stronach www:
Konferencji „Młodzi w Energetyce”
<https://kme.pwr.edu.pl/>
Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej
<http://www.oficyna.pwr.edu.pl/>
Dolnośląskiej Biblioteki Cyfrowej
<https://www.dbc.wroc.pl/>

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2023

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>, e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-243-1
<https://doi.org/10.37190/KME2023>

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

SPIS TREŚCI

Od Organizatorów	
Sławomir Pietrowicz	7
Od Organizatorów	
Piotr Szulc	8
REFERATY W JĘZYKU POLSKIM	
Adsorbcyjny magazyn chłodu	
Maria Albiniaak, Filip Sowiński, Michał Rynkun	11
Przegląd technologii modułowych reaktorów jądrowych pod kątem zastosowania w polskim systemie energetycznym	
Julia Brzozowska, Daria Sikorska	15
Pompa dwustrumieniowa w pracy turbinowej	
Anna Chernobrova, Piotr Szulc, Oleksand Moloshnyi	19
Analiza wpływu stopnia dwuprzepływowości na wybrane parametry eksploatacyjne silników turbowentylatorowych	
Maciej Cholewiński	21
Ocena CFD wewnątrz-komorowego, autonomicznego układu zawracania spalin, zastosowanego do mikroturbin gazowych zasilanych metanem w ujęciu współspalania wodoru	
Jean-Marc Fařara	27
Dyskretyzacja zaawansowanych modeli geometrycznych z wykorzystaniem Fluent Fault Tolerant Meshing Workflowna przykladzie kadłuba łodzi solarnej Solaris II	
Jakub Flak, Wojciech Pałka	31
Analiza awarii kotłůw wodnych opalanych gazem w elektrociepłowni miejskiej	
Mariusz Granda, Marcin Trojan, Piotr Dzierwa, Jan Taler	35
Wpływ temperatury ogniw fotowoltaicznych na parametry pracy modułu fotowoltaicznego	
Weronika Janowicz	41

Wpływ długotrwałego oddziaływania temperatury na zmianę mikrostruktury i właściwości użytkowych stali SUPER 304H o osnowie austenitycznej stosowanej w nowoczesnej energetyce Milena Kierat, Hanna Purzyńska, Lucie Pilsová	43
Drony – definicja, zastosowanie i przyszłość Michał Lepszy	49
Porównanie struktur przepływu oraz charakterystyk energetycznych pompy normowej użytkowanej jako pompa oraz turbina wodna Witold Lorenz, Marcin Janczak, Przemysław Szulc, Artur Machalski	51
Analiza porównawcza obliczeń teoretycznych i rzeczywistej pracy systemów fotowoltaicznych Marcin Michalski, Alan Ochman	55
Analiza FSI pulsacyjnej rurki ciepła Marcin Opalski	59
Ocena potencjału elektrowni szczytowo-pompowych na obszarach kopalni odkrywkowych województwa łódzkiego Mikołaj Ostraszewski, Jakub Jurasz	63
Topnienie materiału zmiennofazowego: wstępne wyniki eksperymentalnej walidacji symulacji numerycznych Szymon Pawliczek, Szymon Lech, Cezary Czajkowski	67
Analiza wykorzystania wybranych zamienników czynnika chłodniczego R134a w chillerach wody lodowej Maciej Pogorzelski, Artur Rusowicz	71
Energetyczne startupy, w co inwestują firmy z sektora energetycznego w Polsce i w Europie? Teodor Sawicki	73
Produkcja kobaltu-60 i bomby kobaltowej w warunkach domowych Daria Sikorska, Ewa Kielsa	77
Badania w zakresie współspalania zrbków drzewnych i węgla kamiennego w chemicznej pętli tlenkowej z zastosowaniem nośników tlenu Zuzanna Skitaniak, Rafał Łysowski, Ewelina Ksepko	81
Przegląd literatury dotyczącej współpracy układów Organic Rankine Cycle z akumulatorami ciepła Dawid Sowa, Piotr Kolasiński	83

Analiza numeryczna pulsacyjnej rurki ciepła z jedną pętlą Marta Stempniak, Przemysław Błasiak	85
Badania eksperymentalne wirników pompy wirowej z łopatką dzieloną Filip Zareba, Aneta Nycz, Przemysław Szulc	89

MANUSCRIPTS IN ENGLISH

Fe-Mn based oxygen carriers for Chemical Looping combustion of solid fuels Miratul Alifah, Zuzanna Skitaniak, Ewelina Ksepko	95
A preliminary study on the application of two-phase volumetric expanders in Kalina cycles Sindu Daniarta, Przemysław Błasiak, Piotr Kolasiński, Attila R. Imre	97
Design of partially evaporated Organic Rankine Cycle and trilateral flash cycle test-stand Sindu Daniarta, Dawid Sowa, Piotr Kolasiński	99
Utilization of plasma technology to minimize emissions of hazardous substances Tolganay Kaltay, Magzhan Orynbasar	101
Experimental setup for thermal analysis of evaporator's fin surface during frost formation occurring in domestic refrigerator Daria Krasota, Piotr Kolasiński, Przemysław Błasiak	103
Plasma ignition of coal: numerical simulation and experiment Vladimir Messerle, Magzhan Orynbasar, Halina Pawlak-Kruczek, Alexander Ustimenko	105
Application of the AP1000 nuclear power unit to supply heat to the district heating system Tefatsyon Simon Ochono, Melkamu Ada Anjulo, Wogen Yigebahal Zada, Belayneh Semahegn Ayalew	107
A system enhancing the efficiency of energy used in electric vehicles Mikołaj Rygallo	109
Determination of partial discharge location in cable cross-bonding system Anatolii Tymchenko, Bogdan Gorgan	111
Design challenges of designing an aerospike nozzle for additive manufacturing Paweł Wiatrzyk	115



WYKŁADY PLENARNE I GOŚCINNE

Airbus ZEROe – the aerospace future with hydrogen Anna Renata Adamczyk	119
Niskotemperaturowa energia odpadowa – jak ją efektywnie wykorzystać do produkcji chłodu? Jerzy Gagan, Kamil Śmierciew, Michał Łukaszuk, Dariusz Butrymowicz, Andrzej Pawluczuk	121
Rola odnawialnych źródeł energii w dekarbonizacji przemysłu w Polsce Radosław Gnutek	123
Układy organic Rankine cycle – zagadnienia doboru czynnika roboczego i rozprężarki Piotr Kolasieński	125
Magazynowanie energii – technologie i przykłady zastosowań Daniel Smykowski	127



OD ORGANIZATORÓW

To kolejny, piętnasty już rok, w którym ukazuje się publikacja zawierająca streszczenia referatów wygłaszanych podczas Konferencji „Młodzi w Energetyce”.

Chciałbym podkreślić, że wydarzenie zostało przeprowadzone dzięki determinacji grupy osób – Pani mgr inż. Beaty Pytlik, Pana dra inż. Macieja Cholewińskiego, dra inż. Artura Machalskiego, mgra inż. Jean-Marca Fafary, mgra inż. Kamila Kowalskiego oraz dra inż. Przemysława Szulca. Dziękuję Państwu za poświęcony czas.

W tym roku w konferencji uczestniczy 130 osób, zostanie wygłoszonych 19 referatów w języku polskim i 10 w języku angielskim. Podczas konferencji zostanie wygłoszonych 6 wykładów plenarnych zaprezentowanych przez Panią mgr inż. Annę Adamczyk, mgr inż. Radosława Gnutka, prof. Kamila Śmierciewa, prof. Piotra Kolasińskiego oraz dra inż. Daniela Smykowskiego.

Last but not least, chciałbym wspomnieć, że konferencja jest dofinansowana ze środków budżetu Państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Doskonała Nauka”.

dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. uczelni
Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego
XV Konferencji „Młodzi w Energetyce”



OD ORGANIZATORÓW

Już po raz kolejny na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wroclawskiej organizowana jest Konferencja „Młodzi w Energetyce”. Nasze wydarzenie, przygotowane przez doktorantów, lecz przeznaczone zarówno dla nich, jak i studentów, członków kół naukowych oraz doświadczonych badaczy, to doskonała okazja do przedstawienia dotychczasowych osiągnięć naukowych, podzielenia się doświadczeniami, przedyskutowania nowych pomysłów oraz zdobycia eksperckiej wiedzy z zakresu szeroko rozumianej energetyki. To również świetne miejsce na nawiązanie nowych znajomości, przyjaźni oraz zapoznanie się z tym, czym zajmują się aktualnie naukowcy i pasjonaci referujący swoje prezentacje i posterki naukowe.

Konferencja zmieniała się przez lata. Jej początki to wydziałowe seminarium sprawozdawcze, na którym doktoranci Wydziału prezentowali swoje osiągnięcia. Taka formuła jednak nie była wystarczająca. W efekcie, z inicjatywy prof. dr. hab. inż. Henryka Kudeli, pod koniec 2. dekady XXI wieku powstała jej aktualna forma – ogólnopolskiego, a coraz częściej także międzynarodowego, forum wymiany myśli akademickiej. Za te wszystkie lata zaangażowania w rozwój młodych naukowców Panu Profesorowi bardzo serdecznie dziękuję.

Konferencja „Młodzi w Energetyce” to cenne osiągnięcie Wydziału. Dowodem jest uznanie uczestników i obserwatorów oraz stale rosnąca frekwencja. Warto zauważyć, iż nawet w czasie pandemii, a więc kiedy jej obrady zorganizowano w formie zdalnej, gromadziła ona liczne grono pasjonatów energetyki. Przez te wszystkie lata – począwszy od 2008 roku, oprócz wystąpień uczestników można było wysłuchać także bardzo ciekawych wykładów plenarnych przedstawicieli świata polityki, biznesu i nauki. Dzięki tym wszystkim działaniom jestem przekonany, że również kolejne edycje Konferencji będą cieszyły się uznaniem i powodzeniem wśród młodych (duchem i ciałem) naukowców. Z tego miejsca życzę udanych obrad w przyjemnej atmosferze!

dr hab. inż. Piotr Szulc, prof. uczelni

Dziekan Wydziału Mechaniczno-Energetycznego
Politechniki Wroclawskiej

**REFERATY
W JĘZYKU POLSKIM**

ADSORBCYJNY MAGAZYN CHŁODU

ADSORPTION COLD STORAGE

Maria Albiniak, Filip Sowiński, Michał Rynkun

Zakład Chłodnictwa i Energetyki Budynku, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
Politechnika Warszawska

Adres do korespondencji: filip.sowinski.stud@pw.edu.pl

W związku z dekarbonizacją energetyki wykorzystuje się coraz więcej odnawialnych źródeł energii. Są one niestabilne, ponieważ zależą od warunków pogodowych. Z tego powodu ich pracę należy stabilizować magazynami energii, tak aby mieć dostęp do energii w każdym momencie. Oprócz energii elektrycznej potrzebne są także ciepło i chłód. Wraz ze zmianami klimatycznymi oraz wzrostem komfortu życia z roku na rok rośnie zwłaszcza zapotrzebowanie na chłód. Coraz większą popularnością cieszą się domy pasywne, które mają na celu jak najmniejsze wykorzystanie energii. Buduje się zatem budynki o bardzo dobrej izolacji termicznej. Dzięki temu maleje zapotrzebowanie na ciepło, ale w okresie letnim rośnie potrzeba klimatyzowania pomieszczeń. Coraz więcej osób inwestuje w urządzenia chłodnicze we własnych domach. Najpopularniejsze są sprężarkowe urządzenia chłodnicze, które do swojego działania pobierają prąd. Aktualnie moc chłodniczą wykorzystuje się w różnorodnych obiektach. Jest ona potrzebna zarówno do utrzymania komfortowej temperatury w lokalach mieszkalnych, które wymagają jej przeważnie okresowo, jak i w obiektach przemysłowych takich jak chłodnie spożywcze lub pomieszczeniach typu data center, w których ciągle musi być dostarczany chłód [1]. Dzięki magazynowi chłodu można zoptymalizować zużycie energii elektrycznej w okresie dnia, ale również dla dłuższych perspektyw czasowych. Magazyn chłodu umożliwia na korzystanie z chłodu, w czasie, gdy energia elektryczna do napędu urządzenia chłodniczego nie jest wytwarzana przez odnawialne źródła energii.

Widząc stające przed nami problemy zdecydowaliśmy się zaprojektować i zbudować adsorpcyjny magazyn chłodu ze złożem silikażelu, w którym czynnikiem roboczym będzie woda. Głównymi komponentami tego urządzenia są: złożo silikażelu, zbiornik z wodą, chiller wody lodowej, wymiennik ciepła spełniający zarówno funkcję parownika, jak i skraplacza oraz dry cooler. Współdziałanie powyższych urządzeń pozwala zmagazynować chłód, który można odebrać w momencie większego zapotrzebowania. Nie jest to zatem urządzenie o pracy ciągłej.

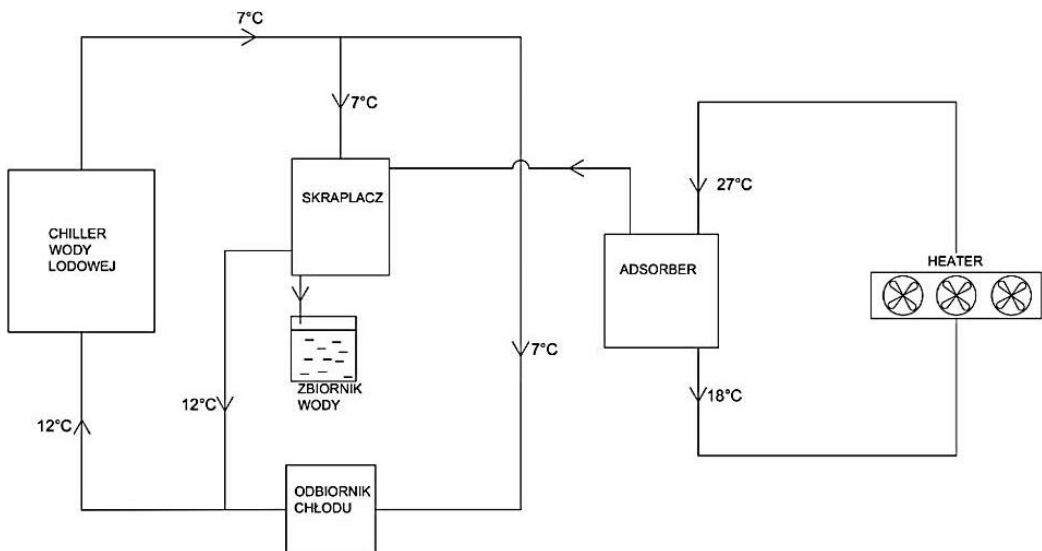
Zjawisko adsorpcji polega na przyłączaniu cząsteczek wody do powierzchni silikażelu na skutek sił oddziaływania międzycząsteczkowego. Silikażel jest materiałem o dużej powierzchni właściwej, co umożliwia adsorpcję dużej ilości wody.

Działanie adsorpcyjnego magazynu chłodu możemy podzielić na dwa etapy. Pierwszym etapem jest ładowanie (rys. 1), podczas którego do złoża doprowadzamy ciepło, aby nastąpiła desorpcja. Wówczas para, która była zaadsorbowana w złożu trafia do skraplacza, w którym kondensuje

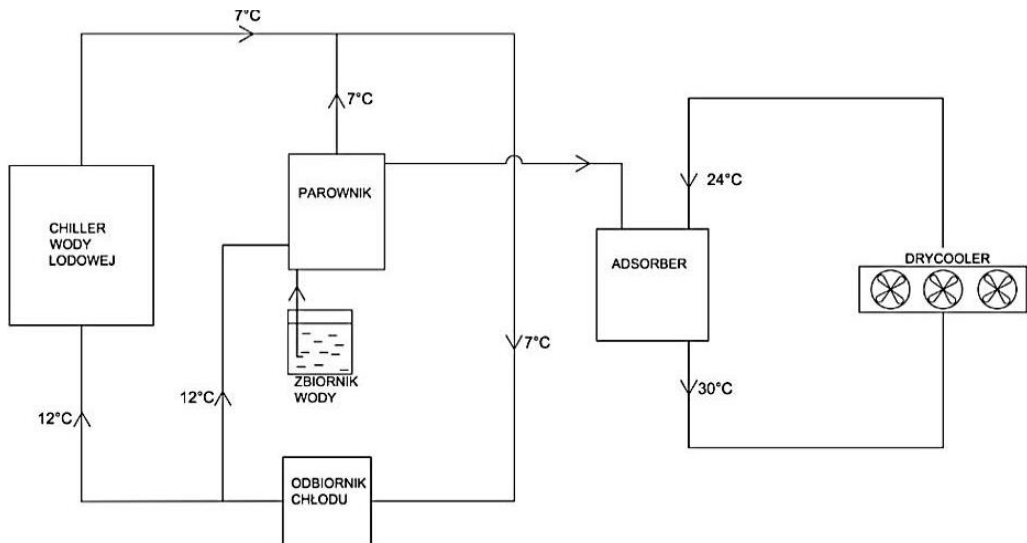
i trafia do zbiornika na wodę. W tym procesie musi być także uruchomiony chiller wody lodowej. Zimna woda wytwarzana w chillerze bierze udział w procesie skraplania i odbiera ciepło od pary. Aby wykorzystać w pełni działanie chillera w przypadku zapotrzebowania na chłód prowadzimy zimną wodę do jego odbiorców. Aby zachować ciągłość dostarczania ciepła do złoża do momentu jego całkowitego wysycenia stosujemy podgrzewacz (na rysunku pn. heater), aby utrzymać wyższą temperaturę wlotową. Drugim etapem działania urządzenia jest jego rozładowywanie (rys. 2), w trakcie którego następuje proces odbierania zmagazynowanego chłodu. Woda lodowa produkowana w chillerze prowadzona jest wówczas do odbiorców chłodu skąd kierowana jest do parownika, w którym następuje parowanie wody pobranej ze zbiornika wody. Ponieważ woda kierowana od odbiorców ochładza się w procesie parowania można ponownie ją tam skierować, co powoduje, że obieg staje się zamknięty do momentu pełnego nasycenia złoża silikażelu. Adsorpcja jest procesem egzotermicznym, a wzrost temperatury złoża pogarsza jego właściwości adsorpcyjne. W związku z tym, aby nastąpiło nasycenie całej wody ze zbiornika wymagane jest chłodzenie złoża. W tym celu stosujemy dry cooler, który pozwala na obniżenie temperatury na wlocie.

W trakcie badań będziemy rozważać dwa zbiorniki ze złożem silikażelu. Jedno z nich będzie zawierało silikażel w postaci granulatu, a drugie będzie miało pomalowane ściany grubą warstwą farby z silikażelu. Sprawdzimy, w którym wariantcie złożo lepiej spełni swoją funkcję. Zaprojektowaliśmy już stanowisko, a także obliczyliśmy bilans ogólny dla całego urządzenia i szczegółowy dla złoża. Dzięki temu poznaliśmy wielkość i moce elementów w magazynie.

Przy przeprowadzaniu naszych szczegółowych obliczeń wyszło, że zmiana stopnia upakowania jest bardzo mała, jej wartość nie dochodzi do 0,05, co przekłada się na to, żeby zmagazynować 10 kWh energii potrzebowalibyśmy aż 330 kg silikażelu.



Rys. 1. Proces ładowania magazynu



Rys. 2. Proces rozładowania złoża

Istnieją także inne sposoby magazynowania chłodu, takie jak wykorzystanie ciepła właściwego substancji, wykorzystanie materiałów zmiennofazowych oraz energii powstałe w reakcjach chemicznych.

Źródło finansowania

Publikacja powstała w ramach programu „Inicjatywa doskonałości – uczelnia badawcza” realizowanego na Politechnice Warszawskiej.

Literatura

- [1] Grzebielec A., *Zapotrzebowanie na chłód przez budynki o przeznaczeniu mieszkaniowym, komercyjnym i przemysłowym*, Nowa Energia, 2019, nr 2(67), 27–33.
- [2] Grabowska K., *Efektywność energetyczna adsorpcyjnego agregatu chłodniczego o modyfikowanej konstrukcji złożeń*, praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Kraków 2019.

PRZEGLĄD TECHNOLOGII MODUŁOWYCH REAKTORÓW JĄDROWYCH POD KĄTEM ZASTOSOWANIA W POLSKIM SYSTEMIE ENERGETYCZNYM

REVIEW OF SMALL MODULAR REACTORS TECHNOLOGIES FOR APPLICATION IN THE POLISH ENERGY SYSTEM

Julia Brzozowska, Daria Sikorska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: 276964@student.pwr.edu.pl

Mówiąc o energetyce w 2023 roku zarówno na świecie, jak i w Polsce bardzo ważną rolę odgrywa energetyka jądrowa. Każdego roku liczba zwolenników tej technologii rośnie, a kraje, które na swoim terytorium nie miały nigdy elektrowni jądrowej, przystępują do wdrożenia programu jądrowego [1]. Oprócz dużych jednostek wytwórczych coraz częściej mówi się o reaktorach SMR (ang. *Small Modular Reactors*) [2], które mają mniejsze koszty inwestycyjne, a czas ich konstrukcji zajmuje o połowę krócej niż w przypadku jednostek wielkoskalowych [3].

SMR, czyli małe reaktory modułowe zaliczane są do najnowocześniejszych rodzajów reaktorów. Budowane są w zakładzie produkcyjnym, a w miejsce eksploatacji przyjeżdżają z załadowanym paliwem i gotowe do użycia [2].

Jeśli w przeciągu najbliższej dekady uda się wprowadzić SMR na rynek międzynarodowy to odegrają one bardzo ważną rolę w rozwiązaniu problemów bezpieczeństwa energetycznego, redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz wysokich kosztów inwestycyjnych. Na dziś w rozwój technologii SMR zaangażowane są firmy głównie z USA (NuScale, Terra Power, GE Hitachi), Kanady (Moltex Energy), Anglii (Rolls-Royce), Francji (NUWARD) czy Chin (CNNC), jednak na świecie odnotowano ponad 80 projektów SMR [1, 3, 4]. Ze wszystkich wyżej wymienionych, tylko projekt firmy NuScale – NuScale Power 1 posiada licencję amerykańskiego regulatora NRC wydaną w sierpniu 2020 roku [3]. W tabeli 1 zamieszczone zostały wybrane cechy reaktorów modułowych, których projekty są najbardziej zaawansowane w Europie i USA, a których zakup jest rozważany przez polskie spółki.

Pierwszą cechą, najbardziej odróżniającą SMR od wielkoskalowych reaktorów, jest ich moc. Wynosi ona do około 300–500 MW, gdzie, dla porównania, jednostki wielkoskalowe zaczynają się od 700 MW [5]. Mimo mniejszej mocy pojedynczych reaktorów, moc całej jednostki wytwórczej może być zbliżona do mocy bloku jądrowego poprzez instalację kilku SMR-ów w ramach jednej elektrowni. Przykładowo, jak wskazuje producent NuScale, będą one mogły być instalowane w konfiguracjach z czterema, sześcioma

lub dwunastoma reaktorami o mocy 77 MW każdy, dając łącznie do 924 MW [6]. Wariant maksymalny – z dwunastoma reaktorami – ma zająć powierzchnię jedynie 0,13 km² [6]. Dla porównania, elektrownia jądrowa Vandellòs w Hiszpanii, w której pracuje jeden blok o mocy 1100 MW, zajmuje powierzchnię 0,35 km². Podobnie jak przy dużych jednostkach jądrowych, wśród projektów SMR-ów również można wyróżnić różne typy tych reaktorów – m.in. lekkowodne, wysokotemperaturowe, chłodzone stopionymi solami czy z neutronami prędkimi [7].

Tab. 1. Cechy wybranych reaktorów modułowych rozwijanych w Europie i USA [1–4]

Producent	Kraj	Nazwa reaktora	Moc nominalna elektryczna, MW	Początek badań	Status
NuScale	USA	NuScale Power 1	77	2007	Uzyskanie licencji amerykańskiego regulatora NRC. Plany nad budową w Idaho
GE Hitachi	USA, Japonia	BWRX-300	300	2007	Prace przedlicencyjne, pozyskiwanie środków do finansowania licencjonowania
NUWARD	Francja	NUWARD TM	340	2019	Projektowanie reaktora, planowanie prac nad licencjonowaniem, współpraca z rządem
Rolls-Royce	Anglia	UK-SMR	470	2015	Prace przedlicencyjne. Intensywne działania po uzyskaniu wsparciu rządu w 2021 roku

SMR-y mają wiele zalet takich jak np. efektywniejsze zużycie paliwa czy obecność pasywnych układów bezpieczeństwa, które występują w większości projektów [7]. Umożliwiają one bezpieczne wyłączenie i odprowadzanie ciepła z reaktora mimo braku zasilania elektrycznego. Niezwykle istotną kwestią przy SMR-ach jest również, zawarta w ich nazwie, modułowość. Pozwala ona na przyspieszenie procesu realizacji inwestycji poprzez montaż komponentów oraz systemów w fabryce i transport gotowej jednostki do miejsca instalacji. Z drugiej strony patrząc, pojawia się też znaczna ilość wyzwań stojących przed projektantami. Można do nich zaliczyć między innymi trudności technologiczne ze zmniejszeniem skali urządzeń z sukcesem działających w dużych reaktorach. Kolejną trudnością jest takie zaprojektowanie urządzeń, aby móc je zmniejszyć poprzez uproszczenia techniczne, a jednocześnie nie pozwolić na zmniejszenie bezpieczeństwa małych reaktorów.

Jako zastosowanie SMR-ów podaje się głównie zasilanie miejsc, do których ciężko jest doprowadzić stabilnie działającą sieć elektroenergetyczną, są to przykładowo obszary podbiegunowe czy też tereny w głębi Kanady. Możliwości oferowane przez tego typu reaktory przyciągają też spółki przemysłowe jako zasilanie w energię elektryczną lub ciepłą fabryk czy kopalń. W Polsce plany związane z SMR-ami są coraz częściej rozwijane. Przykładowo, 23 marca 2023 roku firma Synthos Green Energy razem z firmą Orlen podpisały umowę dotyczącą współfinansowania projektu reaktorów BWRX-300. Reaktory te w pierwszej kolejności mają powstać w Kanadzie i USA, natomiast już

w kolejnej dekadzie firma Orlen planuje zakupić 79 takich jednostek i uruchomić w naszym kraju do 2038 roku [8, 9]. Co więcej, firma KGHM prowadzi obecnie zaawansowane prace związane z zakupem i uruchomieniem swojego projektu SMR [1, 3]. Pomimo iż daty uruchomienia pierwszego SMR w Kanadzie są przewidziane na rok 2028 [4, 10], nie oznacza to, że w Polsce ta data także jest obiecująca. Procedury wprowadzenia technologii jądrowych i raporty bezpieczeństwa w danym kraju różnią się i trwają przynajmniej kilka lat [3].

Mysząc o SMR-ach nie należy traktować ich jako konkurencji dla wielkoskalowych bloków jądrowych, których głównym celem jest dostarczenie dużej ilości niskoemisyjnej energii elektrycznej w celu zasilenia znacznej części kraju wielkości Polski, lecz jako uzupełnienie systemu elektroenergetycznego [11]. Na ten moment trudno powiedzieć, który reaktor jako pierwszy zostanie zbudowany w Polsce (NuScale, a może BWRX-300). Niemniej w 2023 roku technologia małych reaktorów modułowych nie jest już odległą fantazją, a prawdziwą rewolucją technologiczną dziejącą się na naszych oczach, a Polska ma szansę stać się liderem tej technologii w Europie.

Literatura

- [1] Sobolewski M., *Perspektywy energetyki jądrowej*, „Infos zagadnienia społeczno gospodarcze” 2023, nr 1, s 1–4.
- [2] Ingersoll D.T., Carelli M.D. (Eds.), *Handbook of small modular nuclear reactors*, Woodhead Publishing, 2020.
- [3] Pieńkowski L., *Realia energetyki jądrowej w Polsce*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN” 2022, nr 110, s. 23–28.
- [4] Rajewski A., *Małe reaktory modułowe – czy są szansą dla Polski?*, „Nowa Energia” 2021.
- [5] Strona internetowa International Atomic Energy Agency, <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> [data dostępu: 28.03.2023].
- [6] Strona internetowa NuScale Power – <https://www.nuscalepower.com/en/products> [data dostępu: 28.03.2023].
- [7] Cholewiński M., *Małe też może być piękne*, „Energetyka Ciepła i Zawodowa” 2020, Nr 6(770).
- [8] Strona internetowa firmy Orlen – <https://www.orlen.pl/pl/o-firmie/media/komunikaty-prasowe/2023/marzec/Umowa-na-projekt-SMR-w-Polsce-zawarta-w-Waszyngtonie> (data dostępu: 30.03.2023 r.).
- [9] Strona internetowa Polskiej Agencji Prasowej – <https://biznes.pap.pl/pl/news/pap/info/3376664,pkn-orlen-planuje-79-reaktorow-smr-lokalizacje-przedstawi-w-kwietniu> (data dostępu: 28.03.2023 r.).
- [10] Iakovleva M., Rayner J., *Accelerating the Deployment of Smrs in Canada: The Importance of Intermediaries*, 2023.
- [11] Samul K., Strupczewski A., Wrochna G., *Małe Reaktory Modułowe SMR*, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, 2013.

POMPA DWUSTRUMIENIOWA W PRACY TURBINOWEJ

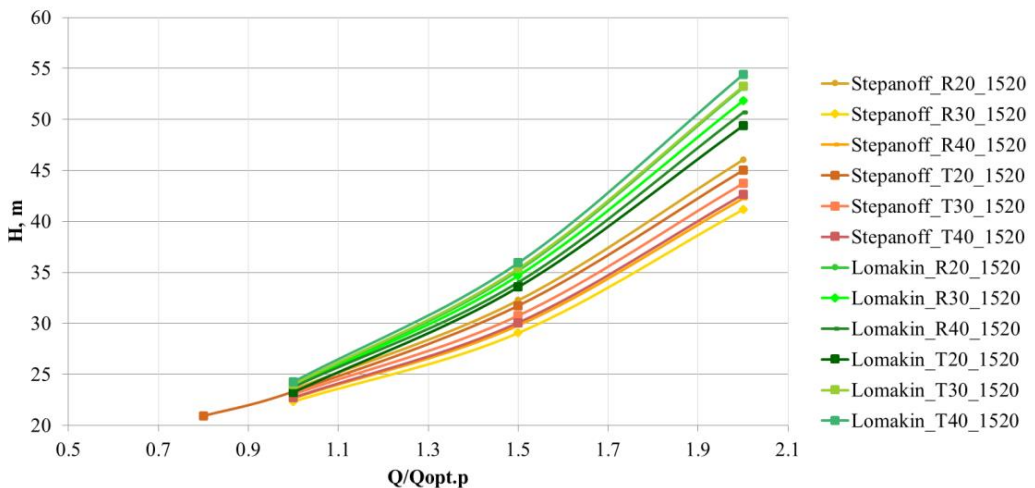
DOUBLE-ENTRY PUMP IN TURBINE OPERATION

Anna Chernobrova, Piotr Szulc, Oleksandr Moloshnyi

Katedra Inżynierii Konwersji Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: anna.chernobrova@pwr.edu.pl

Pompy odśrodkowe, poza pompowaniem cieczy, bardzo dobrze sprawdzają się również w pracy turbinowej, jako np. urządzenia do odzyskiwania energii z układów hydraulicznych. Ważną częścią pompy dwustrumieniowej jest spiralny kanał zbiorczy. Od metody projektowania kanału spiralnego zależą hydrauliczne straty oraz położenie optymalnego punktu pracy pompy. Cel zaprezentowanych badań jest określenie wpływu spiralnego kanału na parametry energetyczne pompy w pracy turbinowej.



Rys. 1. Porównawcza charakterystyka spadku pompy w pracy turbinowej dla spirali Lomakina i Stepanoffa

Przedstawione badania pokazują wyniki dla spiralnych kanałów zbiorczych zaprojektowanych zgodnie z metodą stałego krętu cieczy i stałej prędkości średniej. Podczas doboru parametrów szerokości wlotowej do spirali (b_3), średnicy wlotowej do spirali (d_3) były zastosowane zalecenia A. Stepanoffa [1] i A. Lomakina [2]. Oprócz wymienionych parametrów spiralne kanały były



zaprojektowane dla kątów rozwarcia ścian 20, 30, 40 stopni, i miały różne formy przekroju: trapezową (I) i okrągłą (R).

Zaprojektowano spiralny kanał dla pompy dwustrumieniowej z niskim wyróżnikiem szybkoobrotowości (23), z wysokością podnoszenia 25 m, z optymalną wydajnością (Q_{opt}) 105 m³/h przy prędkości obrotowej 1520 obr/min oraz 1020 obr/min. Badania pracy pompy były prowadzone za pomocą modelowania numerycznego. Przy obliczeniach zastosowano metodę Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) ze standardowym modelem turbulencji $k-\epsilon$.

Wyniki badań pokazały duży wpływ metody projektowania spiralnego kanału na parametry pracy pompy w trybie turbinowym (rysunek 1). Różnica spadku dla różnych konstrukcji w optymalnym punkcie pompy w pracy turbinowej ($1,5 Q/Q_{opt}$) wynosi 16%.

Literatura

- [1] Stepanoff A., *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1957.
- [2] Lomakin A., *Centrobieżnyje i osienyje nasosy*, Masinostrojenije, Leningrad 1965.

ANALIZA WPŁYWU STOPNIA DWUPRZEPLYWOWOŚCI NA WYBRANE PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SILNIKÓW TURBOWENTYLATOROWYCH

TURBOFAN ENGINE BYPASS RATIO AS A FUNCTION OF SELECTED OPERATING PARAMETERS

Maciej Cholewiński

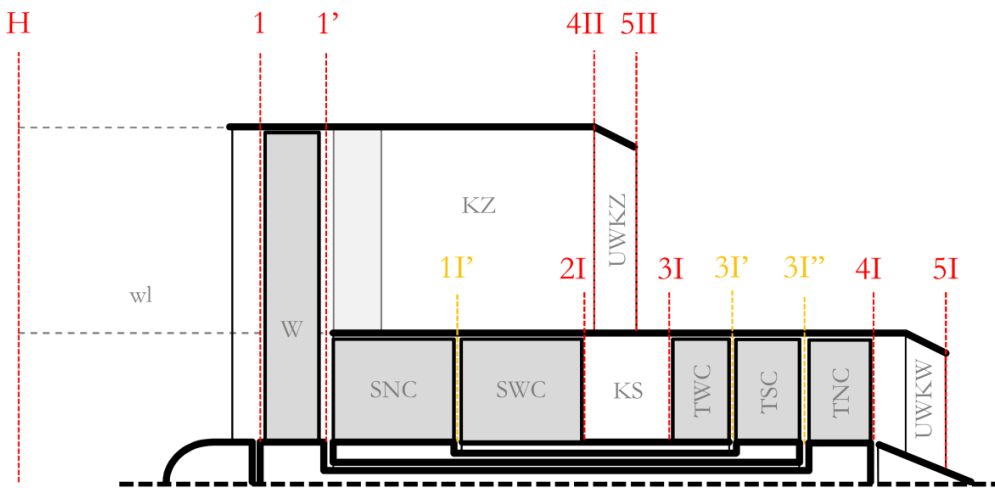
Katedra Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

Dwuprzepływowe, turbinowe silniki odrzutowe pozbawione mieszalnika – zwane także turbowentylatorowymi (ang. *turbofan*) – uznać można za dominującą we współczesnym, międzynarodowym lotnictwie pasażerskim i transportowym technologię napędową. Ich popularność i wyższość nad pozostałymi rodzajami dostępnych obecnie silników (turboodrzutowych jednoprzepływowych, turbośmigłowych, tłokowych, raketowych) wynika – szczególnie w przypadku warunków lotu typowych dla średnio- i długodystansowych lotów rejsowych (prędkości $Ma_{H1} = 0,6–0,8$ oraz wysokości $H = 8–11$ km) – z osiąganych przez nie sprawności: napędowej i ogólnej (a więc i względnie niskiego jednostkowego zużycia paliwa), niskiej masy (w przeliczeniu na osiągnięty ciąg) oraz szerokiego wachlarza rozwiązań technicznych związanych z ich implementacją w obrębie powszechnie stosowanych płatowców (szeroko- i wąskokadłubowych). Spotkać je można także w lotnictwie wojskowym, dość powszechnie bazującym nadal na takich samolotach jak np. Boeing C-17 Globemaster III, Fairchild A-10 Thunderbolt II czy też Boeing B-52 Stratofortress, a także w opracowaniach i projektach pilotażowych związanych z rozwojem „napędów przyszłości” – koncepcji bazujących na spalaniu wodoru, wykorzystujących paliwa syntetyczne (SAFs – ang. *Sustainable Aviation Fuels*) oraz stanowiących głęboką modyfikację aktualnie stosowanych napędów (np. silników śmigłowentylatorowych – ang. *propfan*).

Rozwój omawianej grupy napędów wymaga i wymagał nadal będzie posiadania sprawdzonych, odpowiednio zwalidowanych modeli analityczno-empirycznych, służących m.in. do szacowania najważniejszych parametrów termogazodynamicznych strumienia przepływającego przez silnik, podlegającego przemianom (sprężaniu, spalaniu, rozprężaniu, ochładzaniu) w jego obrębie, do prowadzenia szeroko rozumianych wstępnych obliczeń cieplno-przepływowych maszyn i urządzeń przepływowych tworzących napęd czy też do zaspokojenia wymagań i potrzeb tzw. diagnostyki parametrycznej. Modele te są także niezwykle istotne w kontekście identyfikacji przyszłych, wynikających m.in. z rosnącej presji

środowiskowej oraz zmieniających się realiów technicznych i technologicznych (wdrażania nowych materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, technik regulacyjnych, paliw, zespołów wirnikowych, maszyn i urządzeń wchodzących w skład tzw. wyspy silnikowej), celowych do obrania kierunków rozwoju i optymalizacji ww. grupy układów lotniczych. Część z nich – jak np. oprogramowanie NASA EngineSim – została w ostatnich latach bezpłatnie udostępniona w Internecie, jednakże posiada ona ograniczony zakres możliwych do podjęcia analiz (np. nie uwzględnia indywidualnych charakterystyk: wlotów powietrza, wentylatorów, sprężarek, komór spalania, turbin, układów wylotowych), uniemożliwiając tym samym prowadzenie profesjonalnych badań numerycznych na potrzeby nowopowstałych konstrukcji lub wymagających nabywania drogich, często wykraczających poza możliwości danego przedsiębiorstwa lub instytucji, kodów obliczeniowych.



Rys. 1. Przekroje obliczeniowe i bloki funkcjonalne zastosowane w modelu silnika turbowentylatorowego (opracowanie własne)

wl – wlot powietrza do silnika (między przekrojami H i 1), W – wentylator (1–1'), KZ – kanał zewnętrzny (1'–4II), UKWZ – układ wylotowy kanału zewnętrznego (4II'–5II), SNC – sprężarka niskiego ciśnienia (1'–1I), SWC – sprężarka wysokiego ciśnienia (1I'–2I), KS – komora spalania (2I–3I), TWC – turbina wysokiego ciśnienia (3I–3I'), TSC – turbina średniego ciśnienia (3I'–3I''), TNC – turbina niskiego ciśnienia (3I''–4I), UKW – układ wylotowy kanału wewnętrznego (4I–5I)

W niniejszej prezentacji przedstawiono i omówiono – na przykładzie zagadnienia skupiającego się na wstępnej ocenie wpływu stopnia dwuprzepływowości na wybrane parametry eksploatacyjne (jednostkowe zużycie paliwa, ciąg jednostkowy, sprawności: cieplną, napędową i ogólną) – opracowywany, zero-wymiarowy model służący do analiz i projektowania silników turbowentylatorowego, przygotowany w ogólnodostępnych środowiskach obliczeniowych (Mathcad i MATLAB). Ujmuje on m.in. wieloparametryczną, nieliniową specyfikę zjawisk zachodzących w napędach turbinowych oraz pozwala na uwzględnianie w prowadzonych analizach indywidualnych charakterystyk maszyn i urządzeń

wchodzących w skład silnika (m.in. wentylatora, sprężarki, turbiny, komory spalania, wlotu powietrza, kanałów przepływowych, dysz wylotowych). Pozostaje przy tym podatny na ewentualne modyfikacje (np. umożliwi uwzględnienie procesu mieszania obu strumieni: zewnętrznego i wewnętrznego, a w konsekwencji – analiz związanych z wykorzystaniem dopalacza, oraz strat ciśnienia wynikających z obecności fal uderzeniowych) oraz współpracę z innymi środowiskami obliczeniowymi i inżynierskimi (w tym tymi z rodziny CAD lub CFD).

Na rysunku 1, na przykładzie układu trójwornikowego (znanego m.in. z silnika Progress D-18T czy też Rolls-Royce Trent 1000), przedstawiono przyjęte w omawianym modelu przekroje obliczeniowe i bloki funkcyjne. Opracowany on został w oparciu o literaturę akademicką [1–4]. Obliczenia termogazodynamiczne w jego obrębie prowadzi się wykorzystując najczęściej model gazu doskonałego oraz zakładając przypadek przepływów adiabatycznych, braku upustów i wyprowadzeń mocy na agregaty silnikowe i płatowcowe, niemniej – istnieje także możliwość (model jest systematycznie rozwijany) prowadzenia analiz m.in. z uwzględnianiem specyfiki przemian gazów rzeczywistych (o zmiennym składzie), strat ciepła do otoczenia przez ścianki kanałów przepływowych, niepełnego i niecałkowitego spalania paliwa w komorze spalania, zasilania innych odbiorników (poboru mocy i czynników na tzw. potrzeby własne silnika lub statku powietrznego) czy też rzeczywistych strat ciśnienia – w funkcji prędkości i kształtu kanału przepływowego (wynikającego z przyjętych parametrów pracy silnika, a więc będących konsekwencją założeń projektowych, a nie danych statystycznych, nie zawsze dobrze oddających realia ciepło-przepływowe).

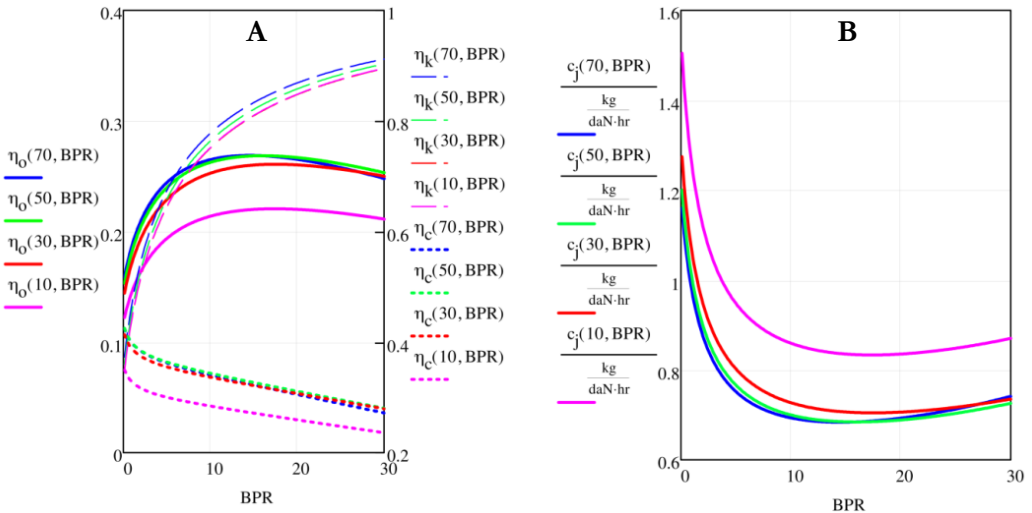
Poniżej zamieszcza się wyniki przykładowych analiz opracowanych z wykorzystaniem omawianego modelu obliczeniowego, uzyskanych przez autora prezentacji w pierwszych miesiącach 2023 roku – wraz ze wskazaniem przyjętych założeń.

Wyniki analiz wpływu wartości stopnia dwuprzepływowości (BPR – ang. *Bypass Ratio* – w zakresie od 0 do 30) na sprawności: całkowitą (η_p), napędową (η_k) i cieplną (η_t) oraz jednostkowe zużycie paliwa (c) silnika turbowentylatorowego, poruszającego się z prędkością $a_H = 800$ km/h na wysokości 10 km, spalającego paliwo o wartości opalowej 43,5 MJ/kg, uzyskującego sprawność procesów rozprężania w kanale wewnętrznym równej 0,88, sprawność całkowitej sprężarki i wentylatora – 0,83, sprawność kanału zewnętrznego $\eta_{II} = 0,85$, temperaturę całkowitą spalin za komorą spalania – 1800 K i współczynnik wykorzystania energii paliwa – 0,97 (wszystkie wartości niezależne od BPR), zakładając pełne rozprężanie czynników gazowych w układach wylotowych, pracę przy tzw. optymalnym podziale pracy użytecznej obiegu l_{ob} na oba kanały przepływowe silnika (β_{opt} – obliczenia za wzorem 1) oraz obowiązywanie modelu atmosfery wzorcowej (ISA – ang. *International Standard Atmosphere*) przedstawiono na rysunku 2.

$$\beta_{opt} = \frac{\eta_{II} - \frac{c_H^2}{2 l_{ob}} (1 - \eta_{II})}{\frac{1}{BPR} + \eta_{II}} \quad (1)$$

Podczas obliczeń założono stałą, niezależną od stopnia dwuprzepływowości, wartość sprężu układu sprężarka-wentylator w kanale wewnętrznym (rozpatrywano 4 różne wartości: 10, 30, 50 lub 70) oraz stałą wartość współczynnika strat ciśnienia całkowitego we wlocie (0,97). Przeprze-

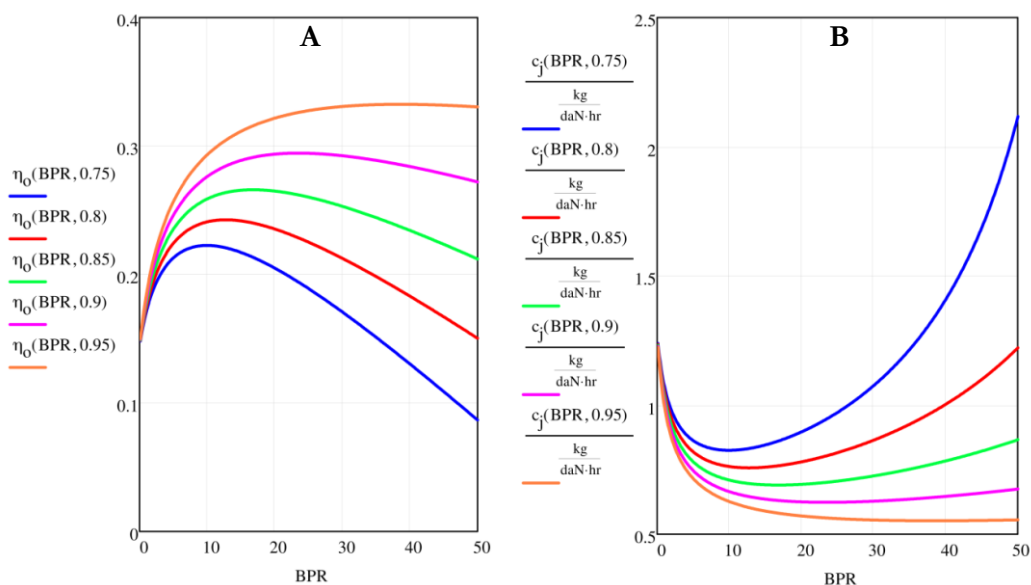
wadzone analizy pozwalają, w ujęciu poczynionych założeń (sprawności, warunków lotu), na identyfikację ekonomicznych (gwarantujących najniższe jednostkowe zużycie paliwa) wartości BPR – dla danego sprężu w kanale wewnętrznym – oraz określenie wpływu uzyskiwanego przez układ wentylator–sprężarka sprężu na osiągane parametry eksploatacyjne silnika (zaobserwować można m.in. zagęszczenie krzywych sprawności: cieplnej i całkowitej dla wartości sprężu powyżej 30).



Rys. 2. Wpływ stopnia dwuprzepływowości i sprężu układu sprężarka-wentylator w kanale wewnętrznym analizowanego silnika na sprawności: całkowitą, napędową i cieplną (wykres A) oraz na wartość jednostkowego zużycia paliwa (wykres B)

W badaniach związanych z silnikami turbowentylatorowymi, dzięki posiadanemu modelowi, podjąć można się także m.in. analiz wpływu sprawności kanału zewnętrznego (stanowiącego o stopniu wykorzystania przekazywanej do kanału zewnętrznego części pracy użytecznej obiegu) na rozpatrywane wskaźniki eksploatacyjne (to od niego zależy punkt przegięcia sprawności na wykresach z rysunku 2). Celowość optymalizacji tej wielkości została ujęta m.in. w rozwoju silników śmigłowentylatorowych (znanych z takich opracowań jak Pratt & Whitney/Allison 578-DX, Progress D-27 czy też General Electric GE36), nazywanych często „turbowentylatorowymi o ultrawysokim stopniu dwuprzepływowości” (UHB – ang. *Ultra-High-Bypass*), pozwalającymi na dalsze ograniczenie jednostkowego zużycia paliwa przez napędy turbodrzutowe. Wyniki przykładowych oznaczeń dla ww. zadania optymalizacyjnego – przyjmując te same założenia jak w poprzednim przypadku, przeprowadzone dla wartości BPR od 0 do 50 i 5 różnych wartości sprawności kanału zewnętrznego (0,75, 0,8, 0,85, 0,9 i 0,95) – zamieszczono na rysunku 3. Zaobserwować można na nim m.in. płaski odcinek charakterystyk: sprawności całkowitej i jednostkowego zużycia paliwa od wartości BPR ok. 20–30 w przypadku wysokich sprawności kanału wewnętrznego, wyróżniające wartości ww. parametrów w porównaniu do współcześnie eksploatowanych silników (punkty charakterystyk na osi rzędnych odpowiada silnikom jednoprzepływowym, natomiast współcześnie stosowane układy dwuprze-

plywowe cechują nadal wartości BPR poniżej 7–10 – o wartościach powyżej 10–12 mówi się wyłącznie w ujęciu nowooprojektowanych koncepcjach takich jak Rolls-Royce UltraFan), wynikające właśnie z minimalizacji strat ciśnienia w kanale zewnętrznym i jednoczesnego utrzymania sprawności maszyn sprężających (co wymaga z kolei m.in. stosowania układów 2 przeciwbieżnych śmigłowentylatorów i specyficznych kształtów i liczby łopatek ww. maszyn wirnikowych) oraz redukcję jednostkowego zużycia paliwa wraz ze wzrostem wartości BPR (rosnący odcinek krzywej $\zeta(BPR)$ wynika z założenia stałej, niezależnej od BPR sprawności kanału). Rezygnacja z osłony kanału zewnętrznego, korzystna z punktu widzenia zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń gazowych, wymaga podjęcia kroków służących minimalizacji generowanego przez silnik hałasu (w konwencjonalnych silnikach turbowentylatorowych osłona pełni rolę absorbera fal dźwiękowych).



Rys. 3. Wpływ stopnia dwuprzepływowości i sprawności kanału zewnętrznego analizowanego silnika na sprawność całkowitą (wykres A) oraz na wartość jednostkowego zużycia paliwa (wykres B)

Z przeprowadzonych oznaczeń wyciągnąć można także wniosek o zasadności prowadzenia – w szczególności w przypadku współczesnych silników turboodrzutowych oraz układów wirnikowych – wieloparametrowych, kompletnych analiz termogazodynamicznych, ujmujących cały łańcuch konwersji energii – od energii chemicznej paliwa i entalpii całkowitej powietrza przed wentylatorem, na pracy ciągu obu kanałów kończąc. Jak wykazano, wzrost sprawności napędowej silnika, wynikający m.in. ze wzrostu stopnia dwuprzepływowości, kompensować może spadek sprawności cieplnej silnika, jednakże niska sprawność kanałów przepływowych skupiających ponad 60–80% czynnika przejmującego pracę użyteczną obiegu silnika ograniczać może korzystny wpływ wartości BPR na jednostkowe



zużycie paliwa (a więc także emisje zanieczyszczeń – m.in. CO₂), skłaniając, nie tylko w przypadku dużych stopni dwuprzepływowości, do stosowania napędów śmigłowentylatorowych.

Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania Panu dr. inż. Romanowi Rózieckiemu za wsparcie merytoryczne podczas opracowywania i rozwoju omawianego modelu oraz udostępnione materiały, dowód wieloletniej pracy dydaktycznej i organizacyjnej na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

Literatura

- [1] Dzierżanowski P. i in., *Turbinowe silniki odrzutowe*, WKŁ, Warszawa 1983.
- [2] Dzygadlo Z. i in., *Zespoły wirnikowe silników turbinowych*, WKŁ, Warszawa 1982.
- [3] El-Sayed A., *Aircraft propulsion and gas turbine engines*, CRC Press/Taylor & Francis Group, 2008.
- [4] Dzierżanowski P. i in., *Konstrukcja silników lotniczych. Projektowanie przejściowe i dyplomowe*, WAT, Warszawa 1972.

OCENA CFD WEWNĄTRZKOMOROWEGO, AUTONOMICZNEGO UKŁADU ZAWRACANIA SPALIN, ZASTOSOWANEGO DO MIKROTURBIN GAZOWYCH ZASILANYCH METANEM W UJĘCIU WSPÓŁSPALANIA WODORU

CFD ASSESSMENT OF THE AUTONOMOUS INTERNAL FLUE GASES RECIRCULATION SYSTEM APPLIED TO METHANE POWERED GAS MICROTURBINES IN THE CONTEXT OF THE HYDROGEN CO-COMBUSTION

Jean-Marc Fąfara

Katedra Inżynierii Konwersji Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: jean-mar.fafara@pwr.edu.pl

Współcześnie, odnawialne źródła energii są coraz częściej spotykane w przemyśle energetycznym. Jedną z głównych wad tej technologii jest zależność od warunków meteorologicznych. Rozwiązaniem tego problemu była by możliwość magazynowania nadmiaru energii gdy się pojawia, aby móc ją wykorzystać gdy taka potrzeba zajdzie. Jest to możliwe poprzez przekształcenie nadmiaru energii elektrycznej w wodór (proces hydrolizy) a następnie wytworzenie metanu (wykorzystując dwutlenek węgla, wytworzony wodór oraz energię elektryczną w procesie metanizacji). Ostatecznie oba gazy, wodór oraz metan, mogą zostać połączone w celu uzyskania odnawialnego paliwa. Ta technologia nazywa się „Power-to-Gas” (P2G). Obecność metanu powoduje obniżenie sprawności wytwarzania tego rodzaju paliwa, lecz wynika ona ze specyficznych właściwości wodoru. Faktycznie, wodór jest trudniejszy do przechowywania, niebezpieczniejszy do magazynowania oraz transportowania oraz bardziej wymagający pod względem wykorzystania w urządzeniach energetycznych. Podsumowując, w celu zwiększenia sprawności wykorzystywania energii odnawialnej, kolejnym krokiem będzie zwiększanie zawartości wodoru w paliwie pochodzącym z technologii P2G.

Inną technologią coraz częściej spotykaną są mikroturbiny gazowe, powszechnie wykorzystywane w różnorodnych gałęziach przemysłu: w lotnictwie do napędu dronów, w przemyśle samochodowym do napędu lub zwiększenia zasięgu niektórych aut (Jaguar CX75, Pininfarina H600 itp.), w przemyśle energetycznym do generowania prądu elektrycznego (oraz ciepła) do zasilania gospodarstw domowych itp. Mikroturbiny gazowej niosą ze sobą liczne zalety takie jak niższy poziom hałasu, tańszą eksploatację,



ograniczoną liczbę ruchomych elementów konstrukcyjnych, nisze emisje zanieczyszczeń itp. Po wszecnie spotykanymi komorami spalania są komory typu dyfuzyjnego, dlatego też im są poświęcone te badania.

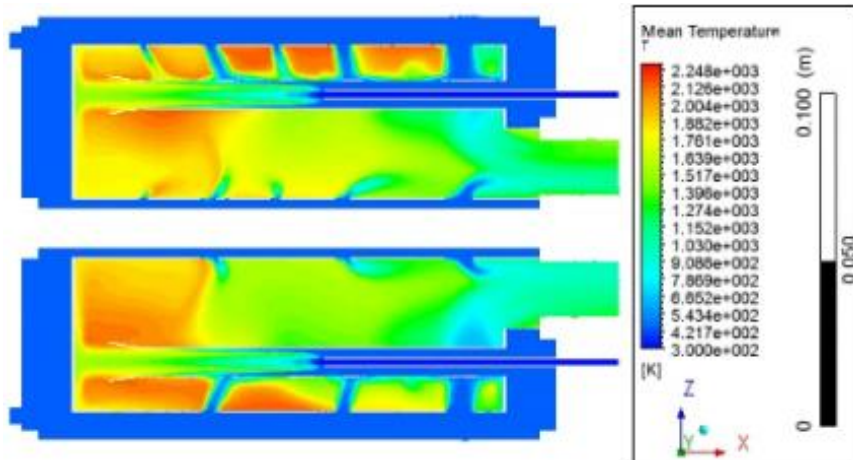
Na podstawie powyższego, może wynikać potencjalna integracja technologii P2G oraz mikrotrubin gazowych. Dążąc do wzrostu sprawności technologii P2G, wykorzystywanie coraz bogatszego w wodór paliwa jest pożądane. W celu zastosowania tak zmieniającego się paliwa do mikrotrubin gazowych, należy te ostatnie do nowego paliwa dostosować. Faktycznie, bogatsze w wodór paliwo powoduje wzrosty lokalne temperatury spalania oraz zwiększenie prędkości spalania. Wykorzystywanie nie przystosowanej komory spalania mogłoby skutkować przegrzaniem (rys. 1 i 2), wzrostem emisji (NO_x) oraz mogłoby doprowadzić do zwrotu/intensyfikacji płomienia w kierunku strefy podawania paliwa. Te wszystkie zjawiska są nie pożądane w celu poprawnego działania komory spalania.

Na podstawie analizy literaturowej oraz rozważań teoretycznych, zastosowanie autonomicznego układu zawracania spalin (ang. *Internal Flue Gases Recirculation* – IFGR) wewnątrz komory spalania mikrotrubiny gazowej pozwoliłoby na (i) zawrócenie części spalin do strefy spalania ((ii) co by miał wpływ na proces spalania), (iii) na ograniczenie maksymalnej temperatury spalania oraz (iv) prędkości spalania, wpływając na (v) ograniczenie emisji NO_x . Te zjawiska umożliwiłyby na zastosowanie pewnej ilości wodoru w paliwie referencyjnym (tutaj metan) zachowując nominalne parametry pracy komory spalania.

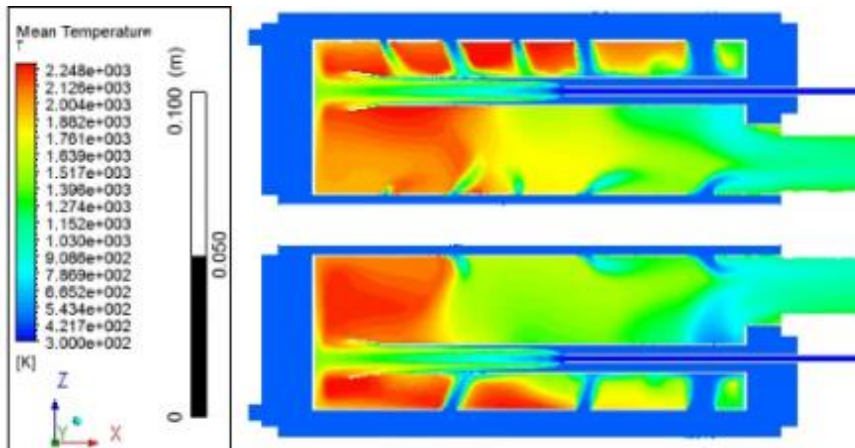
W celu weryfikowania powyżej opisanych tez, badania numeryczne zostały wykonane. Wykonano projekt mikrotrubiny gazowej zasilanej metanem (ok. 40 kW mocy mechanicznej), oraz zbudowano model trójwymiarowy komory spalania za pomocą programu SolidEdge. Różnego rodzaju układy IFGR zostały implementowane do modelu referencyjnego komory spalania. Wykorzystując programy Ansys DesignModeler oraz SolidEdge, utworzone modele komór spalania zostały przekształcone w modele „wodne”. Siatki obliczeniowe do badanych komór spalania zostały wygenerowane w programie Ansys Fluent Meshing. Następnie wprowadzono te modele komór spalania do programu Ansys Fluent gdzie zostały przebadane przy zasilaniu czystym metanem. Badania te uwiarydliły że budowa układów IFGR do komór spalania mikrotrubin gazowych jest zagadnieniem bardzo złożonym oraz niekiedy wręcz nieprzewidywalnym. W wyniku tych oto badań uzyskano autonomiczne zawracanie spalin tylko w trzech komorach spalania z układami IFGR. Po analizie rozwiązania jednego z wariantów IFGR, zdecydowano ten wariant wykluczyć z dalszych badań. W ten sposób wyselekcjonowano tylko dwie komory IFGR operacyjne do dalszych badań. Wybrane dwa modele zostały poddane badaniom z udziałem wodoru w paliwie od 0% do 50% udziału masowego. Badania te umożliwiły sprawdzenie że istnieje możliwość autonomicznego zawracania spalin w komorach spalania mikrotrubin gazowych przy zasilaniu komory spalania metanem i wodorem (do 50% udziału masowego wodoru), bez znaczących zmian parametrów pracy komory spalania (spadek ciśnienia całkowitego oraz temperatura całkowita na wylocie) lecz z wpływem na proces spalania (zmiana w maksymach oraz gradientach temperatury oraz w stężeniach CO oraz NO_x w spalinach). Przeprowadzono dodatkowe badania prędkości spalania mieszaniny paliwowo-powietrzno-spalinowej występującej w komorach spalania w środowisku Ansys Chemkin. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych uzyskano wyniki – dane.

Uzyskane dane w procesie badań numerycznych poddano interpretacji, co z kolei umożliwiło zrozumieniu efektów układów IFGR na komorę spalania badanej mikroturbiny gazowej oraz umożliwiło ocenić efektywność oraz celowość stosowalności zaproponowanego rozwiązania.

Podczas prelekcji zostaną przedstawione badane modele komór spalania, stosowane narzędzia CFD, wyniki, ich interpretacja oraz ocena zastosowalności zaproponowanego rozwiązania.



Rys. 1. Mapa temperatury statycznej w przekroju reprezentacyjnym niemodyfikowanej dyfuzyjnej komory spalania badanej mikroturbiny gazowej dla zasilania metanowego dla niezmienniej entalpii doprowadzonej przez paliwo



Rys. 2. Mapa temperatury statyczne w przekroju reprezentacyjnym niemodyfikowanej dyfuzyjnej komory spalania badanej mikroturbiny gazowej dla zasilania metanowo-wodorowego masowo-półowicznego dla niezmienniej entalpii doprowadzonej przez paliwo



Literatura

- [1] Fafara J.-M., Modliński N., *Wewnętrzny układ recyrkulacji spalin w mikroturbinach gazowych jako metoda do współspalania paliw ze zwiększonym udziałem wodoru*, Zeszyty Energetyczne T. 7, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2020.
- [2] Fafara J.-M., Modliński N., *Numerical investigation of the internal flue gas recirculation system applied to methane powered gas microturbine combustor*, “Combustion Engines” 2021, Vol. 187(4), pp. 21–29, doi: 10.19206/CE-141583.
- [3] Fafara J.-M., Modliński N., *Numerical study of internal flue gas recirculation system applied to methane-hydrogen powered gas microturbine combustor*, “Combustion Engines” 2023, Vol. 192(1), pp. 63–77, doi: 10.19206/CE-152236.

DYSKRETYZACJA ZAAWANSOWANYCH MODELI GEOMETRYCZNYCH Z WYKORZYSTANIEM FLUENT MESHING FAULT-TOLERANT WORKFLOW NA PRZYKŁADZIE KADŁUBA ŁODZI SOLARNEJ SOLARIS II

DISCRETIZATION OF ADVANCED GEOMETRIC MODELS USING FLUENT MESHING FAULT-TOLERANT WORKFLOW BASED ON SOLARIS II SOLAR BOAT HULL

Jakub Flak^{1,2}, Wojciech Palka^{2,3}

¹Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

²Kolo Naukowe PWr Solar Boat Team, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

³Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: 247078@student.pwr.edu.pl

Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych wymusza przystosowanie narzędzi numerycznych do sprostania coraz bardziej szczegółowym geometriom. Technologia druku 3D umożliwia szybkie prototypowanie unikalnych komponentów, które na bieżąco mogą być optymalizowane na podstawie wyników symulacji komputerowych. Jeżeli walidacja eksperymentalna modelu przebiega pomyślnie, liczne koncepcje rozwiązań testowane są wirtualnie, co niewątpliwie zaoszczędza czas spędzony w laboratorium lub w jednostce certyfikacyjnej. Jednakże, w odróżnieniu od projektów CAD zapisywanych w rozszerzeniach STP/IGS (reprezentujących model jako całą bryłę), wytwarzanych najczęściej z użyciem CNC, formowania wtryskowego czy giętarek, projekty przeznaczone pod druk 3D zazwyczaj dostarczane są do analiz w postaci plików STL/OBJ (reprezentujących model na podstawie zewnętrznych wymiarów). Podczas konwersji plików STL/OBJ na formaty przystosowane do analiz numerycznych (STP/IGS) następuje próba „odtworzenia” całej bryły, co skutkuje generacją licznych pomniejszych figur. Komplikuje to model bryłowy, znacznie zwiększając jego rozmiar na dysku i utrudniając jego dyskretyzację.

Analizy cieplno-przepływowe (CFD) można przeprowadzać zarówno dla geometrii zamkniętych (np. wymienników, rurociągów, komór), jak i dla opływów zewnętrznych ciał (np. profili lotniczych, samochodów, łodzi). Dla pierwszego rodzaju symulacji badane są między innymi spadki ciśnienia i rozkłady prędkości, zaś dla drugiego rodzaju, opory i siły nośne. W niniejszej prezentacji zostanie przedstawiony proces prototypowania, siatkowania i badania numerycznego kadłuba, którego części

powstaną z użyciem technologii druku 3D, a następnie zostaną połączone i pokryte laminatem. Sam kadłub będzie stanowił podstawę łodzi solarnej Solaris II, która zostanie wykonana przez Koło Naukowe PWr Solar Boat Team. Bazą projektu była wiedza szkodnicza i stosowne obliczenia, zaś proces tworzenia i optymalizowania modelu 3D odbył się w oprogramowaniu *Blender*. Dyskretyzacja geometrii i domeny obliczeniowej została wykonana w *Fluent Meshing* z użyciem algorytmu *Fault Tolerant Meshing*. Wykorzystuje on metodę *wrappingu*, zalecaną szczególnie do wadliwych i skomplikowanych geometrii. Analiza pozwoliła na stworzenie konturu ciśnień oraz określenie wartości oporu hydrodynamicznego oddziałującego na kadłub. Ponadto, wykreślony został kształt formowania fali za łodzią.

Prace koncepcyjne nad kształtem łodzi zostały rozpoczęte od wyznaczenia oporów wodnych kadłuba. W tym celu posłużono się zależnościami empirycznymi przedstawionymi w literaturze [1]. Jednocześnie, celem było zapewnienie wymaganej stateczności łodzi. Ponieważ dla wyższych prędkości dominującym oporem jest opór falowy, przeanalizowana została możliwość zminimalizowania go poprzez odzysk oporu falowego w bryzg, który unosi łódź, zmniejszając tym samym jej kontakt z wodą. Z uwagi na sposób zasilania łodzi (energia słoneczna), wymagana jest jednak możliwość efektywnego pływania wypornościowego (przy niskich prędkościach). Dlatego też, dla wyższych prędkości docelowo zastosowane będą hydroskrzydła, które wymagają znacznie mniej mocy do uniesienia łodzi, minimalizując przy tym opory falowe.



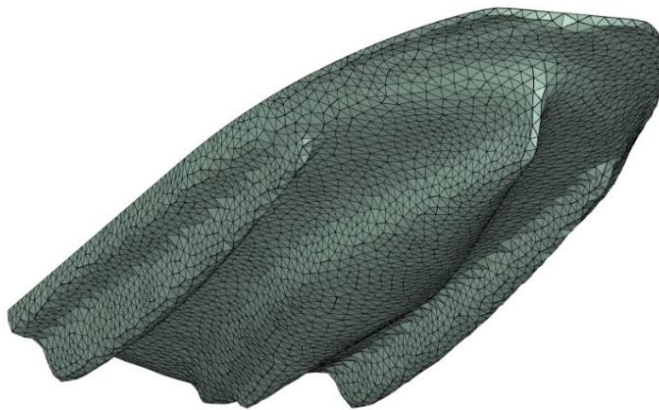
Rys. 1. Zaprojektowana geometria kadłuba łodzi solarnej Solaris II

Obliczenia owężenia kadłuba zostały wykonane pod kątem zapewnienia najmniejszego oporu i największej stabilności. Pomimo tego, że wąska i długa łódź znacznie obniża opory, skutkuje to niską statecznością. Z drugiej zaś strony, płaska i szeroka łódź, częściowo zanurzona w wodzie, zapewniałaby wysoką stateczność, zwiększając jednak energochłonność wprawienia jej w ruch. Z uwagi na dążenie do możliwie dużej powierzchni aktywnej dla paneli fotowoltaicznych, stateczność łodzi została projektowo zwiększona poprzez dodanie pływaków. Finalnie, geometria kadłuba została wykreślona w oparciu o empiryczną, parametryczną funkcję kształtu, definiującą punkty o określonych współrzędnych.

Optymalizacja modelu (poprzez np. zniwelowanie ostrych kątów, problematycznych do wytworzenia w druku 3D) została wykonana w oprogramowaniu *Blender*.



Rys. 2. Powierzchniowa siatka kadłuba dla $Wrap/Target\ Size\ Control\ Ratio = 5$



Rys. 3. Powierzchniowa siatka kadłuba dla $Wrap/Target\ Size\ Control\ Ratio = 0,05$

Zaprojektowana geometria kadłuba (rys. 1) odwzorowuje wiele detali. Z jednej strony można przewidywać, że dzięki temu otrzymane wyniki będą bardziej zbliżone do rzeczywistości, zaś z drugiej, proces siatkowania geometrii może być utrudniony ze względu na duże skomplikowanie modelu CAD. W omawianym przypadku problematyczny jest bardzo gęsty rozkład ścianek i punktów styku ścianek kadłuba, co niekorzystnie wpływa na typowy algorytm tworzenia elementów siatki numerycznej.

Po zaimportowaniu modelu do środowiska *SpaceClaim*, które jest rekomendowane do uprzedniego przystosowania geometrii do obliczeń, nie jest on bryłą, lecz obiektem typu *Faces*. Konwersja na postać



brylową znacznie zwiększa rozmiar pliku, powodując dodatkowo widoczne defekty będące skutkiem konwersji. Ręczne „naprawianie” geometrii wydaje się bardzo czasochłonne lub wręcz niemożliwe (łączenie sąsiednich powierzchni ścian poprzez interpolację sąsiednich węzłów nienaturalnie deformuje geometrie), co ogranicza nawet możliwość zastosowania narzędzi z zakładki *Repair* oraz *Prepare*. Istnieje poniekąd możliwość odwzorowania geometrii poprzez łączenie ze sobą licznych przekrojów poprzecznych, lecz znacząco wpływa to na zmianę kształtu rozważanego obiektu.

Remedium na powyższe problemy może być oprogramowanie *Fluent Meshing*, stanowiące alternatywę dla popularnego modułu *Ansys Meshing*. Użytkownik ma możliwość podążania dwoma algorytmami do siatkowania: *Watertight Geometry* oraz *Fault-Tolerant Meshing*. Pierwszy z nich, jak wskazuje nazwa, przeznaczony jest najczęściej dla geometrii szczelnych, zamykających w sobie jakąś objętość płynową. Drugi zaś, stosowany jest najczęściej do geometrii „brudnych” i kłopotliwych, nawet bez uprzedniej konwersji z pliku STL. Co więcej, w przypadku analiz opływowych, pozwala on na stworzenie domeny płynowej otaczającej rozważany model, wedle wymiarów wybranych przez użytkownika. Pozwala to na rozpoczęcie analizy bezpośrednio w *Fluent Meshing*. Wbudowana metoda *wrappingu* prezentuje odmienne podejście do siatkowania: „owija” ona rozważaną geometrię o skomplikowanym kształcie, tworząc własną, gładką powierzchnię. Jednym z parametrów determinujących dokładność *wrappingu* jest *Wrap/Target Size Control Ratio*, który wyraża stosunek rozmiaru elementów tworzących „owiniętą” geometrię do rozmiaru elementów domeny w zadanym obszarze. Pozwala to na dodatkowe zagęszczenie elementów powierzchniowych w pobliżu geometrii, respektując przy tym ograniczenia maksymalnej skośności siatki. Wpływ wspomnianego parametru na kształt siatki powierzchniowej został przedstawiony na rys. 2–3.

Analiza doboru optymalnej siatki powierzchniowej, która jednocześnie poprawnie odwzorowuje geometrię i utrzyma ilość elementów na niskim poziomie została zakończona stworzeniem siatki objętościowej dla całej domeny obliczeniowej zgodnie z zaleceniami ITTC [2]. Finalnie, została wykonana symulacja opływu łodzi w środowisku wielofazowym (woda oraz powietrze), która pozwoliła na wyznaczenie rozkładu ciśnień na powierzchni kadłuba. Uzyskane wartości oporu hydrodynamicznego pozwolą w przyszłości na wykonywanie analiz sprzężonych (FSI) wraz z modelowaniem materiałów kompozytowych, celem optymalizacji całkowitej masy łodzi.

Literatura

- [1] Marchaj C., *Teoria śgolowania. Hydrodynamika kadłuba*, Alma Press, 2013.
- [2] *Practical Guidelines for Ship CFD Applications*, ITTC Association, 2011.

ANALIZA AWARII KOTŁÓW WODNYCH OPALANYCH GAZEM W ELEKTROCIĘPŁOWNI MIEJSKIEJ

INVESTIGATION OF THE REASON OF THE FAILURE OF GAS-FIRED WATER BOILERS AT THE DISTRICT HEATING PLANT

Mariusz Granda¹, Marcin Trojan¹, Piotr Dzierwa¹, Jan Taler²

¹Katedra Procesów Ciepłych, Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

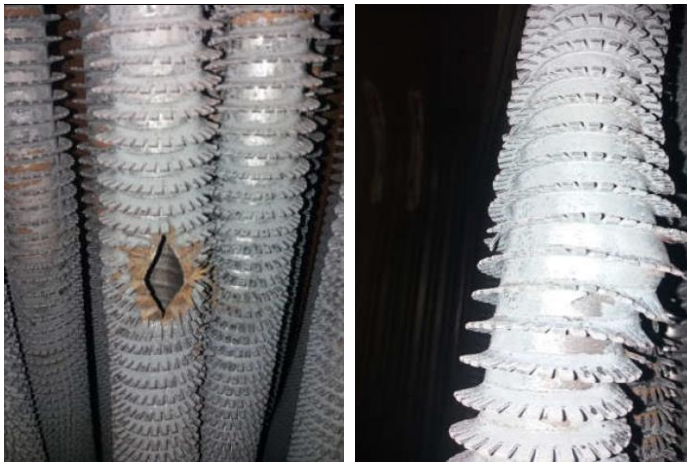
²Katedra Energetyki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

Adres do korespondencji: mariusz.granda@pk.edu.pl

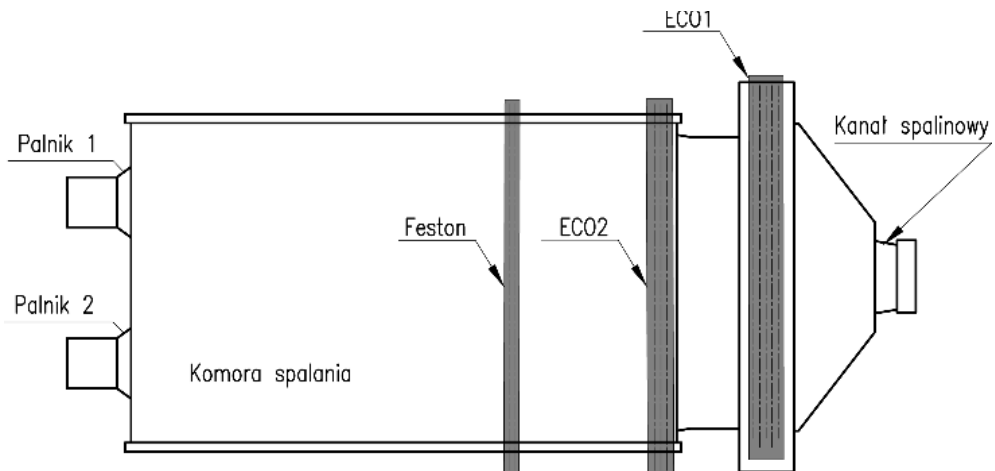
Dynamiczny wzrost zapotrzebowania na ciepło użytkowe oraz ograniczenia emisji spalin [1, 2] wymusza stosowania kotłów opalanych gazem ziemnym, w których szybki rozruch lub odstawienia są największymi zaletami [1, 3]. Proces projektowania takich jednostek powinien uwzględniać wszystkie aspekty związane z ich eksploatacją. Niestety, projektanci nie zawsze mają do dyspozycji narzędzia, które pomogłyby by im uniknąć wszystkich problemów, a te najpoważniejsze napotykanne są dopiero w trakcie eksploatacji zaprojektowanych urządzeń. W tym przypadku doszło do awarii kotła ciepłowniczego o mocy cieplnej 130 MW, który opalany jest gazem ziemnym. Urządzenie było w stanie pracować od kilku do kilkudziesięciu godzin, po czym nastąpiło pęknięcie wzdłużne rur podgrzewacza (rys. 1).

Dzięki modelowaniu komputerowemu możliwym było znalezienie przyczyn awarii. Cechą charakterystyczną analizowanego kotła (rys. 2) jest jego modułowa budowa oraz niewielka pojemność wodna, wynosząca 34,4 m³. Taka budowa ma umożliwiać przeprowadzanie szybkich rozruchów i odstawień z ruchu. W kotle zastosowano dwa palniki o mocy nominalnej 68,5 MW każdy. Przy tym układzie proces zwiększania mocy kotła może powodować gwałtowny wzrost temperatury spalin, co w konsekwencji może doprowadzić do wzrostu temperatury ścianki rur zarówno festonu jak i ECO2 powyżej temperatury dopuszczalnej. Kolejność powierzchni grzewalnych biorąc po uwagę kierunek przepływu spalin jest następująca: feston, ekonomizer 2 (ECO2), ekonomizer 1 (ECO1). W komorze paleniskowej i za komorą (do pierwszych rzędów ECO2) bardzo duży udział w wymianie ciepła będzie miało promieniowanie. ECO2 został wykonany z rur żebrowanych, co znacznie intensyfikuje proces wymiany ciepła. Taka konstrukcja może prowadzić do występowania miejsc niebezpiecznych, szczególnie narażonych na awarię na skutek przekroczenia temperatury granicznej materiału. Głównym materiałem użytym do budowy powierzchni grzewczych jest stal P235GH. W czasie pracy kotła za-

uważono, że w przy obciążeniu 67%, następuje spadek strumienia wody przepływającej przez kocioł, co utrudniało możliwość jednoznacznej oceny przyczyny awarii. Najbardziej prawdopodobnym jest wystąpienie zjawiska wrzenia blonowego przy ścianie rury w połączeniu ze zmianą gęstości przepływającej wody. Powstająca para powodować będzie zwiększanie się oporów przepływu. Ponadto, woda przepływając przez rury podgrzewacza wody ECO2 podgrzewa się zmieniając swoją gęstość. Mniejsza gęstość wody w dolnych częściach podgrzewacza również hamuje przepływ. Dodatkowo wydzielane z wody gazy, przy wzroście jej temperatury, intensyfikują proces hamowania przepływu wody. W skrajnych przypadkach jej przepływ może zostać zatrzymany.



Rys. 1. Widoczne zniszczenia pierwszego i drugiego rzędu rur podgrzewacza wody

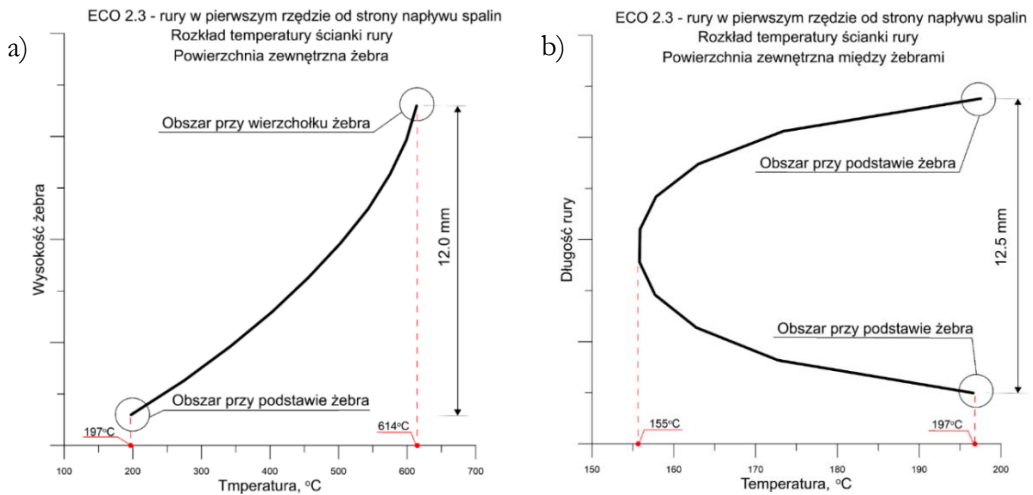


Rys. 2. Schemat powierzchni ogrzewalnych kotła

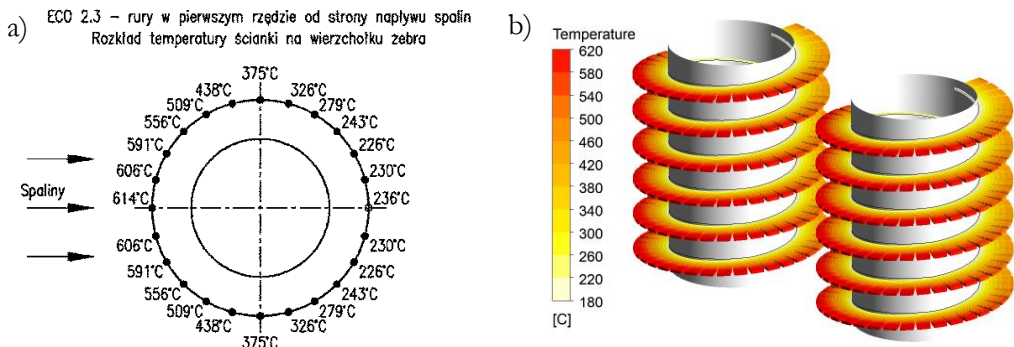
Dzięki modelowaniu komputerowemu możliwym było znalezienie przyczyn awarii. Cechą charakterystyczną analizowanego kotła (rys. 2) jest jego modułowa budowa oraz niewielka pojemność wodna, wynosząca $34,4 \text{ m}^3$. Taka budowa ma umożliwiać przeprowadzanie szybkich rozruchów i odstawień z ruchu. W kotle zastosowano dwa palniki o mocy nominalnej $68,5 \text{ MW}$ każdy. Przy tym układzie proces zwiększania mocy kotła może powodować gwałtowny wzrost temperatury spalin, co w konsekwencji może doprowadzić do wzrostu temperatury ścianki rur zarówno festonu, jak i ECO2 powyżej temperatury dopuszczalnej. Kolejność powierzchni ogrzewalnych biorąc po uwagę kierunek przepływu spalin jest następująca: feston, ekonomizer 2 (ECO2), ekonomizer 1 (ECO1). W komorze paleniskowej i za komorą (do pierwszych rzędów ECO2) bardzo duży udział w wymianie ciepła będzie miało promieniowanie. ECO2 został wykonany z rur żebrowanych, co znacznie intensyfikuje proces wymiany ciepła. Taka konstrukcja może prowadzić do występowania miejsc niebezpiecznych, szczególnie narażonych na awarię na skutek przekroczenia temperatury granicznej materiału. Głównym materiałem użytym do budowy powierzchni grzewczych jest stal P235GH. W czasie pracy kotła zauważono, że w przy obciążeniu 67% , następuje spadek strumienia wody przepływającej przez kocioł, co utrudniało możliwość jednoznacznej oceny przyczyny awarii. Najbardziej prawdopodobnym jest wystąpienie zjawiska wrzenia blonowego przy ściance rury w połączeniu ze zmianą gęstości przepływającej wody. Powstająca para powodować będzie zwiększanie się oporów przepływu. Ponadto, woda przepływając przez rury podgrzewacza wody ECO2 podgrzewa się zmieniając swoją gęstość. Mniejsza gęstość wody w dolnych częściach podgrzewacza również hamuje przepływ. Dodatkowo wydzielane z wody gazy, przy wzroście jej temperatury, intensyfikują proces hamowania przepływu wody. W skrajnych przypadkach jej przepływ może zostać zatrzymany.

Analiza przeplywowo-ciepłna obejmowała ekonomizer ECO2, który składa się z trzech sekcji (każda po dwa rzędy ozebrowanych rur). Pierwszy rząd rur od strony napływu spalin należy do sekcji ECO 2.3, która zbudowana jest z rur o średnicy zewnętrznej $d_{out} = 42,4 \text{ mm}$ i grubości ścianki $g = 2,6 \text{ mm}$. Rura jest spiralnie żebrowana. Wysokość żebra wynosi $h = 12 \text{ mm}$, a jego grubość $t_{fin} = 1 \text{ mm}$. Podziałka żebrowania wynosi $s = 12,5 \text{ mm}$. Materiał rur stanowi stal P235GH natomiast żebra wykonane są ze stali DC04. Analizowano przypadki odpowiadające założeniom projektowym dla obciążenia 100% , w których nie uwzględniono oraz uwzględniono warstwę tworzącej się pary przy ściance wewnętrznej rury. Przeprowadzone symulacje CFD pokazują bardzo duży wpływ radiacji na temperatury pracy pierwszych rzędów rur od strony napływu spalin. Przy 100% obciążeniu kotła temperatura wierzchołków żeber osiąga 614°C (rys. 3a). Temperatura wierzchołka żebra znacznie przekracza temperaturę dopuszczalną dla stali, z której wykonane są żebra. Temperatura ścianki wzdłuż wysokości żeber maleje, osiągając przy podstawie wartość 197°C . Spadek temperatury na odcinku 12 mm (wysokość żebra) wynosi $\Delta T = 417^\circ\text{C}$.

Temperatura zewnętrznej powierzchni ścianki rury między żebrami również osiąga największe wartości od strony napływu spalin. Przebieg zmian temperatury ma charakter paraboliczny (rys. 3b). Najwyższa temperatura na powierzchni międzyzebrowej osiągana jest u podstawy żebra i wynosi 197°C . Punkt o najniższej wartości temperatury znajduje się w połowie podziałki żebra (155°C). Ważną informacją stanowi rozkład temperatury ścianki żebra na jego obwodzie. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany temperatury żebra w jego wierzchołku (gdzie osiągane są maksymalne wartości) na obwodzie dla jednej podziałki.



Rys. 3. Rozkład temperatury dla pierwszego rzędu rur ECO2 od strony napływu spalin:
a) na powierzchni żebra, b) na powierzchni między żebrami

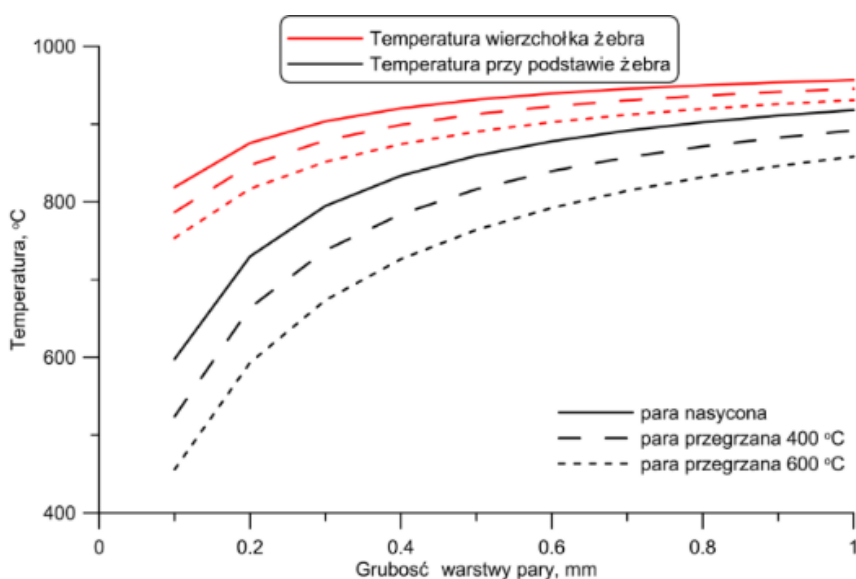


Rys. 4. Rozkład temperatury na obwodzie żebra w wierzchołku
(I rząd rur od strony napływu spalin)

Widać, że w przypadku pierwszego rzędu licząc od strony napływu spalin zmiany temperatury są bardzo wysokie. W części czołowej zmiany temperatury ścianki żebra w wierzchołku mieszczą się w zakresie od 375°C do 614°C. Tylna, osłonięta część żebra pracuje przy znacznie niższych temperaturach, od 226°C do 375°C. Różnica temperatury na obwodzie żebra wynosi 388°C. Tak duża różnica temperatury jest przyczyną dużych naprężeń w ściance rury. Duże naprężenia ściskające w żebrze od strony napływu spalin wywołują duże naprężenia rozciągające w ściance rury. W przypadku pracy rury z temperaturą ścianki zbliżoną do temperatury dopuszczalnej dla zastosowanego materiału spowodują bardzo szybkie zniszczenie (pęknięcie). W ramach przeprowadzonych sy-

mulacji komputerowych wyznaczono rozkład gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni rur od strony napływu spalin. Maksymalna wartość gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni rury występuje pod żebrą i wynosi $542\,700\text{ W/m}^2$, a najmniejsza w środku przestrzeni międzyżebrowej i wynosi $396\,300\text{ W/m}^2$. Obydwie gęstości strumienia ciepła są bardzo wysokie. Należy się spodziewać, że wystąpi wrzenie blonowe wody na wewnętrznej powierzchni rury od strony napływu spalin. Jeżeli różnica temperatury między ścianką a wodą jest niewielka, wtedy wrzenie ma charakter spokojny. Jeśli różnica ta wzrasta, może dojść do sytuacji, kiedy powstaje trwała błona pary oddzielająca powierzchnię grzejną rury od wrzącej cieczy [4]. W związku z tym sprawdzono, jaki wpływ na wartości temperatury żebra i rury ma trwała błona pary, oddzielająca powierzchnię ścianki od wody. Sprawdzono również jaki wpływ na pole temperatury metalu ścianki i żebra ma temperatura pary przegrzanej. Z analizy wyników obliczeń przedstawionych na rys. 5 i 6 wynika, że już bardzo cienka warstwa pary o grubości $0,1\text{ mm}$ powoduje gwałtowny skok temperatury żebra o ponad 200°C .

Wzrost grubość warstewki pary powoduje dalszy wzrost temperatury żebra. W przypadku wzrostu temperatury pary maleje temperatura żebra. Wynika to ze wzrostu wartości współczynnika przewodzenia ciepła pary przegrzanej. Podobne wnioski można wysnuć po analizie wyników dla ścianki rury. Już najcieńsza warstwa pary powoduje bardzo duży skok temperatury ścianki rur (który jest również uzależniony od stopnia przegrzania pary).

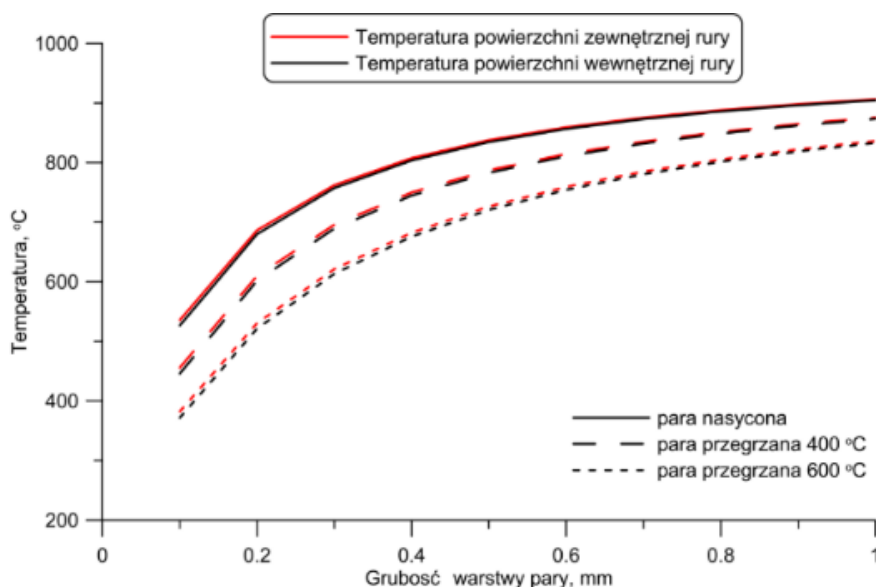


Rys. 5. Wpływ grubości warstwy pary oraz różnych temperatur pary na temperaturę żebra

Przeprowadzone obliczenia przeplywowo-ciepłne i analizy wytrzymałościowe pozwoliły sformułować następujące wnioski:

- uzyskane wyniki pokazują, że temperatura wierzchołka żebra znacznie przekracza temperaturę dopuszczalną dla stali, z której wykonane są żebra,

- z uwagi na stosunkowo niskie ciśnienie robocze wody nie przekraczające 1,6 MPa, temperatura nasycenia, przy której zachodzi wrzenie wody nie jest wyższa od 202°C. Należy się więc spodziewać, że przy występujących wysokich gęstościach strumienia ciepła przekraczających 500 000 W/m², wystąpi wrzenie błonowe wody (kryzys wrzenia I rodzaju) na wewnętrznej powierzchni rury od strony napływu spalin. Warstewka pary jest dobrym izolatorem cieplnym. Temperatura ścianki rury oraz żebra będzie przekraczać wartości dopuszczalne,
- główną przyczyną szybkiego uszkodzenia rur w pierwszym rzędzie podgrzewacza wody drugiego stopnia ECO2 jest zbyt wysoki strumień ciepła przejmowany przez żebra i rury od strony napływu spalin.



Rys. 6. Wpływ grubości warstwy pary oraz różnych temperatur pary na temperaturę powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej rury

Literatura

- [1] IEA, *Natural Gas-Fired Power*, Technical report, Paris, 2021, <https://www.iea.org/reports/natural-gas-fired-power>
- [2] Simic K. et al, *Modelling of a gas-fired heating boiler unit for residential buildings based on publicly available test data*, “Energy & Buildings” 2021, 253.
- [3] Weiland P., *Biogas production: current state and perspectives*, “Applied Microbiology and Biotechnology” 2010, Vol. 85, pp. 849–860, <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- [4] Serwiński M., *Principles of chemical engineering*, WNT, Warszawa 1976.

WPLYW TEMPERATURY OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH NA PARAMETRY PRACY MODUŁU FOTOWOLTAICZNEGO

THE INFLUENCE OF PHOTOVOLTAIC CELL TEMPERATURE ON THE PERFORMANCE OF A PHOTOVOLTAIC MODULE

Weronika Janowicz

Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: 260876@student.pwr.edu.pl

Sprawność modułów fotowoltaicznych jest stosunkowo mała. Dla modułów monokrystalicznych, wykonanych w najnowszej technologii, wynosi ona około 20%. Część energii promieniowania słonecznego, niezamieniona w energię elektryczną, stanowią straty w postaci energii cieplnej. Wiążący się z tym wzrost temperatury ogniw fotowoltaicznych ma negatywny wpływ na parametry pracy modułu. Dzieje się tak, ponieważ krzem w wyniku wzrostu temperatury traci zdolność do absorbowania promieniowania słonecznego [1]. O wpływie wzrostu temperatury ogniw powyżej temperatury STC (*Standard Test Conditions*), wynoszącej 25°C, na parametry pracy modułu fotowoltaicznego informują współczynniki temperaturowe, charakterystyczne dla wybranego modelu.

W pracy przedstawiono bilans energii modułu fotowoltaicznego wraz z uwzględnieniem podziału strat, wynikającego z różnych sposobów wymiany ciepła. Ponadto zaprezentowano modele umożliwiające obliczenie temperatury ogniw fotowoltaicznych na podstawie znajomości temperatury otoczenia, natężenia promieniowania słonecznego oraz prędkości wiatru. Wykorzystując dane modele zbadano wpływ zmiany temperatury ogniw na parametry pracy modułu fotowoltaicznego, takie jak: prąd zwarcia, napięcie obwodu otwartego, moc w maksymalnym punkcie pracy, sprawność. Analizę przeprowadzono na podstawie statystycznych danych klimatycznych dla typowego roku meteorologicznego. W tym celu wybrano pięć stacji meteorologicznych, znajdujących się w różnych strefach klimatycznych Polski, aby pokazać różnice wpływu temperatury ogniw fotowoltaicznych na pracę modułu, wynikające z położenia geograficznego instalacji. W pracy przedstawiono także sposoby obniżenia temperatury modułów fotowoltaicznych oraz koncepcję stanowiska badawczego służącego do chłodzenia modułów fotowoltaicznych przy pomocy wody.

Literatura

- [1] Ćwikłowska A. et al., *Influence of module temperature on the operating parameters of photovoltaic modules*, “Instal” 2022, No. 6, pp. 16–22, doi: 10.36119/15.2022.6.2.

WPŁYW DŁUGOTRWAŁEGO ODDZIAŁYWANIA TEMPERATURY NA ZMIANĘ MIKROSTRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH STALI SUPER 304H O OSNOWIE AUSTENITYCZNEJ STOSOWANYCH W NOWOCZESNEJ ENERGETYCE

THE INFLUENCE OF STRONG TEMPERATURE ON THE CHANGE OF THE MICROSTRUCTURE AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF SUPER 304H STEEL WITH AN AUSTENITIC MATRIX USED IN MODERN ENERGY

Milena Kierat¹, Hanna Purzyńska¹, Lucie Pilsová²

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Badań Materiałów,
Badania Materiałów dla Energetyki

² Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering,
Department of Materials Engineering

Adres do korespondencji: milena.kierat@git.lukasiewicz.gov.pl

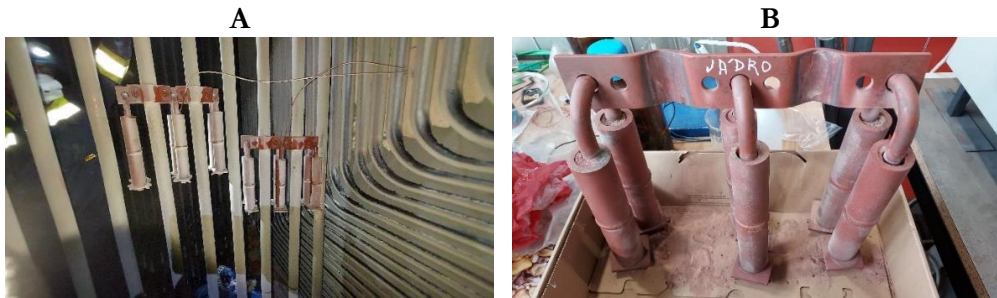
W ramach realizacji projektu wymiany studentów ERASMUS+ nastąpiła współpraca pomiędzy Siecią Badawczą Łukasiewicz – jeszcze ówczesnym Instytutem Metalurgii Żelaza – z firmą UJP PRAHA a.s. i Politechniką Czeską w Pradze – Wydziałem Mechanicznym – w zakresie badań wytrzymałościowych i obserwacji zmian mikrostruktury. Głównym celem projektu było przeprowadzenie szeregu badań podstawowych mających na celu określenie wpływu wysokiej temperatury i naprężenia na zmiany mikrostruktury oraz właściwości użytkowych stali Super 304H o osnowie austenitycznej stosowanej w nowoczesnej energetyce.

Podobnie jak w Polsce, w Czechach kładzie się nacisk na zwiększenie żywotności i sprawności istniejących konwencjonalnych elektrowni węglowych. Pomimo ogólnoeuropejskiego trendu dekarbonizacji, w dzisiejszej sytuacji kluczowe jest utrzymanie stabilności miksu energetycznego poprzez bezpieczną i efektywną eksploatację elektrowni węglowych. Zwiększenie sprawności konwencjonalnych źródeł węglowych polega głównie na pracy w trybie nadkrytycznym. Nowo wybudowane w Polsce bloki energetyczne o nadkrytycznych parametrach pracy pracują w temperaturze do około 625°C i przy ciśnieniu pracy przynajmniej do ok. 30 MPa [1–4].

W ramach realizacji projektu FV40166 Ministerstwa Przemysłu i Handlu Republiki Czeskiej zaprojektowano eksperyment we współpracy z UJP Praha a.s., CTU w Pradze i Elektrárna Opatovice. Materiałem do badań były rury o wymiarach $\varnothing 38 \times 6,3$ mm, ze stali SUPER 304H z jednorodnymi doczołowymi złączami spawanymi, mocowane na specjalnym statywie w bezpośrednim sąsiedztwie rur przegrzewacza pary i wyżarzane przez 30 000 godzin w temperaturze 585°C . Sposób zamocowanie próbek przestawiono na rys. 1A. Próbkę do badań umieszczono w przegrzewaczu (8 piętro, 32 m, kocioł K1 w Elektrárnej Opatovicach, pobrano podczas przerwy technicznej latem 2022 r.).

Po doprowadzeniu obu uchwytów do UJP (rys. 1B) odcięto kolki mocujące i usunięto próbki spoin z prętów nośnych. Gazy spalinowe uwiecznione w rurach wlewano do specjalnie oznakowanych worków (oznaczony rdzeń – „jádřo” i ściana – „stěna”).

Materiał do badań z Polski z kotła na parametry nadkrytyczne stanowiły 4 wycinki rur węzownic przegrzewacza pary pierwotnej kotła dużej mocy na parametry nadkrytyczne, oznaczone, odpowiednio, nr 5 i nr 7, o wymiarach $\varnothing 44,5 \times 7,5$, oraz nr 6 i 8 – o wymiarach $\varnothing 44,5 \times 5,2$ mm i długości ok. 1770 mm, wykonane ze stali SUPER 304H, po eksploatacji przez 31 000 godzin w temperaturze 568°C . Wycinki do badań pokazano na rys. 2.



Rys. 1. A) Zawieszona w obszarze węzownic przegrzewacza pary pierwotnej kotła nr 1 Elektrowni w Opatovicach (Czechy) próbek doświadczalnych, B) Zdemonstrowane próbki doświadczalne zawieszona w obszarze węzownic przegrzewacza pary pierwotnej kotła nr 1 Elektrowni w Opatovicach (Czechy) po 30 tys. godzin wyżarzania w temperaturze 585°C

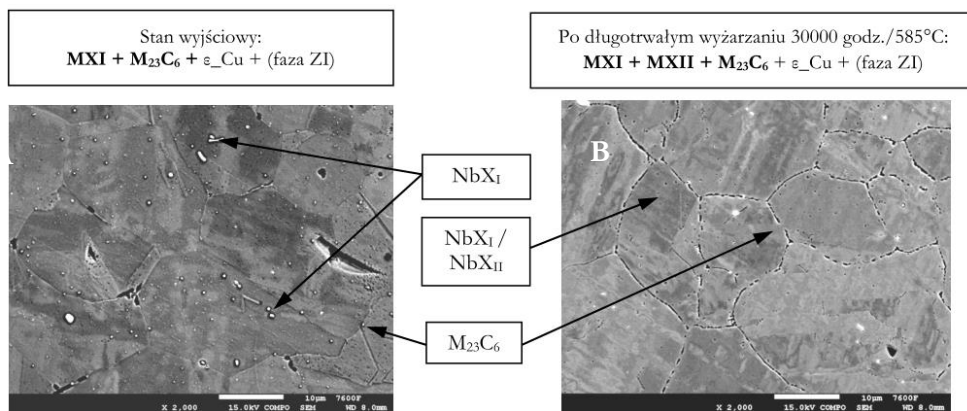


Rys. 2. Materiał do badań w postaci wycinków rur węzownic o wymiarach $\varnothing 44,5 \times 7,5$ mm i $\varnothing 44,5 \times 5,2$ mm i długości ok. 1770 mm ze stali SUPER 304H, po eksploatacji przez ok. 31 000 godzin w temperaturze 568°C w kotle dużej mocy na parametry nadkrytyczne

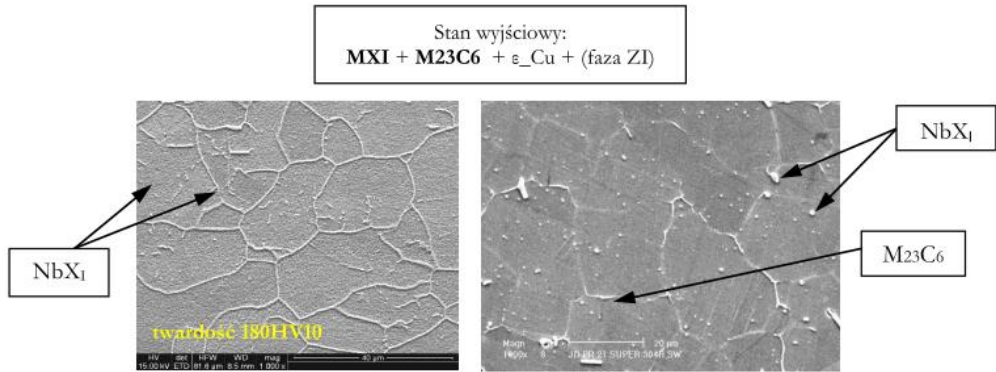
W mikrostrukturze materiału z Republiki Czeskiej z kotła K1 Elektrycznej w Opatovicach w stanie wyjściowym (rys. 3A) o strukturze austenitycznej obserwowano zróżnicowanej wielkości, raczej drobne, wydzielenia pierwotne MXI bogate w niob, co wynika ze składu chemicznego badanej stali występujące głównie wewnątrz ziarn. Ponadto na granicach ziarn ujawniono nieliczne drobne wydzielenia M₂₃C₆ (rys. 3A). Ponadto należy oczekiwać występowania licznych ale bardzo drobnych wydzieleni miedzi ε_{Cu}. Mogą również pojawić się bardzo drobne wydzielenia pierwotne fazy ZI. Ujawnienie występowania wydzieleni miedzi oraz fazy ZI wymaga wykonania rentgenowskiej analizy wyizolowanych elektrochemicznie osadów wydzieleni oraz identyfikacji na cienkich foliach w transmisyjnym mikroskopie elektronowym. Po długotrwałym wyżarzaniu o badanej stali na granicach ziarn pojawiły się łańcuszki niewielkich wydzieleni, które po cechach morfologicznych można przypisać węglikom M₂₃C₆. Natomiast drobne wydzielenia wewnątrz ziarn to prawdopodobnie pierwotne i wtórne wydzielenia MX (NbXI, NbXII) (rys. 3B).

Eksploatacja w kotle na parametry nadkrytyczne węzownicy przegrzewacza pary z badanej stali w temperaturze 568°C w przez ok. 31 tys. godzin spowodowała również zmiany w strukturze w zakresie rozwoju procesu wydzieleniowego w stosunku do stanu wyjściowego, co pokazano na rys. 4. Twardość wynosi od 202 do 218 HV10 w zależności od węzownicy. Charakter zmian w tym zakresie jest podobny jak w materiale po długotrwałym wyżarzaniu jednak o znacznie większej jego dynamice (rys. 5 i 6).

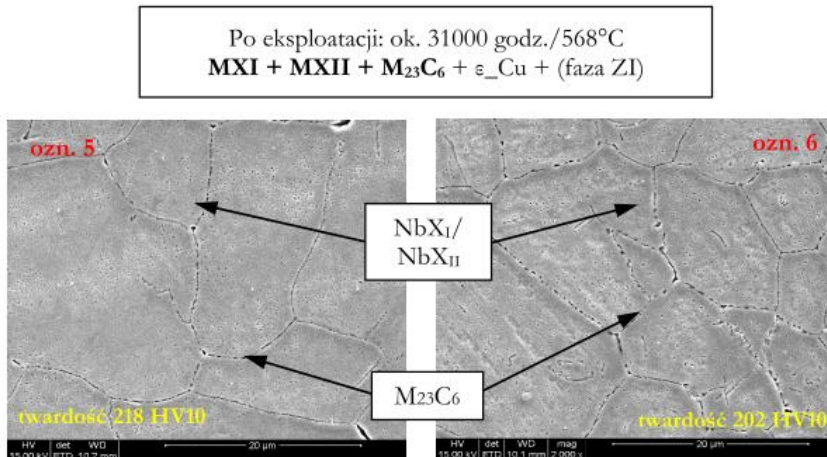
Wydzielenia węglików M₂₃C₆ są większe, a wydzieleni MX (NbXI, NbXII) jest znacznie więcej i również o nieco większych rozmiarach. Należy ponadto zwrócić uwagę, że również występują różnice w zależności od węzownicy, co może wynikać z różnic w stanie wyjściowym oraz różnic w temperaturze pracy w zależności od miejsca pobrania materiału do badań (na długości węzownicy oraz odległości węzownicy od osi komory parownika).



Rys. 3. Porównanie obrazów mikrostruktury stali SUPER 304H w stanie wyjściowym (a) oraz po długotrwałym wyżarzaniu (przez 30 tys. godzin) w temperaturze 585°C w kotle na parametry nadkrytyczne (b), obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym (ujawnione typy wydzieleni zaznaczono pogrubioną czcionką)

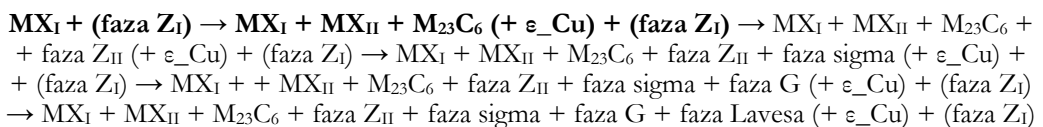


Rys. 4. Obraz mikrostruktury stali SUPER 304H w stanie wyjściowym, obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym (ujawnione typy wydzielen zaznaczono pogrubioną czcionką)



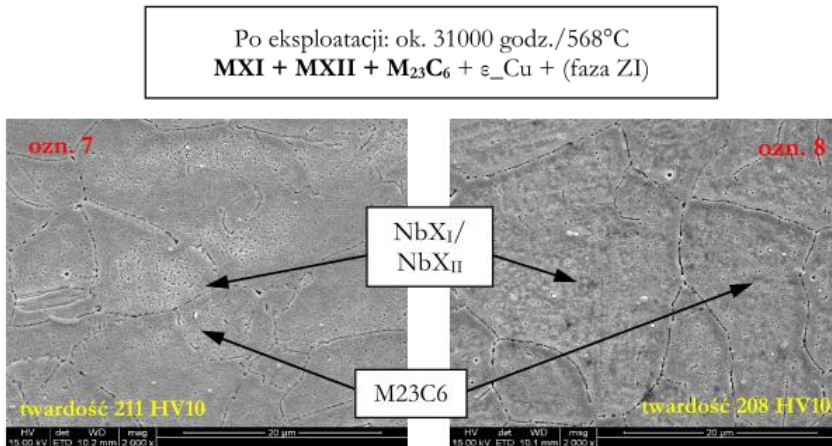
Rys. 5. Obraz mikrostruktury stali SUPER 304H po eksploatacji w węzłownicach przegrzewacza pary pierwotnej III stopnia, przez 31 tys. godzin, w temperaturze 568°C, w kotle na parametry nadkrytyczne, obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym (ujawnione typy wydzielen zaznaczono pogrubioną czcionką) – oznaczenia 5 i 6

Na podstawie wcześniej wykonanych badań w Instytucie oraz danych literaturowych zdefiniowano sekwencję w ramach rozwoju procesu wydzielenia się faz wtórnych, którą można przedstawić następująco:



→ $MX_I + MX_{II} + M_{23}C_6 + \text{faza } Z_{II} + \text{faza sigma} + \text{faza } G + \text{faza Lavesa} + \text{faza } \chi (+ \epsilon_{Cu}) +$
 + (faza Z_I)

Zaznaczone etapy tej sekwencji pogrubioną czcionką dotyczą zakresu ujawnionego w przeprowadzonych badaniach.



Rys. 6. Obraz mikrostruktury stali SUPER 304H po eksploatacji w węzłownicach przegrzewacza pary pierwotnej III stopnia, przez 31 tys. godzin, w temperaturze 568°C, w kotle na parametry nadkrytyczne, obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym (ujawnione typy wydzielenia pogrubioną czcionką) – oznaczenia 7 i 8

Należy badania kontynuować szczególnie w badaniach stanu rozwoju procesów wydzieleniowych z wykorzystaniem rentgenowskiej analizy fazowej oraz skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej oraz odporności na pęcznienie w warunkach temperaturowo-naprężeniowych odpowiadających eksploatacyjnym.

Literatura

- [1] Fuji A., Kern T.U., *Creep-resistant steels*, Woodhead, Cambridge, 2008, ISBN 978-1-84569-178-3.
- [2] Dobrzański J., Zieliński A., *Austenityczne stale w gatunkach Super304H i HR3C na elementy części ciśnieniowych kotłów bloków energetycznych o nadkrytycznych parametrach pary*, „Materiały i technologie stosowane w budowie kotłów o parametrach nadkrytycznych o temperaturze pary do 700°C” 2013, III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza Power Welding 2013, Gliwice–Ostaniec, s. 223–243.
- [3] Golański G., *Żarostojne stale austenityczne*, Wyd. Pol. Cz., Częstochowa 2017.
- [4] Dobrzański J. i in., *Doświadczenia z zastosowania nowych stali do wytwarzania nowych elementów kotłów na parametry nadkrytyczne*, „Prace IMŻ” 2010, No. 1, s. 51–60.

DRONY – PRZEGLĄD OBECNYCH ZASTOSOWAŃ

DRONES – CURRENT APPLICATION REVIEW

Michał Lepszy

Katedra Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: michal.lepszy@pwr.edu.pl

W ostatnich latach technologia bezzałogowych statków powietrznych, zwanych również dronami lub UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*), zyskała na popularności. Drony są wykorzystywane w różnych dziedzinach, od lotnictwa po rolnictwo. Wraz z rozwojem technologii i wprowadzaniem nowych zastosowań, drony zyskały olbrzymi obszar do rozwoju i zagospodarowania.

Warto zaznaczyć, że terminologia dotycząca tych bezzałogowych statków powietrznych nie jest jednoznaczna. W języku potocznym używa się często nazwy „dron”, która odnosi się powszechniej do modeli hobbistycznych czy rekreacyjnych. Jednak w przypadku zastosowań profesjonalnych, zwłaszcza w wojskowości używa się terminu UAV, czyli bezzałogowy statek powietrzny. Powszechnie pojęcia te używane są zamiennie, gdzie „dron” jest bardziej znane.



Rys. 1. Northrop Grumman Bat UAV (lot w lipcu 2014) (domena publiczna) [1]

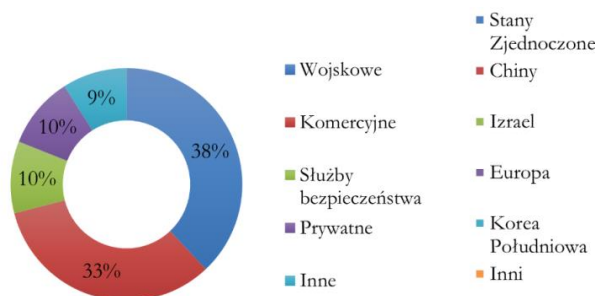
Obecnie UAV wykorzystywane są w różnych dziedzinach. W sektorze lotniczym drony są używane m.in. do inspekcji i kontroli lotnisk, a także do badań meteorologicznych. W przemyśle filmowym drony są używane do nagrywania ujęć lotniczych i ujęć z lotu ptaka, co pozwala na uzyskanie efektów,

których wcześniej nie dało się osiągnąć. W rolnictwie drony są wykorzystywane do monitorowania upraw, badania jakości gleby i opryskiwania roślin. W sektorze energetycznym drony pomagają w inspekcji elektrowni i przesyłowych linii energetycznych. Ilość zastosowań w zasadzie jest jedynie ograniczona metodą użycia w oparciu o dostępne na rynku czujniki i systemy IT.

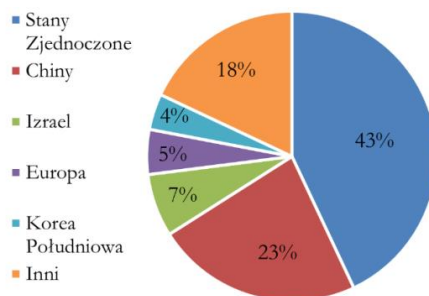
Przyszłość dronów mieni się w świetlanych barwach. Rozwój technologii, w tym sztucznej inteligencji, czujników i bardziej wydajnych baterii, pozwala na ciągły wzrost możliwości dronów, chociażby jak pracę w rojach kontrolowanych przez sztuczną inteligencję.

Według raportu „Markets and Markets” z 2020 roku globalny rynek UAV został wyceniony na 22,3 miliarda dolarów i przewiduje się, że osiągnie 42,8 miliarda dolarów do roku 2025, rosnąc na poziomie 13,1% od 2020 do 2025 roku.

Jeśli chodzi o obszary zastosowań, w tym samym sprawozdaniu wskazano, że w 2020 r. największy udział w rynku bezzałogowych statków powietrznych miał sektor wojskowy i obronny, a następnie sektor komercyjny. Oczekuje się jednak, że w nadchodzących latach sektor komercyjny będzie rozwijał się szybciej ze względu na coraz powszechniejsze stosowanie bezzałogowych statków powietrznych do różnych zastosowań, takich jak pomiary i mapowanie, rolnictwo, usługi dostawcze i inne.



Rys. 2. Podział rynku UAV na kategorie użytkownika 2020 [2]



Rys. 3. Podział rynku UAV na kraje użytkownika 2020 [2]

Literatura

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle [data pobrania: 12.04.2023].
- [2] <https://www.civtaglobal.org/drone-industry-monitor> [data pobrania: 12.04.2023].
- [3] <https://thedroneracingleague.com/> [data pobrania: 12.04.2023].
- [4] <https://www.kickstarter.com/projects/massoudhassani/mine-kafon-drone> [data pobrania: 12.04.2023].
- [5] <https://everdrone.com/> [data pobrania: 12.04.2023].
- [6] <https://skypportsdroneservices.com/> [data pobrania: 12.04.2023].
- [7] <https://www.outlookindia.com/travel/dubai-will-soon-get-its-first-flying-taxi-from-the-palm-news-201555> [data pobrania: 12.04.2023].

PORÓWNANIE STRUKTUR PRZEPŁYWU ORAZ CHARAKTERYSTYK ENERGETYCZNYCH POMPY NORMOWEJ UŻYTKOWANEJ JAKO POMPA ORAZ TURBINA WODNA

COMPARISON OF THE FLOW STRUCTURES AND CHARACTERISTICS CURVES OF A STANDARD PUMP USED AS A PUMP AND A WATER TURBINE

Witold Lorenz¹, Marcin Janczak¹, Przemysław Szulc², Artur Machalski²

¹Dział Badawczo-Rozwojowy, Hydro-Vacuum S.A.

²Katedra Inżynierii Konwersji Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

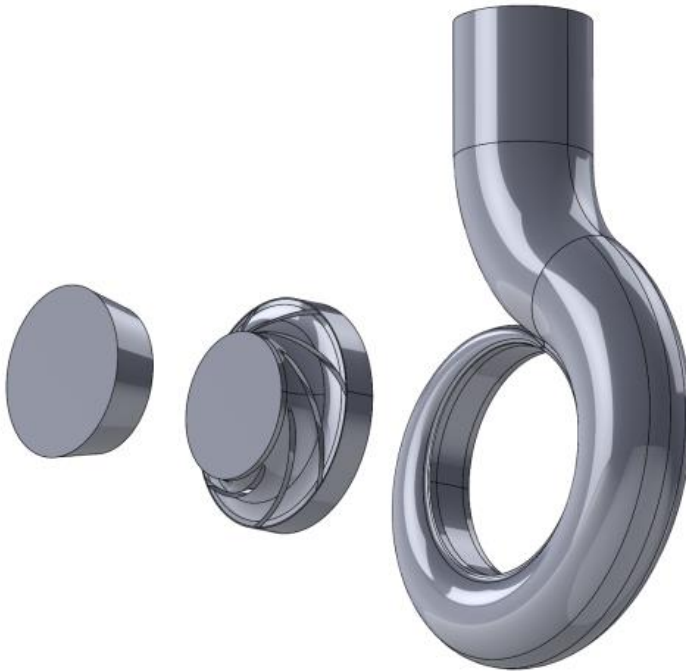
Adres do korespondencji: *w.lorenz@bv.pl*

Energetyka wodna jest jednym z najstarszych źródeł energii wykorzystywanym na świecie. Jest odnawialna, ekologiczna oraz niezależna od paliw kopalnianych. Technologia produkcji energii z wody, zarówno mechanicznej, jak i elektrycznej w związku z tym, że jest rozwijana od dawna stoi na bardzo wysokim poziomie technicznym. W światowym bilansie wytwarzania energetyka wodna stanowi około 16% globalnej produkcji [1]. Pomimo wielu zalet boryka się ona również z wieloma problemami, szczególnie dotyczą one większych elektrowni wodnych, których budowa często wymaga bardzo dużych nakładów finansowych co przekłada się na długie okresy zwrotu. Dodatkowo wiąże się to z koniecznością zatapiania dużych obszarów, co niesie za sobą wiele problemów zarówno społecznych jak i ekologicznych. Stąd też możliwość budowy dużych elektrowni wodnych, choć korzystna ze względu na ekonomię skali, nie zawsze może być zrealizowana ze względów: ekonomicznych, społecznych, politycznych bądź ekologicznych. W rezultacie tego w ostatniej dekadzie gwałtownie wzrosło zainteresowanie wykorzystaniem energii wodnej na małą skalę, w tym możliwości rekuperacji energii hydraulicznej z wykorzystaniem pomp.

W referacie zaprezentowano wyniki modelowania numerycznego zjawisk przepływowych występujących w pompie odśrodkowej pracującej w reżimach: pompowym i turbinowym. Wyznaczone zostały pełne charakterystyki energetyczne, zarówno pompowe, jak i turbinowe. Dodatkowo na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono analizę dostępnych modeli przeliczeniowych charakterystyk pompowych na turbinowe.

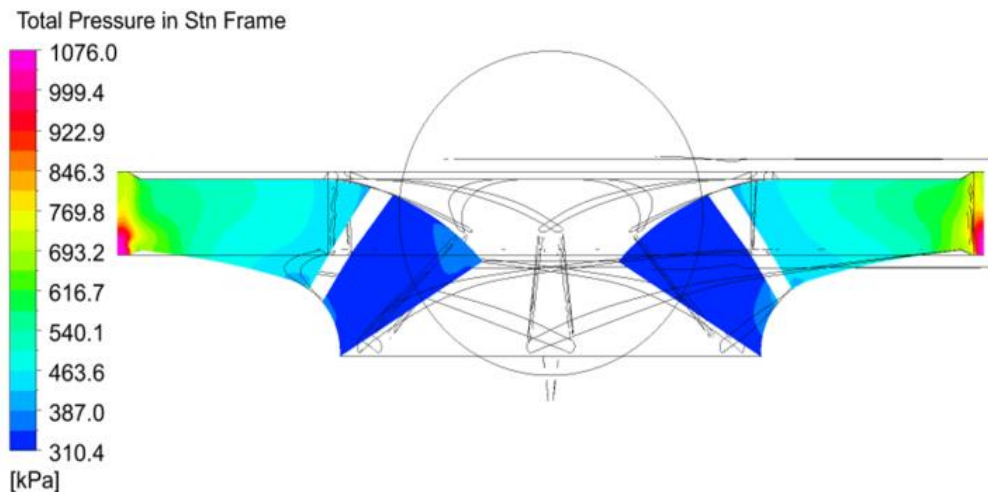
Celem badań była identyfikacja i analiza zjawisk przepływowych w pompie odśrodkowej, pracującej w reżimach: pompowym i turbinowym. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem symulacji numerycznych przepływu. Przeprowadzone symulacje pompy w trybie normalnej pracy były podstawą do weryfikacji dostępnych w literaturze algorytmów przeliczeniowych. Dodatkowo charakterystyka pompy dostarczona przez producenta wykorzystana została jako baza do weryfikacji symulacji numerycznych. Opracowanie zawiera zestawienie wyników badań symulacji numerycznych oraz ich analizy wraz z porównaniami i oceną dokładności modeli przeliczeniowych dostępnych w literaturze [2, 3].

Przedmiotem badań jest typowa pompa wirowa, jednostopniowa, odśrodkowa. Model pompy przedstawiono na rys. 1. Badania jednostki pompowej, zarówno w ruchu pompowym jak i turbinowym, przeprowadzono w całym zakresie charakterystyk pracy, który założono od $0,2 Q_n$ do $1,4 Q_n$. Przepływ nominalny (Q_n) został wyznaczony osobno dla obu trybów pracy.



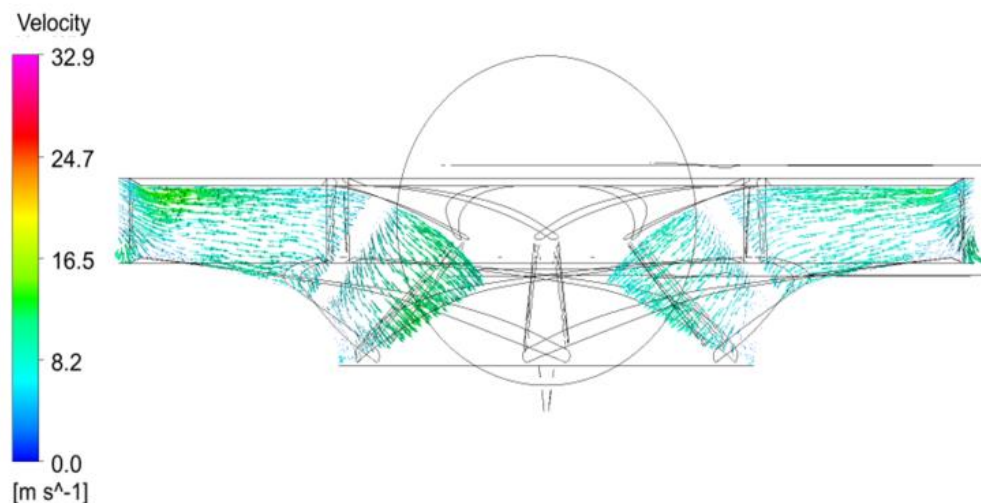
Rys. 1. Model geometrii pompy

Symulacje przeprowadzono dla modelu podzielonego na dwie domeny: stacjonarną – spiralę oraz ruchomą – wirnik. Siatka numeryczna została wykonana według wszystkich zaleceń wybranego modelu turbulencji (k -epsilon). Wartości Y^+ w warstwie przyściennej zarówno wirnika, jak i spirali zawierały się w zalecanych zakresie. Obliczenia prowadzono jako stacjonarne. Wykorzystano algorytm obliczeniowy Coupled, metody dyskretyzacji wybrano jako pierwszego i drugiego rzędu. Model turbulencji oraz ustawienia solvera wybrano na podstawie zaleceń dostępnych w pracy [4] oraz na podstawie doświadczenia wynikającego z prowadzonych analiz i badań niniejszych autorów.

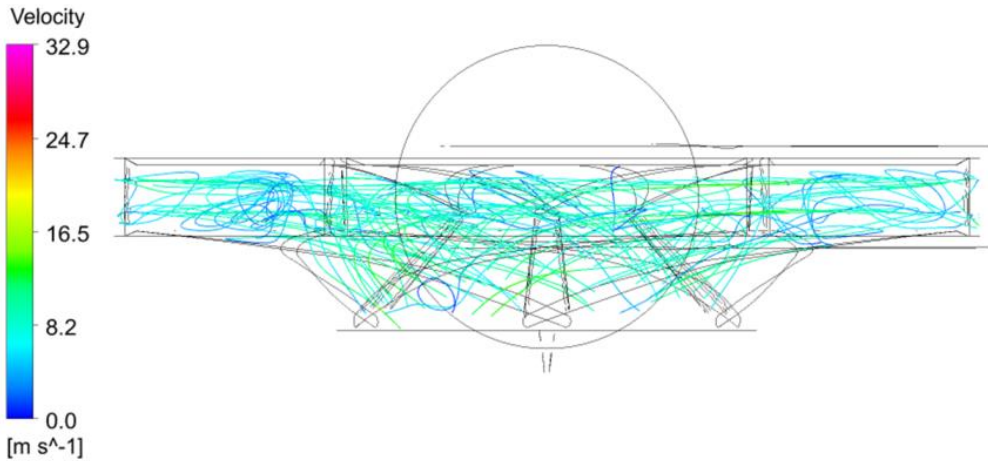


Rys. 2. Rozkład ciśnienia całkowitego – wirnik – praca turbinowa

Jako referencyjną wartość przepływu wykorzystaną do oceny jakościowej pompy w ruchu turbiny przyjęto punkt optymalny. Wizualizacje wyników symulacji przedstawiono na rys. 2–4. W przypadku pracy turbinowej (rys. 2–4) dla punktu optymalnego występują zdecydowanie intensywniejsze strefy recyrkulacji w porównaniu do trybu pracy pompowego. Rozkład ciśnienia w wirniku (rys. 2) jest zdecydowanie bardziej stabilny i nie posiada dużych anomalii. Nieostrzeżalne są obszary ze strefami martwymi.



Rys. 3. Wektory prędkości – wirnik – praca turbinowa



Rys. 4. Linie prądu – wirnik – praca turbinowa

Przeprowadzone analizy pozwoliły na jakościową jak i ilościową analizę badanej pompy w ruchu turbinowym. Numerycznie wyznaczone charakterystyki pozwoliły na weryfikację dostępnych w literaturze metod przeliczeniowych. W większości przypadków pozwalają one na zgrubne wyznaczenie potencjalnych charakterystyk pompy w ruchu turbinowym. Bazując na wnioskach z innych publikacji, można stwierdzić, że różne metody obliczeniowe mają zmienną dokładność przeliczeń, która jest funkcją wyróżnika szybkobieżności. Przyszłe prace powinny się skupić na opracowaniu jednolitej, dokładniejszej metody obliczeniowej, która będzie słuszna dla szerokiego zakresu wyróżnika szybkobieżności.

Źródło finansowania

Projekt współfinansowany jest z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój – konkurs: Szybka Ścieżka. Temat projektu: Prace badawcze nad opracowaniem zintegrowanej innowacyjnej konstrukcji miniturbin i pomp normowych. Numer wniosku: POIR.01.01.01-00-1261/20.

Literatura

- [1] British Petroleum, *Statistical Review of World Energy*, 69th ed., 2020.
- [2] Sanjay V.J., Patel R.J., *Investigations on pump running in turbine mode: A review of state-of-the-art*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2014, Vol. 30, pp. 841–868.
- [3] Stelzer S., Walters R.N., *Estimating Reversible Pump-Turbine Characteristics*, Engineering Monograph No. 39.
- [4] Frosina E., Buono D., Senatore A., *A Performance Prediction Method for Pumps as Turbines (PAT) Using a Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling Approach*, “Energies” 2017, Vol. 10, 103, doi:10.3390.

ANALIZA PORÓWNAWCZA OBLICZEŃ TEORETYCZNYCH I RZECZYWISTEJ PRACY SYSTEMÓW FOTOWOLTAICZNYCH

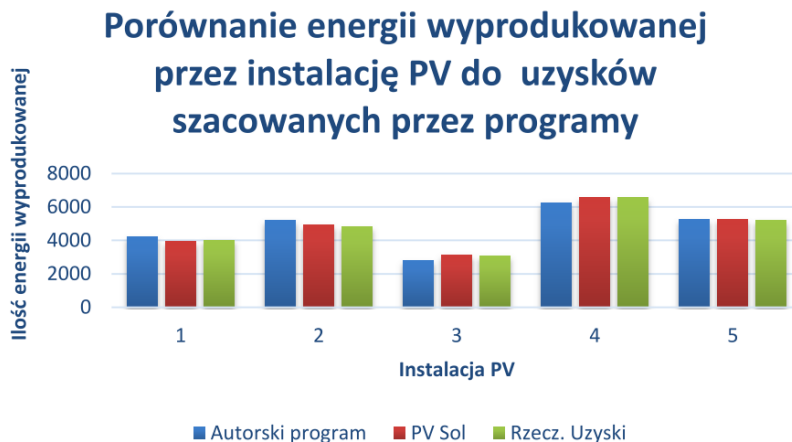
COMPARATIVE ANALYSIS OF THEORETICAL CALCULATIONS AND ACTUAL OPERATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Marcin Michalski, Alan Ochman

Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: alan.ochman@gmail.com

W pracy badawczej przeanalizowano pięć mikroinstalacji z różnych rejonów Polski, opartych o układy szeregowo oraz równoległe, wyposażone w systemy optymalizujące pracę oraz wykonano projekty każdej z analizowanych instalacji w programach służących do obliczania uzysków energetycznych. Porównano w ujęciu miesięcznym oraz rocznym, uzyski rzeczywiste instalacji badanych do wyników pochodzących z projektów powstałych przez programy pochodzące od producentów falowników wchodzących w skład instalacji fotowoltaicznych. Dodatkowo do wykonania analizy porównawczej różnych programów wykorzystano projekty pochodzące z niezależnego programu PV Sol.



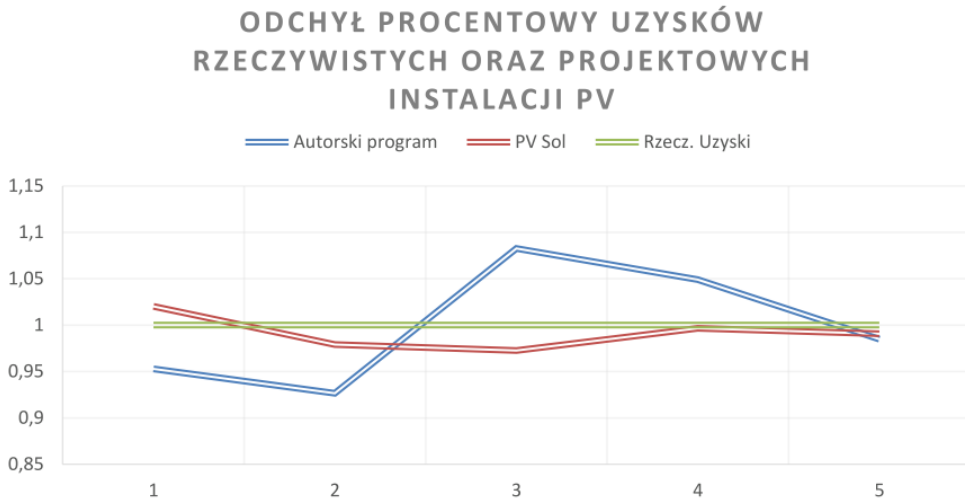
Rys. 1. Porównanie energii wytworzonej przez instalacje do energii obliczonej przez programy różnych autorów [1]

Instalacje fotowoltaiczne analizowane w pracy, posiadały komponenty pochodzące od różnych producentów, moduły PV posiadały różną moc oraz technologię a warstwa zbierająca była skierowana w różnych kierunkach świata. W ramach analizy porównawczej rzeczywistej pracy układów, obliczono odchyły procentowe między wynikami projektów a danymi wynikającymi z uzysków pochodzących z monitoringu instalacji, co miało w efekcie określić dokładność programów służących do obliczania wyprodukowanej energii z instalacji PV.

W przypadku obliczania comiesięcznych różnic uzyskowych instalacji, można było zauważyć spore odchyły między zakładaną przez programy ilością energii wytworzonej w przypadku każdej instalacji w porównaniu do rzeczywistej produkcji energii elektrycznej, natomiast za każdym razem były to podobne różnice, co wskazywało na zróżnicowane na przestrzeni miesięcy warunki pogodowe w roku 2021 w Polsce.

Poprzez porównanie procentowe odchyleń projektów pochodzących od różnych autorów oraz rzeczywistej energii wytworzonej przez systemy fotowoltaiczne, stwierdzono większą dokładność programu PV Sol w stosunku do innych użytych w badaniach programów. Największy odchył procentowy między oszacowaną energią a uzyskaną rzeczywistości wyniósł w przypadku PV Sol na poziomie jedynie 3%, gdy w przypadku innych programów ta wartość potrafiła być nawet dwukrotnie wyższa.

Tak dokładne oszacowanie przez program PV Sol uzysków energii elektrycznej pochodzącej ze Słońca, udowodniło sens inwestowania w programy płatne, pochodzące od niezależnych producentów, gdyż daje możliwość spełnienia oczekiwań inwestorów, dla których zwrot inwestycji jest ściśle powiązany z ilością energii wyprodukowanej przez instalacje. Określenie przewidywanych uzysków przed montażem jest tutaj zdecydowanie istotne, gdyż zwiększa wiarygodność nie tylko producenta osprzętu PV, czy firmy zajmującej się montażem, ale przede wszystkim samej koncepcji fotowoltaiki, która jako odnawialne źródło energii ma być bezobsługowa i wydajna.



Rys. 2. Odchył procentowy uzysków rzeczywistych oraz projektowych [1]

Podziękowania

Publikacja powstała dzięki udostępnieniu danych oraz uzysków rzeczywistych instalacji fotowoltaicznych montowanych przez firmę Strefa Energii Paweł Lechowicz.

Literatura

- [1] Ochman A., *Analiza porównawcza obliczeń teoretycznych i rzeczywistej pracy systemów fotowoltaicznych*, praca magisterska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2023.

ANALIZA FSI PULSACYJNEJ RURKI CIEPŁA

FSI ANALYSIS OF PULSATING HEAT PIPE

Marcin Opalski

Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii,
Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: marcin.opalski@pwr.edu.pl

Podstawowym wyzwaniem w modelowaniu pulsacyjnej rurki ciepła (PHP) jest podtrzymanie stabilnej pracy, co wymaga utrzymania regularności pomimo stochastycznego charakteru pracy PHP. Niniejsza praca pokazuje rozwiązanie problemu stabilności pracy rurki poprzez uwzględnienie transferu ciepła wewnątrz ciała stałego. Sprzężony transfer ciepła jest kluczowy dla prawidłowego transferu ciepła między płynem a ciałem stałym. W prezentacji ukazano zasadę działania modelu numerycznego. Przedstawiono konsekwencje przyjmowania stałego strumienia ciepła lub temperatury na ściance po stronie cieczy rurki ciepła. Uargumentowano, że rozważanie jedynie fazy ciekłej jest często błędne i prowadzi do wielu skutków ubocznych, takich jak przesuszenie czy wymóg stosowania niefizycznych adaptacyjnych współczynników relaksacji odpowiadających za intensyfikację przemiany fazowej. Dodatkowo informacja o rozkładzie temperatury w ciele stałym pozwala na lepsze odzwierciedlenie wartości odczytywanych przez termopary ze względu na rozkład temperatury zależny od laplasjanu temperatury. Model rozszerzony został o parametry zależne od temperatury, takie jak gęstość, lepkość i współczynnik przenoszenia ciepła, w wystąpieniu ukazano przykładową implementację modelu lepkości dostosowanego do rodziny modeli interFoam [1]. Model bazujący na przytoczonym solverze wykorzystuje metodę VOF (*Volume of Fluid*) [2], która służy do podziału rozważanej geometrii na komórki wypełnione fazą ciekłą oraz gazową, przez przypisanie wartości 0 lub 1, gdzie wartość 1 oznacza, że komórka jest wypełniona cieczą, a wartość 0, że jest wypełniona gazem. Aby uwzględnić kształt granicy międzyfazowej, wykorzystywany jest algorytm MULES (*Multidimensional Universal Limiter with Explicit Solution*) [3] rozszerzony o zastosowanie VOF smothera do wygładzania interfejsów oraz redukcję sztucznym prądów. W modelowaniu przepływu wielofazowego rozwiązywane są równania osobno dla fazy gazowej i cieczy oraz dla interfejsu między nimi. Poniżej przedstawiono równania, które są używane do modelowania cieczy (1–3) i ciała stałego (4). Relacja (1) reprezentuje równanie zachowania masy, (2) – równanie zachowania momentu, (3) – równanie zachowania energii, natomiast (4) – równanie zachowania energii dla ciała stałego.

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \vec{u}) - (\alpha_v \nabla \cdot \vec{u}) + \nabla \cdot (\alpha_l \alpha_v \vec{u}_r) = (J_{vl} - J_{lv}) \left[\frac{1}{\rho_l} - \alpha_l \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right) \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u}) - \vec{u}[\nabla \cdot (\rho\vec{u})] - \vec{u} \frac{\partial\rho}{\partial t} = \\ & = -\nabla p_{rhg} + \nabla \cdot [v(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T)] - \vec{g}\vec{h}\nabla\rho + \sigma\kappa\nabla\alpha_l \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}T) - T\nabla \cdot \vec{u} = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla T \right) + (J_{vl} - J_{lv}) \frac{h_{evap}}{\rho c_p} \quad (3)$$

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = S_e \quad (4)$$

Analogiczne równania są rozwiązywane dla fazy gazowej, we przytoczonych równaniach różnią się od siebie jedynie dolnym indeksem. W równaniach zastosowano przekształcenie mające na celu wyciągnąć gęstość przed operatory, ma to na celu zniwelowanie problemu wysokich wartości różniczek mające konsekwencje w stabilności symulacji numerycznej [4]. Wynika to z nieróżniczkowalności funkcji w punkcie wynikającej z nagłych zmian funkcji lub istnienia punktów osobliwych rozumianych jako różnica w gęstości gazu i cieczy.

Do walidacji modelu numerycznego wykorzystano eksperyment badania parametrów termicznych jednopętlowej PHP wykonany przez Saha [5]. Badano w nim wydajność zamkniętej PHP zbudowanej z kwarcowej rurki, która pozwoliła, ze względu na przezroczystość, na zaprezentowanie struktury przepływu oraz parametrów pracy w zależności od kąta nachylenia, współczynnika wypełnienia i mocy wejściowej. Wykorzystanie tego eksperymentu pozwoliło na kontynuację walidacji modelu numerycznego i weryfikację działania algorytmu, bez konieczności angażowania większej ilości zasobów obliczeniowych, w przeciwieństwie do wielokanałowych modeli, dla których wymagane jest tworzenie rozbudowanych siatek numerycznych. W symulacji geometria została odwzorowana przy pomocy dwuwymiarowego modelu. Porównano parametry pracy eksperymentu wraz z analizą numeryczną pod kątem temperaturowym. Uwzględniona została również analiza optymalizacji kroku czasowego przez zastosowanie kryterium zbieżności Galusinskiego–Vigneaux [6] oraz dostosowanie odpowiedniej ilości procesorów w obliczeniach HPC, a zarazem związane z tym procesem limitacje. W prezentacji poruszono konieczność stosowania określonych schematów dywergencji, aby pomimo niewielkiej ilości elementów, uzyskać poprawne wyniki. Przykładową dystrybucję fazy ciekłej (czerwona) i gazowej (niebieska) w stanie regularnej pracy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowa dystrybucja płynu wewnątrz pulsacyjnej rurki ciepła

Literatura

- [1] OpenFOAM Foundation, *OpenFOAM User Guide*, 2021, <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>
- [2] Hirt C.W., Nichols B.D., *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*, “Journal of Computational Physics” 1981, Vol. 39, Issue 1, [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- [3] Deshpande S., Anumolu L., Trujillo M., *Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam*, “Computational Science & Discovery” 2012, Vol. 5, <https://doi.org/10.1088/1749-4699/5/1/014016>
- [4] Sato Y., Nieno B., *A sharp-interface phase change model for a mass-conservative interface tracking method*, “Journal of Computational Physics” 2013, Vol. 249, pp. 127–161, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.04.035>
- [5] Saha N., Das P., Sharma P., *Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heated pipe*, “International Journal of Heat and Mass Transfer” 2014, Vol. 74, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.067>
- [6] Galusinski C., Vigneaux P., *On stability condition for bifluid flows with surface tension: application to microfluidics*, “Journal of Computational Physics” 2008, 227, pp. 6140–6164, doi: 10.1016/j.jcp.2008.

OCENA POTENCJAŁU ELEKTROWNI SZCZYTOWO-POMPOWYCH NA OBSZARACH KOPALNI ODKRYWKOWYCH WOJEWÓDZCTWA ŁÓDZKIEGO

ASSESSMENT OF PUMPED HYDROPOWER ENERGY STORAGE PLANTS POTENTIAL FOR OPEN PIT MINES IN THE ŁÓDZKIE VOIVODESHIP

Mikołaj Ostraszewski, Jakub Jurasz

Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: mikolaj.ostraszewski@pwr.edu.pl

Po zawarciu Porozumienia Paryskiego wieńczącego 21. Konferencję ONZ w sprawie zmian klimatu ustalono zgodnie stanowisko, w którym wyrażono potrzebę zwiększenia wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych oraz rozbudowy zdolności magazynowania tejże energii. Niewątpliwie tym zadaniom mogą sprostać elektrownie szczytowo-pompowe (ESP), szczególnie ze względu na swoją dojrzałość technologiczną oraz niewielki wpływ na środowisko [1]. Pełnią one funkcje równowagi fluktuacji związanych z wytwarzaniem energii z niestabilnych źródeł odnawialnych, do których zaliczamy farmy fotowoltaiczne oraz wiatrowe, jak również bilansują one stronę popytową i podażową w systemie energetycznym zasilanym przez elektrownie jądrowe [2].

Tabela 1. Zestawienie parametrów wejściowych wykorzystanych do analizy [3]

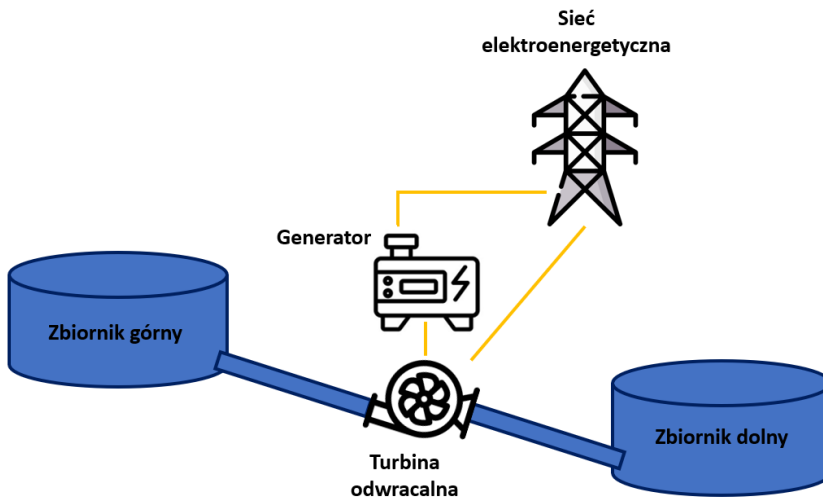
Parametr wyjściowy	Wartość
Minimalna objętość istniejącego zbiornika w przeliczeniu na możliwości magazynowe energii, GWh	2
Maksymalny dystans pomiędzy rezerwuarami, km	5
Minimalna różnica wysokości między zwierciadłami, m	150
Minimalna powierzchnia nowego zbiornika, m ²	70 000
Minimalna odległość od Obiektu Światowego Dziedzictwa UNESCO, km	5
Potencjalna lokalizacja ESP nie powinna znajdować się na obszarze Natura 2000	–
Maksymalna odległość do odpowiednio przystosowanego systemu energetycznego, km	20

Ponadto, ograniczenie emisji gazów cieplarnianych związane jest ze zmniejszaniem udziału energii wytwarzanej poprzez m.in. elektrownie zasilane węglem brunatnym. Te, jak również inne względy (np. wyczerpywanie się zasobów surowca) zmuszają do stopniowego zamykania elektrowni i zlokalizowanych w ich pobliżu kopalń. Tutaj rodzi się pytanie, co dalej z obszarami, które wcześniej były wykorzystywane jako kopalnie odkrywkowe i z powodu działalności człowieka uległy degradacji.

Celem niniejszej pracy jest określenie możliwości rekultywacji terenów zdegradowanych działalnością kopalni odkrywkowych węgla brunatnego KWB-B (Kopalnia Węgla Brunatnego Belchatów, pola Belchatów i Szczerców), jako miejsca do budowy nowej elektrowni szczytowo-pompowej. Mimo ograniczeń związanych z ukształtowaniem terenowym występującym w Polsce, podjęto próbę wyznaczenia miejsca, które mogłoby sprostać wymaganiom takim jak: możliwie jak najmniejszy dystans pomiędzy zbiornikami dolnym i górnym, odpowiednia wysokość pomiędzy zwierciadłami wody w rezerwuarach, możliwości związane z objętością magazynową ciekłego medium i to wszystko w kontekście minimalizacji ingerencji w środowisko naturalne [3, 4].

Do analizy terenów kopalnianych w pobliżu miejscowości Belchatów wykorzystano narzędzia systemu informacji geologicznej (GIS), jak również mapy oraz numeryczne modele terenu udostępniane przez strony i instytucje rządowe.

Jako, że w części składowych ESP, składa się z 5 głównych urządzeń (rys. 1): rezerwuarów dolnego i górnego, układu rurociągów transportujących wodę dzięki turbinom odwracalnym oraz generatora, to w pracy pochyłono się nad zagadnieniami związanymi z odpowiednim zlokalizowaniem tych komponentów na terenie objętym analizą.



Rys. 1. Schemat działania elektrowni szczytowo-pompowej

W rozważaniach wykorzystano wyrobiska jako zbiorniki dolne, natomiast zwałowiska posłużyły jako zbiorniki górne, i to właśnie od nich uzależniono poczynione w pracy obliczenia. Do analizy wykorzystano scenariusze zakładające różne możliwości połączenia ze sobą czterech zbiorników: dwóch

zbiorników górnych zlokalizowanych w wyrobiskach (rys. 2) oraz dwóch zbiorników górnych posadowionych na zwałowiskach.



Rys. 2. Wypełnianie wyrobisk wodą, w celu określenia odpowiedniej objętości magazynowanej wody – mapa pogładowa przygotowana w programie QGIS

Wstępnie oszacowano potencjał magazynowych pola Belchatów na 80 GWh przy założeniu wykorzystania około 20% objętości zbiornika dolnego.

W ocenie możliwości zagospodarowania terenu pod budowę ESP w okolicy elektrowni Belchatów wzięto pod uwagę aspekty związane z potencjałem energetycznym, lokalizacją oraz ogólnymi aspektami hydraulicznymi, nie brano natomiast pod uwagę uwarunkowań związanych z geologią danego obszaru oraz specyficznych ograniczeń konstrukcyjnych.

Literatura

- [1] Görtz J., Aouad M., Wierprecht S., Terheiden K., *Assessment of pumped hydropower energy storage potential along rivers and shorelines*, “Renewable & Sustainable Energy Reviews” 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112027>
- [2] Uguz F. et al., *Optimal Bidding Strategy of a Pumped Hydro Energy Storage Integrated Nuclear Power Plant considering Possible Outage*, “International Transactions on Electrical Energy Systems” 2022, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1155/2022/6261558>
- [3] Lacal Arántegui R., Leahy P., Fitzgerald N., *Pumped-hydro Energy Storage. Potential for Transformation from Single Dams*, Urząd Publikacji Unii Europejskiej, Luksemburg 2012.
- [4] Lu B. et al., *Geographic information system algorithmsto locate prospective sites for pumped hydro energy storage*, “Appl. Energy” 2018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.177>

TOPNIENIE MATERIAŁU ZMIENNOFAZOWEGO: WSTĘPNE WYNIKI EKSPERYMENTALNEJ WALIDACJI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

MELTING OF PHASE-CHANGE MATERIAL: PRELIMINARY RESULTS OF EXPERIMENTAL VALIDATION OF NUMERICAL SIMULATIONS

Szymon Pawliczek, Szymon Lech, Cezary Czajkowski

Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: cezary.czajkowski@pwr.edu.pl

Niniejsza praca ma na celu walidację analizy numerycznej mechaniki płynów przejścia fazowego, za pomocą oprogramowania ANSYS© (Fluent, wersja 2023r1). Prezentowane czynności badawcze wykorzystują proces akumulacji ciepła, z udziałem materiału zmiennofazowego (ang. *Phase Change Material*, PCM), w postaci parafiny (Crystal 56, Orlen Południe). Proces ładowania układu polega na przekazaniu energii cieplnej, z wodnego zbiornika akumulacyjnego, do zbiornika z parafiną, poprzez wodę (HTF), która przepływając przez gładką miedzianą rurkę, w kształcie litery „U”, bierze udział w przekazywaniu ciepła, na bazie przewodzenia oraz konwekcji. Rura znajduje się w zbiorniku wypełnionym PCM, o masie całkowitej 11 kg. Warto wspomnieć, że proces grzania (ładowania akumulatora) posiada charakter endotermiczny, zaś podczas chłodzenia (rozładowania) układ przejawiać będzie charakter egzotermiczny [1].

Stanowisko eksperymentalne, przedstawione schematycznie na rysunku 1a, zostało zabudowane odpowiednią konstrukcją nośną oraz wyposażone w niezbędną aparaturę kontrolno-pomiarową. Do pomiaru rozkładu temperatury użyto termopar (typ T, 0,1 mm, $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Termoelementy, co przedstawiono na rysunku 1b, zostały osadzone na poboczniczy miedzianej rury systemu grzewczego oraz wprowadzone do objętości parafiny, w kierunku ścianki wewnętrznej akumulatora. Układ pomiaru temperatury został zaprojektowany na bazie elementów National Instruments, kontrolowanych za pomocą oprogramowania LabVIEW. System akwizycji danych umożliwia pobieranie oraz zapis wartości mierzonych, z częstotliwością 1 Hz. Wstępne wyniki pomiarów dla grzania oraz chłodzenia wskazują, że przemiana fazowa parafiny oscyluje na poziomie $52\text{--}56^{\circ}\text{C}$.

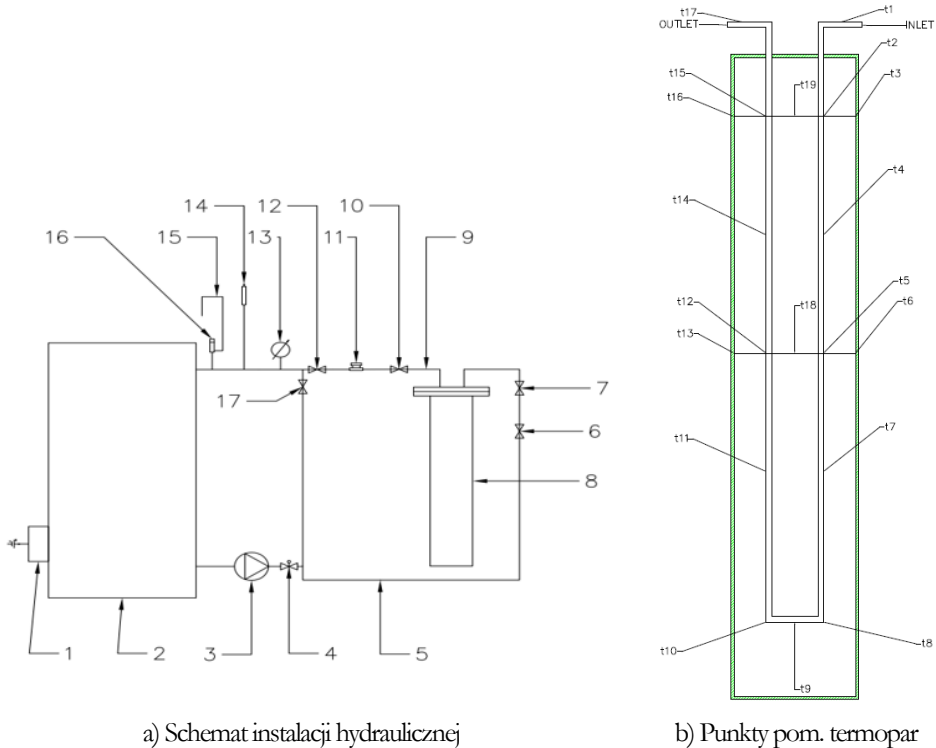
Podstawowe równania modelu matematycznego wykorzystywanego przy obliczeniach dla procesów zmiennofazowych zostały przedstawione poniżej – stanowią je: równanie zachowania masy (1), równanie zachowania pędu (2) oraz równanie zachowania energii [2, 3].

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \nabla \cdot (\vec{V}) = -\nabla P + \rho g \beta (T - T_{ref}) + \mu (\nabla^2 \vec{V}) + \vec{S} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot (k \vec{\nabla} T) \quad (3)$$

W modelowaniu procesu transportu energii pomiędzy HTF i PCM, który jest procesem dynamicznego złożonego przekazywania ciepła, obejmującego topnienie i krzepnięcie PCM, zostały założone uproszczenia [2]. Wygenerowana siatka numeryczna (rys. 2) powstała na bazie elementów wielościennech, o łącznej ilości ponad 8 mln elementów. Model geometryczny zbiornika (rys. 3) został utworzony za pomocą programu Inventor 2023. Na rysunku 4 przedstawiono zaprojektowane na potrzeby symulacji cieczy oraz ciała stałego domeny obliczeniowe.



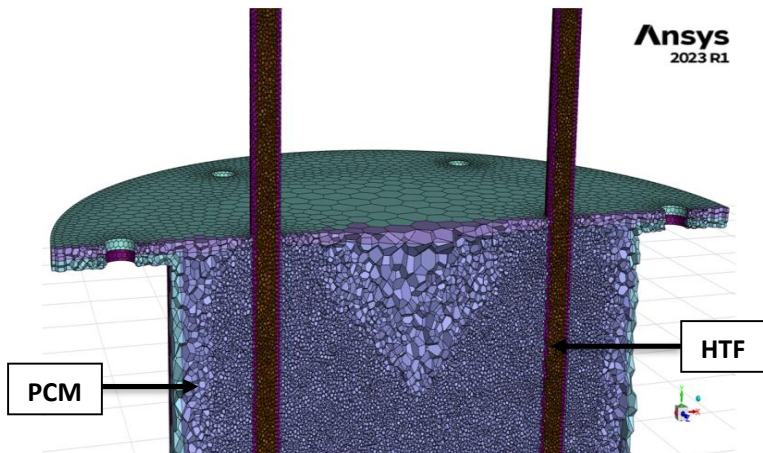
a) Schemat instalacji hydraulicznej

b) Punkty pom. termopar

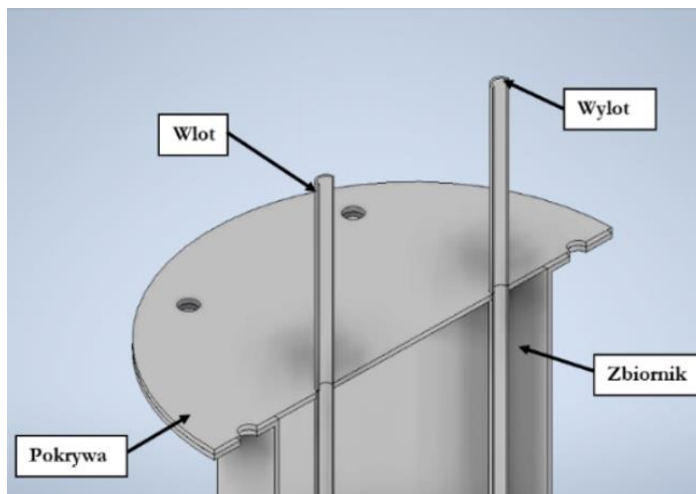
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

- 1) grzałka elektryczna – Gamlet MB2000 OWR1, 2) rezerwuár wody – Gamlet SGW(S), 3) pompa obiegowa – Yonos PICO15/1-6-(ROW), 4) zawór iglicowy, 5) przewód dolotowy, 6), 7), 10), 12), 17) zawór kulowy, 8) zbiornik akumulacyjny, 9) przewód wylotowy, 11) przepływomierz ultradźwiękowy, 13) manometr AFRISO RF, 14) automat odpowietrzający, 15) przewód upustowo-awaryjny, 16) zawór bezpieczeństwa

Równania (1)–(3) i warunki brzegowe zostały rozwiązane za pomocą programu ANSYS Fluent. Sprężenie ciśnienie–prędkość zostało dyskretyzowane przy użyciu algorytmu SIMPLE (*Semi-Implicit Pressure-Linked Equation*). Do rozwiązania równania korekcyjnego ciśnienia, wykorzystano schemat PRESTO (*PREssure STaggering Option*). Równania pędu i energii dyskretyzowane zostały metodą „upwind” drugiego rzędu, która również została wykorzystana do rozwiązania równań turbulencji energii kinetycznej i współczynnika dyssypacji. Model k- ϵ wykorzystano do zasymulowania przepływów turbulentnych wewnątrz rury. Dla równań cząstkowych ciągłości i energii wymagana zbieżność została określona na poziomie rzędu 10^{-6} .



Rys. 2. Elementy wielościenne wygenerowanej siatki numerycznej z domenami obliczeniowymi



Rys. 3. Domeny obliczeniowe dla obliczeń CFD

Analiza wykonanej pracy polegać będzie na obliczeniu wartości energii magazynowanej w funkcji czasu, strat ciepła do otoczenia, stosunku zakumulowanej energii do powierzchni wymiany ciepła oraz wyznaczeniu czasu wymaganego do zajścia pełnego przejścia fazowego, w przestrzeni roboczej akumulatora. Wartości te zostaną odniesione do wyników symulacji numerycznych, w których założone zostaną tożsame, z warunkami eksperymentu, warunki początkowe oraz brzegowe. Trakcja zachodzenia zjawiska przejścia fazowego będzie odbywała się na bazie sygnałów termopar oraz za pomocą punktów monitorujących, osadzonych w układzie kartezjańskim. Właściwości termofizyczne domen biorących udział, w procesie transportu energii, zostaną zaimplementowane na bazie UDF (*User-Defined Function*) jako wartości zależne od temperatury medium.

Nomenklatura

V – wektor prędkości	g – przyspieszenie ziemskie	T_{ref} – temperatura referencyjna
ρ – gęstość	S – człon źródłowy	T – temperatura
β – frakcja palna	μ – lepkość dynamiczna	P – ciśnienie
k – przewodność cieplna	H – entalpia całkowita	

Podziękowania

Badania eksperymentalne wykonano na podstawie umowy użyczenia R/DPN/ZKO/0181/4075/2022, dzięki uprzejmości Parafinowe Technologie Sp. z o.o.

Literatura

- [1] Kuznik F. et al., *A review on phase change materials integrated in building walls*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2011, Vol. 15, Issue 1, pp. 379–391, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.019>
- [2] Wang Y. et al., *Performance evaluation approach for solar heat storage systems using phase change material*, “Energy and Buildings” 2017, Vol. 155, pp. 115–127, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.015>
- [3] Raut D., Lanjewar S., Kalamkar V.R., *Effect of geometrical and operational parameters on paraffin’s melting performance in helical coiled latent heat storage for solar application: A numerical study*, “International Journal of Thermal Sciences” 2022, Vol. 176, 107509, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107509>

ANALIZA WYKORZYSTANIA WYBRANYCH ZAMIENNIKÓW CZYNNIKA CHŁODNICZEGO R134A W CHILLERACH WODY LODOWEJ

ANALYSIS OF THE USE OF SELECTED SUBSTITUTES FOR R134A REFRIGERANT IN CHILLERS

Maciej Pogorzelski, Artur Rusowicz

Zakład Chłodnictwa i Energetyki Budynku, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
Politechnika Warszawska

Adres do korespondencji: maciejpogorzelski.pn@gmail.com

Niniejsza praca przedstawia temat wykorzystania systemów wody lodowej w szeroko pojętym chłodnictwie i klimatyzacji. Omówione zostają czynniki chłodnicze, a także parametry służące do ich opisu ze szczególnym uwzględnieniem aspektów środowiskowych zastosowania poszczególnych czynników chłodniczych. Przedstawione są również obecne ograniczenia stosowania niektórych czynników chłodniczych nałożone przez Unię Europejską [1].

W kolejnej części omówiono szczegółowo jeden z popularniejszych syntetycznych czynników stosowanych w chłodnictwie – R134a oraz jego zamienniki [2].

Następnie przeprowadzono analizę energetyczną pracy agregatów wody lodowej wyposażonych w czynniki R134a oraz jego zamienniki. W obliczeniach skupiono się głównie na wyznaczeniu wskaźników wydajności chłodniczej EER. Zgodnie z normą PN-EN 14825 obliczono również wskaźniki sezonowej wydajności chłodniczej SEER [3], a następnie obliczono współczynniki ESEER [4] dla czynników R134a, R513a, R1234ze oraz dwóch wariantów agregatu wody lodowej wyposażonego w sprężarki śrubowe.

Na koniec podsumowano wyniki obliczeń oraz efektywność energetyczną urządzeń wyposażonych we wspomniane wcześniej czynniki chłodnicze, a także przedyskutowane dalsze możliwości rozwoju czynników chłodniczych.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych i uchylenia rozporządzenia (WE) nr 842/2006.
- [2] Bonca Z. i in., *Nowe czynniki chłodnicze i nośniki ciepła*, Wydawnictwo MASTA, 2004.
- [3] Wojtas K., *Średniosezonowy wskaźnik efektywności agregatu ziębniczego w kontekście zapotrzebowania na energię do chłodzenia budynków*, „Rynek Instalacyjny” 2014, nr 9.
- [4] Eurovent, *Standard 6-C003-2006*, 2006.

ENERGETYCZNE STARTUPY – W CO INWESTUJĄ FIRMY Z SEKTORA ENERGETYCZNEGO W POLSCE I W EUROPIE?

ENERGY START-UP'S – IN WHAT COMPANIES FROM ENERGY SECTOR ARE INVESTING IN POLAND AND EUROPE?

Teodor Sawicki^{1,2}

¹Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna

²Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

Adres do korespondencji: teodor.sawicki1999@gmail.com

Zmiany klimatyczne oraz dekarbonizacja energetyki stają się podstawowym tematami nie tylko debaty politycznej, lecz także społecznej. Dziś coraz więcej firm energetycznych widząc postępujące trendy ekologii, a za tym idącej dekarbonizacji zaczyna inwestować w nowe, zielone technologie. Jednym z rodzajów takich inwestycji są inkubatory startupów, w którym nowo powstałe firmy mogą dalej rozwijać swoje technologie ze współpracą z doświadczonymi partnerami z sektora energetycznego. Przykładami takich inkubatorów są ORLEN Skylight Accelerator, INvento (PGNiG), czy PGE Ventures. Artykuł opisuje w jakim obszarze zwinne firmy są w stanie zdobyć przewagę konkurencyjną nad dużymi korporacjami i dlaczego są one interesującą inwestycją. W celu omówienia tego zagadnienia zostanie opisany jak wygląda profil inwestycji w krajach w pozostałych częściach Europy (Niemcy, Szwecja) oraz jakie spółki już tam odniosły sukces.

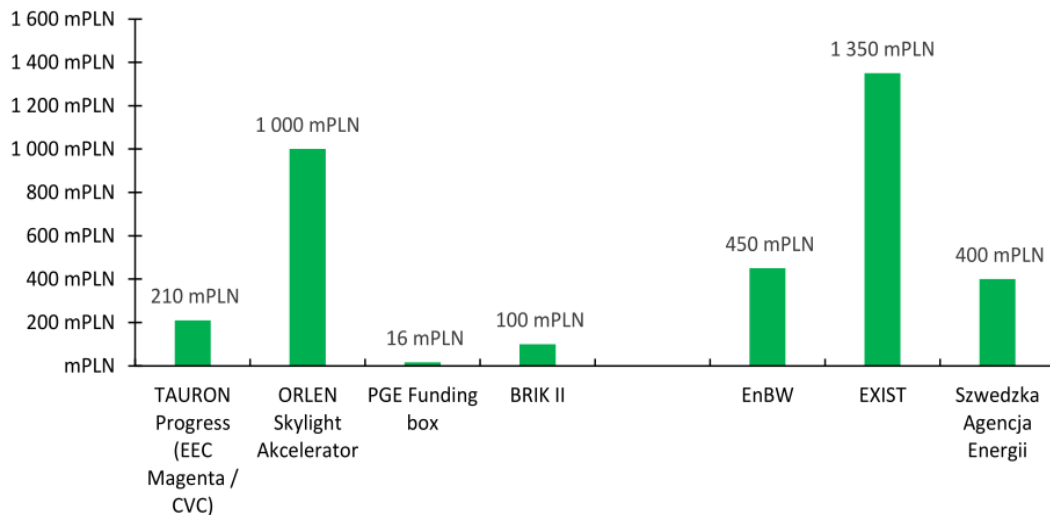
Coraz więcej startupów oraz większych firm zaczyna razem ze sobą współpracować nie bez powodu, ponieważ taka kooperacja przynosi korzyści dla obu partnerów. Z jednej strony startupy rozwijają technologie trudne do zrealizowania w dużych firmach, a łatwiejsze do przeprowadzenia w zwinnych organizacjach, którymi są startupy. W korporacjach czynnikami blokującym rozwój są między innymi długi proces decyzyjny, czy też niechęć do inwestycji w ryzykowne technologie. Z drugiej strony startupy są rozwijane z początkowo małym budżetem, a ryzyko tej inwestycji spada wraz z czasem i kolejnymi rundami finansowania [1, 3]. Po stworzeniu produktu i pozyskaniu pierwszego klienta współczynnik sukcesu „success rate” wzrasta wykładniczo, ponieważ najczęstszym powodem bankructwa startupów jest brak dostatecznych funduszy na rozwój pierwszego wdrożenia, czy też brak potrzeby rynkowej na produkt [3]. Na tym właśnie polu obie organizacje – startupy oraz korporacje mogą współpracować z wspólną korzyścią, ponieważ korporacje mogą być polegającym partnerem w pierwszym pilotażu projektu, ze względu np. na doświadczenie już w przeprowadzanych inwestycjach lub dzięki rozbudowanemu działowi prawnemu, który jest w stanie lepiej wypracować model współpracy oraz przeprowadzić inwestycje całkowicie zgodnie z prawem oraz z planem.

Przykładami takiej inwestycji jest np. inwestycja PGE Ventures w firmę Lerta, zajmującej się pozyskiwaniem nowych klientów DSR oraz umożliwiając im udział na rynku mocy. Dzięki tej inwestycji firma Lerta miała możliwość dostępu do nowych jednostek wytwórczych wchodzących w skład grupy PGE oraz umożliwiła poszerzenie swojego portfolio dzięki tym pilotażom. Po pierwszej inwestycji w Lerte PGE Ventures zwiększało swoje zaangażowanie w kolejnych rundach w latach 2021 i 2022. Dzięki rozwojowi firma posiada już oddziały np. w Polsce, Czechach, Rumuni i na Węgrzech [4].

Wartość inwestycji w startupy w Polsce ciągle rośnie. Według analizy przeprowadzonej przez PFR oraz NCBiR, całkowite środki przeznaczone na finansowanie startupów w 2022 roku wyniosło 2,3 mld zł, co było rokiem rekordowym. Co ciekawe co 4. złotówkę na tym rynku generowały instrumenty powiązane z NCBiR, dlatego to pokazuje jak ważne jest budowanie publicznych instrumentów finansowych wpływających na ten rynek. Co więcej aż 28% startupów twierdzi, że znaczący wpływ ich na rozwój przedsiębiorstwa mają krajowe fundusze VC, które większość środków do inwestycji pozyskują z publicznych funduszy [1].

Ciekawy jest także profil działalności firm – aż 80% rynku stanowią firmy wytwarzające aplikacje mobile, usługę SaaS lub aplikację webową. Skierowane są one przede wszystkim (60%) do klientów biznesowych małych lub korporacji [1].

Tak jak już wcześniej wspominałem, większość środowiska startupów energetycznych w Polsce jest zlokalizowane wokół dużych spółek energetycznych oraz ich inkubatorów [2]. Są także ogólne programy akceleracyjne dla spółek, niestety one nie są skierowane jedynie w kierunku technologii energetycznych lub jeśli już są skupiają się na rozwoju rozwiązania cyfrowego, ze względu na krótki czas jego dostarczenia.



Rys. 1. Wykres przedstawiający budżety poszczególnych spółek energetycznych w innowacyjne startupy; dla porównania, po prawej stronie pokazano niektóre zagraniczne instytucje, czy też fundusze [5–9, 11, 12]

Na wykresie widać, że spółką posiadającą aktualnie największy budżet na inwestycje w startupy jest ORLEN. W latach 2021–2031 ma on zamiar zainwestować przez swój akcelerator 1 mld PLN w inwestycje związane z nowymi technologiami nie tylko z dziedziny energetyki, ale także wykorzystywanymi w elektromobilności, czy sprzedaży detalicznej paliw/w sklepach na stacjach [6]. To co odróżnia program na drugim miejscu, czyli Tauronu, jest to, że inwestuje on poprzez swoje fundusze w firmy na znacznie wcześniejszym stadium rozwoju (Readiness level 7 – gotowy produkt, potrzeba demonstracji), kiedy w porównaniu ORLEN inwestuje już w spółki z przeprowadzonym pierwszym projektem pilotażowym [7]. Zastanawiające jest także ile PLK jest w stanie przeznaczyć na innowacje w programie BRIK II, przez co jest także atrakcyjna dla firm zajmujących się rozwojem nowych technologii. Poza zwiększaniem efektywności energetycznej, w tym programie są także poszukiwane rozwiązania związane z technologiami odnawialnymi wykorzystywanych w poprawie bezpieczeństwa transportu kolejowego oraz alternatywnych metod ich zasilania [7].

W Niemczech do 2038 roku musi zostać wyłączona ostatnia elektrownia węglowa. W dniu 23.03.2023 r. przestaną także działać dwie ostatnie elektrownie jądrowe. Niemiecka gospodarka obrała bardzo ciekawy kurs i cały świat patrzy na nią czy uda jej się w taki sposób przeprowadzić Energiewende. Dekarbonizacja nie tylko energetyki, a także przemysłu ma zostać umożliwiona dzięki innowacjom stworzonych nie tylko przez duże koncerny przemysłowe, lecz także przez młode startupy zakładane przede wszystkim, przez naukowców z uczelni, czy studentów. Mają oni szansę założyć taką firmę dzięki istniejącemu już od 19998 roku programowi nazwanego „EXIST”, który oferuje bezzwrotne pożyczki na założenie firmy oraz miesięczne stypendium przez 1 rok od założenia działalności. Po zakończeniu tego programu oferowane są także dofinansowania do projektów pilotażowych, czy ekspansji na rynki zagraniczne [11]. Co ciekawe takie właśnie startupy według raportu „Green Start-up Monitor” najczęściej rozwijają produkt, który mają zamiar wprowadzić na rynek (30%) [9]. Dodatkowo większość startupów, bo aż 50% wskazuje publiczne dofinansowanie jako główne źródło pozyskiwania kapitału na rozwój. Głównym obszarem w jakim są produkty rozwijane to magazyny energii (1komma5, Sonnen, VOLTage Storage, instagrid), fotowoltaiki i nowych sposobów ich sprzedaży (Enpal, Zolar), nowych technologii wytwarzania paliw alternatywnych (Sunfire) oraz BiG Data (IWAICE) [10].

Startupy we Szwecji podobnie jak w Niemczech w dużej mierze finansowane są ze środków publicznych. Głównym ośrodkiem redystrybucji tych środków jest Szwedzka Agencja Energetyki (Swedish Energy Agency). Daje ona granty na rozwój koncepcji, weryfikację projektu oraz przeprowadzenie pilotażu (nawet do 45% kosztów kwalifikowanych w postaci bezzwrotnej pożyczki). Co ciekawe, Szwedzka Agencja Energetyki od początku istnienia tego programu zainwestowała w firmy około 100 mln euro, które teraz są wyceniane na 3 miliardy euro, co jest bardzo interesującym wynikiem. Dodatkowo 4 z 5 firm po wyjściu z inkubacyjnego etapu otrzymała dodatkowe dofinansowanie. Przykładem takiej firmy jest North Voolt [13].

W celu rozwijania nowych technologii w Polsce, bardzo ważne jest zwiększenie środków publicznych przeznaczonych na ten cel. Dzięki temu tworzony jest pomost między światem akademickim a biznesowym i naukowcy, mają szansę na rozwinięcie nowych technologii, które, jak pokazuje przykład w Szwecji szybko mogą zwiększać swoją wartość i potencjał na rynku. W Polsce w porównaniu z innymi krajami nie ma wystarczającego finansowania dla prac koncepcyjnych, podczas którego istnieje



wysokie ryzyko i ten etap jest wyłączony z prywatnych programów akceleracyjnych. Co ciekawe, większość startupów korzysta ze środków publicznych i dlatego należałoby monitorować ich oddziaływanie na środowisko oraz wspomagać finansowo firmy o największym pozytywnym oddziaływaniu.

Literatura

- [1] Dziewit W., *POLSKIE STARTUPY 2022*, Warszawa 2022.
- [2] Startup Poland, *Technologie na rzecz energii*, Warszawa 2022.
- [3] Bednár R., *Indicators of startup failure*, “International Scientific Journal Industry 4.0.” 2017.
- [4] <https://www.photonenergy.com/en/news/photon-energy-group-acquires-majority-stake-in-lerta-plans-full-takeover-before-year-end-2022.html> [data dostępu: 10.04.2023].
- [5] <https://pgeventures.pl/> [data dostępu: 10.04.2023].
- [6] <https://mamstartup.pl/ruszyl-nabor-do-akceleratora-pkn-orlen-oto-co-wiemy-o-programie-skylight> [data dostępu: 10.04.2023].
- [7] <https://www.gov.pl/web/ncbr/plk-i-ncbr-inwestuja-w-innowacje-na-kolei> [data dostępu: 10.04.2023].
- [8] https://progres.tauron.pl/?trk=public_post_share-update_update-text [data dostępu: 10.04.2023].
- [9] Bundeswirtschaftsministerium, *Green Start Up Monitor 2022, 2023*.
- [10] <https://www.energystartups.org/country/Germany/> [data dostępu: 10.04.2023].
- [11] https://www.exist.de/EXIST/Navigation/DE/Ueber_EXIST/Richtlinien/richtlinien.html [data dostępu: 10.04.2023].
- [12] <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/innovation/> [data dostępu: 10.04.2023].
- [13] International Energy Agency, *How Governments Support Clean Energy Start-ups*, 2022.

MOŻLIWOŚCI PRODUKCJI KOBALTU-60 I BOMBY KOBALTOWEJ W WARUNKACH DOMOWYCH

COBALT-60 AND COBALT BOMB PRODUCTION AT HOME

Daria Sikorska, Ewa Kielsa

Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: 276961@student.pwr.edu.pl

Większość materiałów, z którymi mamy do czynienia na co dzień jest radioaktywna, jak chociażby banany, choć mało kto o tym wie. Nie należy się tym jednak martwić, ponieważ zawartość radioaktywnego izotopu potasu-40 w bananie jest bardzo mała i zupełnie dla nas nieszkodliwa [1]. Substancje promieniotwórcze używane są w przemyśle, podczas badań naukowych, a także w medycynie, ponieważ dzięki nim można z sukcesem diagnozować, a następnie leczyć wiele schorzeń. Produkcja takich izotopów odbywa się w specjalnie wyposażonych laboratoriach przy zachowaniu wszystkich norm bezpieczeństwa.

Kobalt-60 jest jednym z 26 znanych promieniotwórczych izotopów kobaltu, który znajduje zastosowanie w medycynie- przy radioterapii, podczas sterylizacji sprzętu i odpadów medycznych, a także w przemyśle do rentgenowskich szwów spawalniczych czy niwelatorów [2]. W niniejszej pracy zbadano, czy istnieje realne zagrożenie przypadkowego stworzenia kobaltu-60 i bomby kobaltowej przy użyciu materiałów dostępnych na co dzień.



Rys. 1. Izotop ameryku-241 umieszczony w osłonie przeciw promieniowaniu α (opracowanie własne)

Mechanizm stworzenia bomby kobaltowej polega na bombardowaniu neutronami stabilnego izotopu kobaltu-59 w wyniku czego otrzymuje się radioaktywny kobalt-60, który rozpada się na nikiel, elektron i pewną ilość promieniowania gamma [3]. To właśnie promieniowanie γ jest najbardziej niebezpieczne, ponieważ niszczy każdą żywą materię napotkaną na swojej drodze.

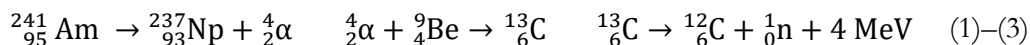
Do rozpoczęcia procesu przemiany kobaltu potrzebne jest źródło neutronów. Jedyny dostępny pierwiastek emitujący neutrony to kaliforn, jednak jest on za drogi i na co dzień praktycznie niespotykany [4]. Trzeba zatem otrzymać wolne neutrony na okolo i stworzyć tzw. działo neutronowe, do czego potrzebny jest pierwiastek emitujący promieniowanie alfa i inny pierwiastek, który po napromieniowaniu stworzy inny niestabilny atom i w wyniku jego rozpadu neutron. Spośród trzech kandydatów: rad, polon i ameryk wybrany został ameryk, ze względu na fakt, iż można go kupić w bezpiecznej i taniej formie (rys. 1), np. czujnika czadu [5].

Do doświadczenia wykorzystano około 3,5 mikrograma izotopu ameryku ^{241}Am (rys. 2), który otoczony został folią berylową. Folia berylowa jest stosunkowo bezpieczna i wystarczająca na potrzeby danego eksperymentu [6].



Rys. 2. Izotop ameryku-241 o masie 3,5 μg bez osłony chroniącej
(opracowanie własne)

Szereg reakcji – wzory: (1), (2) i (3) – mających miejsce na styku ameryku i berylu prowadzi do powstania izotopu węgla-13, który rozpada się do swojej stabilnej formy ^{12}C emitując przy tym jeden neutron i energię.



Tak skonstruowane działo neutronowe należy umieścić w niedalekiej odległości od ^{59}Co i czekać, aż wybijane neutrony trafią do jądra kobaltu zmieniając go w radioaktywny izotop ^{60}Co . Wydajność skonstruowanego źródła wynosi jeden neutron na 0,57 sekundy- to naprawdę bardzo mało. Po wykonaniu obliczeń okazuje się, że przekształcenie 1 cm^3 ^{59}Co w aktywny kobalt ^{60}Co za pomocą skonstruowanego działka neutronowego zajmie 1,64 kwintyliona lat. Czy zatem po dniu, miesiącu czy nawet roku od ustawienia kostki ^{59}Co na działku neutronowym powinny pojawić się zmiany w wyglądzie? Nie,

ponieważ ilość zachodzących reakcji przemiany jest całkowicie nieefektywna do zaobserwowania przemiany. Dla porównania w typowych działach neutronowych ilość generowanych neutronów sięga miliardów, a nawet bilionów na sekundę [7]. Ilość neutronów emitowanych przez skonstruowane w doświadczeniu amerykańsko-berylowe działo neutronowe jest za mała i zdecydowanie niewystarczająca.

Wyniki eksperymentu wskazują, iż zastosowane materiały i metody pozwalają pozyskać radioaktywne kobalt, jednak proces ten jest długotrwały, a wykonane obliczenia dotyczyły wersji, gdzie wszystkie neutrony otrzymane z rozpadu trafiają do jądra kobaltu. Doświadczenie pokazało, iż nie istnieje zagrożenie stworzenia bomby kobaltowej w warunkach domowych przy użyciu ameryku i berylu.

Literatura

- [1] *Zielony atom. Chcesz mieć w zóładku potas-40? To zjedz banana!*, <https://www.zielonyatom.pl/chcesz-miec-w-zoladku-potas-40-to-zjedz-banana/> [data dostępu: 18.03.2023].
- [2] Kim J.H., Gibb H.J., Howe P., *Cobalt and inorganic cobalt compounds*, World Health Organization, 2006.
- [3] Zaman M. et al., *Measurement of $^{59}\text{Co}(n, \gamma)$ reaction cross sections with the fast neutrons based on the $^9\text{Be}(p, n)$ reaction*, “Chinese Physics C” 2021, Vol. 45, No. 4.
- [4] Martin R.C., Knauer J. B., Balo P.A., *Production, distribution and applications of californium-252 neutron sources*, “Applied Radiation and Isotopes” 2000, Vol. 53, No. 4–5, pp. 785–792.
- [5] *Zielony Atom - Chcesz mieć w domu ameryk-241? To kup sobie czujkę dymu!*, <https://www.zielonyatom.pl/ameryk241-czujka-dymu/> [data dostępu: 17.03.2023].
- [6] Holmes R., *Gamma-rays and neutron Sources*, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/14/792/14792880.pdf [data dostępu: 17.03.2023].
- [7] Taylor A., Dunne M., *A Route to the Brightest Possible Neutron Source?*, “Science” 2007, Vol. 315, No. 5815, pp. 1092–1095.

BADANIA W ZAKRESIE WSPÓLSPALANIA ZRĘBKÓW DRZEWNYCH I WĘGLA KAMIENNEGO W CHEMICZNEJ PĘTLI TLENKOWEJ Z ZASTOSOWANIEM NOŚNIKÓW TLENU

STUDY ON CO-COMBUSTION OF WOOD CHIPS AND HARD COAL WITH APPLICATION OF CHEMICAL LOOPING COMBUSTION AND OXYGEN CARRIERS

Zuzanna Skitaniak, Rafał Łysowski, Ewelina Ksepko

Katedra Inżynierii i Technologii Procesów Chemicznych, Politechnika Wroclawska

Adresy do korespondencji: 240506@student.pwr.edu.pl, ewelina.ksepko@pwr.edu.pl

Redukcja negatywnych skutków spalania paliw kopalnych, będących dotychczas podstawowym źródłem energii, determinuje rozwój przemysłu energetycznego w kierunku nowych, niskoemisyjnych metod spalania paliw, a także zastosowania w tym celu surowców odnawialnych. Przykładem takiej innowacji jest obiecująca metoda spalania paliw stałych w chemicznej pętli tlenkowej CLC (ang. *Chemical Looping Combustion*). Dzięki zastąpieniu powietrza stałym nośnikiem tlenu, jako źródła tlenu potrzebnego do spalania paliwa, po procesie otrzymywany jest czysty strumień CO₂ gotowy do sekwestracji. Prowadzi to do redukcji jego emisji do atmosfery bez dodatkowych obciążeń finansowych. Osiągnięcie dodatkowej redukcji śladu węglowego jest możliwe przez aplikację metody CLC do spalania biomasy lub współspalania biomasy z węglem [1].

W niniejszej prezentacji omówiono proces współspalania zrębków drzewnych z węglem kamiennym z zastosowaniem mieszanych tlenków Fe–Mn/Zr – obiecujących materiałów, mogących spełniać funkcję nośników tlenu w metodzie CLC [2]. Porównano reaktywność nośników tlenu z mieszkanką biomasa – węgiel na podstawie otrzymanych wyników badań procesu spalania ww. mieszkanki przy użyciu analizatora termogravimetrycznego sprzężonego z kwadropolowym spektrometrem masowym (TGA-QMS), a także wytrzymałość mechaniczną z wykorzystaniem dynamometru.

Źródło finansowania

Praca została sfinansowana w ramach projektu NCN nr 2020/37/B/ST5/01259.



Literatura

- [1] Bhui B. Vairakannu P., *Prospects and issues of integration of co-combustion of solid fuels (coal and biomass) in chemical looping technology*, “J. Environ. Manage.” 2019, Vol. 231, No. January 2018, pp. 1241–1256, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.092.
- [2] Ksepko E, Lysowski R., *Extremely Stable and Durable Mixed Fe–Mn Oxides Supported on ZrO₂ for Practical Utilization in CLOU and CLC Processes*, “Catal” 2021, Vol. 11, p. 1285, 11:1285, <https://doi.org/10.3390/CATAL11111285>

PRZEGLĄD LITERATURY DOTYCZĄCEJ WSPÓŁPRACY UKŁADÓW ORGANIC RANKINE CYCLE Z AKUMULATORAMI CIEPŁA

LITERATURE REVIEW OF ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEMS COUPLED WITH THERMAL ENERGY STORAGE

Dawid Sowa, Piotr Kolasiński

Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: dawid.sowa@pwr.edu.pl

Organiczny Obieg Rankine’a (ang. *Organic Rankine Cycle* – ORC) to wariant obiegu Rankine’a, w którym woda została zastąpiona inny czynnikiem roboczym, najczęściej węglowodorem lub jego pochodną. Wiele ze stosowanych w ORC czynników roboczych znalazło zastosowanie również w chłodnictwie i klimatyzacji. Z uwagi na niższą temperaturę parowania czynników organicznych, ORC może być stosowane do generowania energii elektrycznej ze źródeł nisko- i średniotemperaturowych.

Konwencjonalne obiegi wykorzystujące wodę dobrze sprawdzają się w przypadku dużych instalacji ze źródłem o wysokiej temperaturze, w których zastosowanie drogiej, wielostopniowych turbin, praca w warunkach wysokiego ciśnienia w parowniku i próżni w skraplaczu są uzasadnione ekonomicznie. W przypadku małych mocy, gdzie takie rozwiązania nie są ekonomicznie zasadne, ORC pozwala na dobranie czynnika umożliwiającego zastosowanie prostszej konstrukcji systemu i tańszych podzespołów [1].

Niektóre źródła ciepła wykorzystywane przez ORC można zakwalifikować jako nieregularne, to jest takie, których temperatura lub ilość dostępnego ciepła zmieniają się w czasie. Na przykład ilość promieniowania słonecznego jaka dociera do kolektora słonecznego, zależy od pory dnia i roku oraz warunków atmosferycznych. Podobnie dzieje się w przypadku m.in. odzysku ciepła odpadowego z procesów przemysłowych. Ponadto, w przypadku kogeneracji, zmienne jest również zapotrzebowanie na ciepło.

Nieregularne źródła ciepła mogą powodować zaburzenia pracy obiegu. Rozprężarki i pompy z reguły pracują z największą sprawnością dla punktu projektowego. Sprawność ta maleje wraz z oddalaniem się od tego punktu. W przypadku zmiennych warunków, maszyny te będą pracować z obniżoną sprawnością przez długi czas. W skrajnych przypadkach parametry mogą wykraczać poza dopuszczalne, na przykład z uwagi na pojawienie się kropel cieczy w trakcie rozprężania, co może spowodować konieczność odstawienia systemu z pracy.



Akumulatory ciepła (ang. *Thermal Energy Storages* lub *Heat storages*) mogą być stosowane do stabilizacji źródeł ciepła przez zmagazynowanie nadmiaru energii w formie ciepła, w celu jej późniejszego wykorzystania. Dzięki temu, wahania parametrów są zmniejszone, a rozprężarka może pracować z większą sprawnością. W niektórych przypadkach zastosowanie akumulatora pozwala na użycie tańszych komponentów systemu [2]. Dzięki ich wykorzystaniu, możliwe jest magazynowanie energii w celu jej użycia w krótkim okresie największego zapotrzebowania. W porównaniu do akumulatorów elektrycznych, które stosowane są na przykład w instalacjach fotowoltaicznych, akumulatory ciepła charakteryzują się niższymi kosztami, i zdecydowanie wolniejszym zużyciem [3].

W zależności od sposobu magazynowania, akumulatory ciepła można podzielić na:

- SHTES (ang. *Sensible Heat Thermal Energy Storage*) – najprostszy wariant, wykorzystujący ciepło jawne,
- LHTEs (ang. *Latent Heat Thermal Energy Storage*) – wykorzystujący ciepło utajone, magazynowane w materiale zmiennofazowym (*Phase Change Materials* – PCMs),
- TCES (ang. *Thermochemical Energy Storage*) – wykorzystujący odwracalne reakcje chemiczne.

Technologie te różnią się między sobą m.in.: gęstością magazynowania energii, kosztem oraz poziomem gotowości technicznej TRL (*Technology Readiness Level*).

W niniejszej pracy zaprezentowano przegląd literatury dotyczącej akumulatorów ciepła oraz ich zastosowania dla poprawy efektywności obiegów ORC. Zostały omówione między innymi: obszary w których mogą znaleźć zastosowanie, stosowane konstrukcje i materiały. Ponadto uwzględniono wpływ zastosowanego materiału na sprawność układu oraz dobór odpowiedniego czynnika roboczego.

Literatura

- [1] Macchi E., Astolfi M. (eds.), *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*, Woodhead Publishing, 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-100510-1.00001-6.
- [2] Li X. et al., *Towards a novel holistic design of organic Rankine cycle (ORC) systems operating under heat source fluctuations and intermittency*, “Renew. Sust. Energ. Rev.” 2021, Vol. 147, p. 111207, doi: 10.1016/j.rser.2021.111207.

ANALIZA NUMERYCZNA PULSACYJNEJ RURKI CIEPŁA Z JEDNĄ PĘTLĄ

NUMERICAL ANALYSIS OF A SINGLE-LOOP PULSATING HEAT PIPE

Marta Stempniak^{1,2}, Przemysław Błasiak³

¹Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

²Koło Naukowe PWr Solar Boat Team, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

³Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

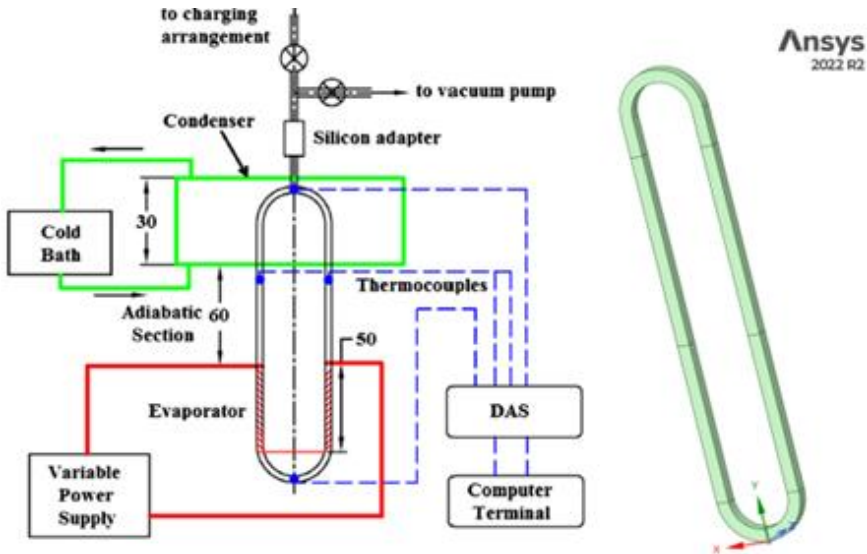
Adres do korespondencji: 240951@student.pwr.edu.pl

Pulsacyjne rurki ciepła (ang. *Pulsating Heat Pipe* – PHP) są wysokowydajnymi wymiennikami ciepła znajdującymi szerokie zastosowanie w różnych branżach przemysłu. PHP poprzez swoją uniwersalność pod względem kształtu [1], jak i szeroki zakres pracy rozumianej jako warunki nasycenia czynnika roboczego umożliwiają rozległe zastosowanie w elektronice, przemyśle ciężkim, a także przemyśle kosmicznym. Poprzez szeroki zakres aplikacji PHP mogą pracować w skrajnych temperaturach od temperatur kriogenicznych w chłodzeniu magnesów (magnesy nadprzewodzące) do zastosowań w chłodzeniu rdzenia reaktora atomowego. Pulsacyjne rurki ciepła mogą być wykorzystywane w przestrzeni o obniżonej grawitacji [2]. Proces wymiany ciepła w PHP, w odróżnieniu od klasycznych odpowiedników, może odbywać się bez wpływu grawitacji przekładającej się na wpływ ciśnienia hydrostatycznego. Wynika to z zachowania kryterium średnicy krytycznej ściśle powiązanej z wpływem napięcia powierzchniowego i utrzymaniem pożądaných struktur przepływu wewnątrz kapilary.

Rolą PHP jest odbiór ciepła, a za wysoką wydajność chłodniczą urządzeń odpowiada dyskretny transfer ciepła, czyli poprzez przemianę fazową. Składa się ona z trzech obszarów, parowacza, od którego odbierane jest ciepło, części adiabatycznej pełniąca funkcję łączącą dwa obszary i regulującą stochastyczną pracę rurki oraz skraplacz gdzie odbierane jest ciepło. W odróżnieniu od klasycznych odpowiedników opór cieplny jest w większości przypadków niższy i wynika z zintensyfikowania przenoszenia ciepła wewnątrz kapilary na rzecz konwekcji, jak i dyfuzji cieplnej. Ze względu na większe prędkości oraz uformowany film ciekawy okružający bąble parowe, współczynnik wnikania ciepła jest większy względem rurek ciepła. Dodatkowo ciepło przenoszone w skraplaczu jest nasilone poprzez większą ilość fazy ciekłej, która to posiada większy współczynnik przenikania ciepła, a co za tym idzie, nasila zjawisko dyfuzji cieplnej [3]. Tego rodzaju rozwiązania testowane są na stanowiskach badawczych, składającym się z jednej lub kilku pętli. W celu oceny wydajności termicznej urządzenia montowane są czujniki temperatur oraz często kamery CCD monitorujące przebieg procesu wykonując wiele ujęć na sekundę.

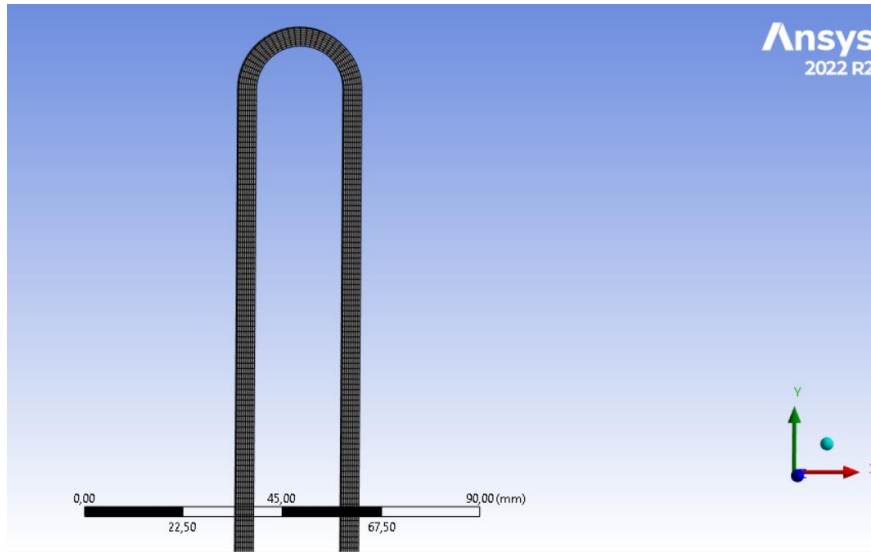
Uproszczony schemat wraz z odwzorowanym 2-wymiarowym modelem geometrycznym takiego stanowiska zamieszczono na rys. 1, gdzie pokazana jest jedno pętlowa PHP. Na czerwono zaznaczono parowacz, czyli część gdzie czynnik roboczy w rurce jest ogrzewany do stanu gazowego, na zielono kondensator, gdzie czynnik roboczy się skrapla. Pomiedzy tymi strefami znajduje się strefa adiabatyczna. Rozwiązaniem pozwalającym na oszczędność czasu i nakładów finansowych są analizy numeryczne. Symulacja przebiegu procesu pozwala na uzyskanie wyników dla każdej konfiguracji ustawień czynników i materiałów wykorzystując jedynie komputer. Jest to tańsze w porównaniu ze zmianami wymaganymi na stanowisku eksperymentalnym. Przedmiotem niniejszych badań jest przeprowadzenie symulacji numerycznej i weryfikacja uzyskanego modelu bazując na eksperymencie przeprowadzonym na stanowisku doświadczalnym [4].

Badanym elementem jest pojedyncza pętla PHP składająca się ze szkła kwarcowego. Czynnikiem jest woda destylowana. Część cieczowa zajmuje FR 40%. W części parowacza rurka owinięta jest drutem oporowym, który ogrzewany jest przez ustawienie mocy: 18 W, 35,7 W, 55,8 W oraz 97,1 W. Badana jest przemiana fazowa wody zachodząca w rurce.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego jedno pętlowej PHP i jego odwzorowanie w modelu CAD w oprogramowaniu SpaceClaim

Do obliczeń numerycznych wykorzystano model pojedynczej pętli, na rys. 2 zaprezentowano model, na który nałożono siatkę numeryczną oraz podano zakresy zasięgu parowacza, skraplacza oraz strefy adiabatycznej, które w późniejszym procesie pomogą w odpowiednim określeniu warunków brzegowych dla obliczeń. Celem opisanego analizy jest sprawdzenie stopnia podobieństwa wyników otrzymanych drogą eksperymentu doświadczalnego oraz symulacji numerycznej. Analizie przy pomocy oprogramowania ANSYS Fluent poddany zostanie model z różnym zagęszczeniem siatek dla 8 i 16 komórek na średnicy kapilary.



Rys. 2. Wygenerowana siatka numeryczna

Podziękowania

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy nr 202.

Literatura

- [1] Czajkowski C. et al., *Flower Shaped Oscillating Heat Pipe at the thermosiphon condition: Performance at different rotational speeds, filling ratios, and heat supplies*, “Applied Thermal Engineering” 2022, Vol. 212, 118540, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118540.
- [2] Nowak A. et al., *Bubble coalescence and break-up in confined oscillating two-phase flows under microgravity conditions*, “International Journal of Heat and Mass Transfer” 2022, Vol. 192, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122905
- [3] Nikolayev V.S., *Physical principles and state-of-the-art of modeling of the pulsating heat pipe: A review*, “Applied Thermal Engineering” 2021, Vol. 195, 117111, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117111>
- [4] Saha N., Das P.K., Sharma P.K., *Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe*, “International Journal of Heat and Mass Transfer” 2014, Vol. 74, pp. 238–250.

BADANIA EKSPERYMENTALNE WIRNIKÓW POMPY WIROWEJ Z ŁOPATKĄ DZIELONĄ

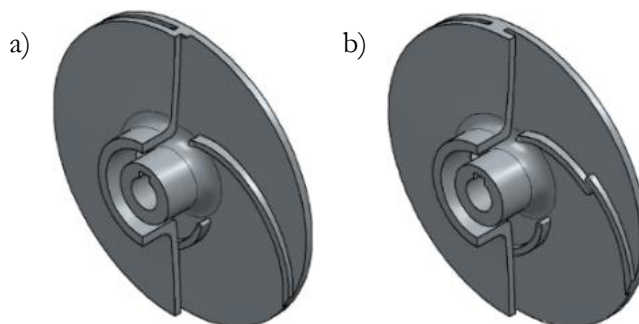
EXPERIMENTAL STUDY OF THE CENTRIFUGAL PUMP IMPELLER WITH GAP DRAINAGE WIDTH

Filip Zaręba, Aneta Nycz, Przemysław Szulc

Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: filipzareba6@gmail.com

Pompy są najliczniejszą grupą maszyn roboczych stosowanych w przemyśle, a pod względem aplikacyjności ustępują jedynie silnikom elektrycznym. W związku z tym, istotnym zagadnieniem jest zmniejszanie energochłonności procesu pompowania np. poprzez: odpowiedni dobór nowych pomp wraz ze sposobami ich regulacji czy ulepszenia jednostek już pracujących. W obu przypadkach konieczne jest dopasowanie charakterystyki energetycznej pomp do różnych wymagań układu, a więc i różnych punktów pracy. Choć sposoby regulacji umożliwiają poprawę efektywności energetycznej procesu pompowania, odbywa się to jednak w pewnym zakresie zmienności parametrowej, warunkowanej ograniczeniami konstrukcyjnymi. Wiele układów pompowych wymusza stosowanie pomp o niskim bądź ultraniskim wyróżniku szybkoobrotowości, pracujących przy wydajnościach poniżej kilku, kilkunastu m^3/h . Pompy krętne klasycznej konstrukcji bardzo często osiągają w tym zakresie niewielkie sprawności, dlatego poszukiwane są rozwiązania konstrukcyjne warunkujące poprawę tego parametru oraz sposobu regulacji ich własności energetycznych. Jednym z takich rozwiązań może być zastosowanie łopatek dzielonych.



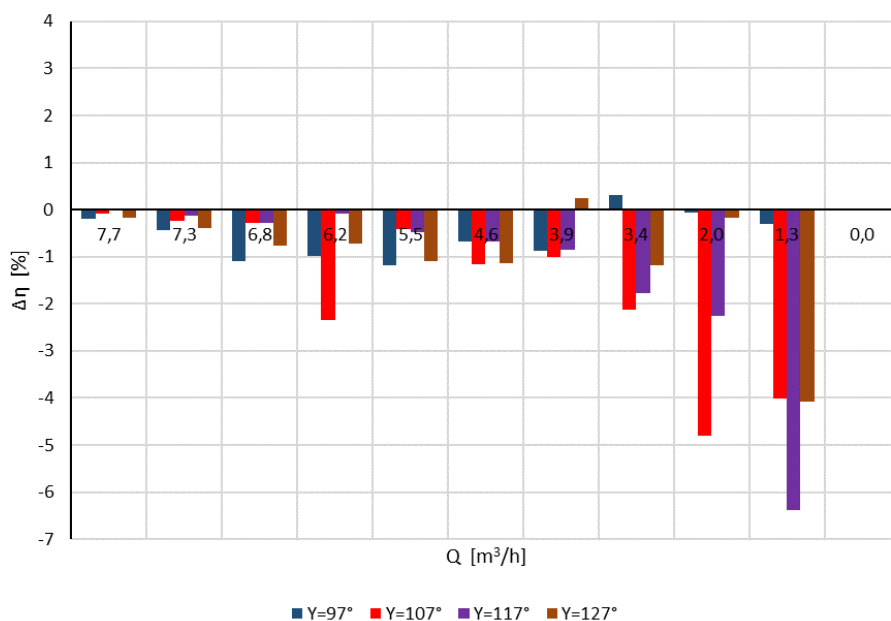
Rys. 1. Modele badawcze wirników:

a) bez szczeliny, $\gamma = 97^\circ$, z wyciętą tarczą przednią, b) ze szczeliną, $\gamma = 97^\circ$, z wyciętą tarczą przednią

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu zastosowania łopatek dzielonych w wirniku odśrodkowym na parametry pracy pompy wirowej. Zakres analiz obejmował zarówno część projektową związaną z modelowaniem oraz wytworzeniem odpowiedniej liczby wirników prototypowych, jak i część eksperymentalną, w której porównano charakterystyki na podstawie przeprowadzonego eksperymentu.

Etap projektowy został podzielony na dwie części. W pierwszej, bazując na algorytmie obliczeniowym, zaprojektowano modele wirników: bazowych oraz odpowiadające im geometrycznie wersje zmodyfikowane z dzieloną łopatką. Rozważaniom poddano osiem różnych wartości kąta opasania łopatki w przedziale $\gamma = 57\text{--}127^\circ$. Parametry geometryczne szczeliny, takie jak: długość $l_s = 5$ mm, szerokość $s_s = 1$ mm, średnica położenia $d_s = 78$ mm były niezmiennie dla wszystkich analizowanych konstrukcji. Średnica zewnętrzna wirnika wynosiła $d_b = 120$ mm.

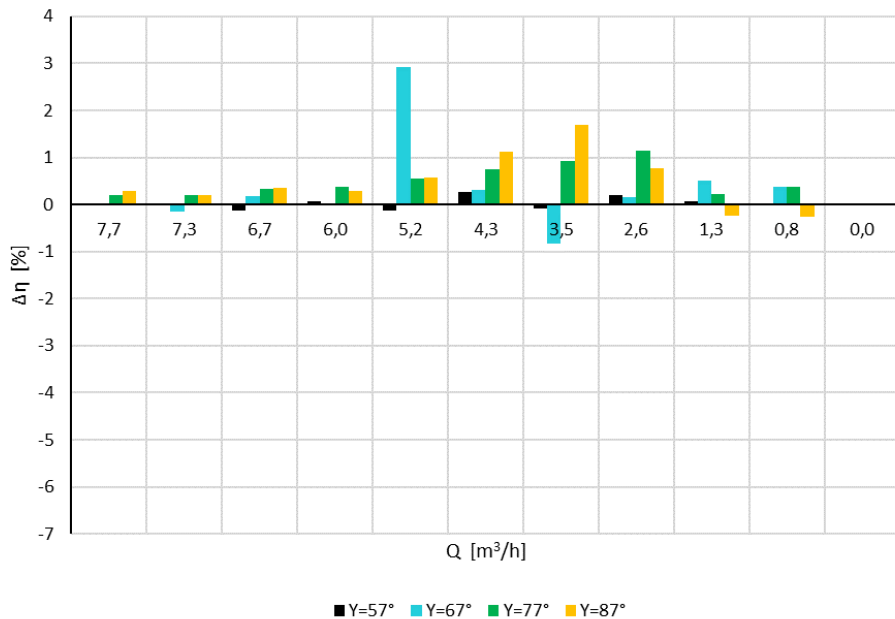
Porównanie wyników badań zaproponowanych wariantów geometrycznych wirników miało na celu sprawdzenie wpływu wartości kąta opasania na sprawność pompy. W drugim etapie projektowania opracowano modele trójwymiarowe z wykorzystaniem technologii druku przestrzennego 3D. Do budowy wirników wykorzystano polimer PET-G. Tarczę przednią oraz tylną wirnika drukowano osobno, a następnie łączono za pomocą kleju z użyciem prasy. Na rysunku 1 przedstawiono modele 3D wirników: referencyjnego oraz ze szczeliną.



Rys. 2. Wyniki prowadzonych badań: spadek sprawności po zastosowaniu szczeliny ($\gamma = 127^\circ, 117^\circ, 107^\circ, 97^\circ$)

W drugiej części – eksperymentalnej badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem pompy 32PJM120 o mocy 0,55 kW, produkcji LFP, a tłoczonym medium była woda o parametrach

definiowanych temperaturą pokojową. Na podstawie zmierzonych oraz obliczonych wartości: strumienia objętości, wysokości podnoszenia oraz poboru mocy pompy wyznaczono sprawność badanej maszyny. Prędkość obrotowa wirnika była jednakowa dla wszystkich przebadanych modeli i wynosiła 2320 obr/min. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wpływ zastosowania szczeliny na sprawność pompy w całym zakresie wydajności, dla różnych kątów opasania łopatki.



Rys. 3. Wyniki prowadzonych badań: wzrost sprawności po zastosowaniu szczeliny ($\gamma = 57^\circ, 67^\circ, 77^\circ, 87^\circ$)

Na podstawie badań zaobserwowano, że szczelina powoduje spadek sprawności maszyny dla kątów opasania łopatki: $\gamma = 127^\circ, 117^\circ, 107^\circ, 97^\circ$ w całym zakresie wydajności lub w przeważającej jego części. Dla mniejszych kątów opasania takich jak $\gamma = 77^\circ$ oraz 87° , odnotowano korzystne działanie szczeliny w łopatkach, względem wirnika wzorcowego, zwłaszcza w przedziale wydajności $Q = 2,6-4,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Dla wirnika o kącie opasania $\gamma = 77^\circ$, poprawa sprawności $\Delta\eta$ występuje w całym zakresie wydajności Q i zawiera się w przedziale 0,2–1,14%. Podsumowując wyniki badań można zauważyć, że szczelina korzystnie wpływa na sprawność pompy w większym zakresie wydajności dla górnej granicy kąta opasania wynoszącej $\gamma = 87^\circ$. Dla modeli $\gamma = 57^\circ$ oraz $\gamma = 67^\circ$ określenie wpływu szczeliny na pracę pompy było niejednoznaczne, ponieważ dla różnych wydajności zmiana sprawności jest minimalna, fluktuując między jej wzrostem a spadkiem.

Przez szczelinę przepływa strumień cieczy z krawędzi czynnej do krawędzi biernej, zapobiegając jego odrywaniu. Proces separacji strugi cieczy od powierzchni łopatki zazwyczaj dotyczy wirników z mniejszą wartością kąta opasania łopatki (i z mniejszą ich liczbą), kiedy ma bardzo stromy przebieg.



Literatura

- [1] Jędral W., *Pompy wirowe*, Wydawnictwo Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [2] Gulich J.F., *Centrifugal pumps*, Springer Berlin–Heidelberg–New York, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2008.
- [3] Krawczyk Z., Rokita J., *Zwiększenie wysokości podnoszenia pompy odśrodkowej przez zaostrożenie łopatek wirnika na wyphynie*, „Pompy. Pompownie” 2002, nr 1.
- [4] Neuman B., *The interaction between Geometry and Performance of a Centrifugal Pump*, Mechanical Engineering Publications Limited, London 1991.
- [5] Wei Y. et al., *Influence of Impeller Gap Drainage Width on the Performance of Low Specific Speed Centrifugal Pump*, “Journal of Marine Science and Engineering” 2021.

**MANUSCRIPTS
IN ENGLISH**

Fe-Mn BASED OXYGEN CARRIERS FOR CHEMICAL LOOPING COMBUSTION OF SOLID FUELS

NOŚNIKI TLENU NA BAZIE ŻELAZA I MANGANU DO SPALANIA PALIW STAŁYCH W CHEMICZNEJ PĘTLI TLENKOWEJ

Miratul Alifah, Zuzanna Skitaniak, Ewelina Ksepko

Katedra Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

E-mail addresses: miratul.alifah@pwr.edu.pl, ewelina.ksepko@pwr.edu.pl

Despite the transition to renewable energy sources, the combustion of solid fuels will still have a significant share in global energy production in the foreseeable future. In connection with this and the need to reduce greenhouse gas emissions, new and more environmentally friendly methods of fuel combustion are developed. One of such technologies is Chemical Looping Combustion (CLC). CLC technology allows for a significant decrease in cost carbon capture from the fumes. This is possible because of elimination of the production of thermal nitrogen oxides. Because all oxygen is delivered to the combustion process by a substance called the oxygen carrier (OC), the fuel does not have contact with atmospheric air. CLC allow for the combustion of a wide range of fuels like gaseous, liquid, and solids. Furthermore, the energy penalty in CLC technology is much lower in comparison to competing methods such as oxy-fuel combustion [1].

The main problem related to CLC technology is the cost of the oxygen carrier. OCs are prone to degradation due to chemical inactivation or physical breakdown, and therefore new, more stable, and cheaper materials are developed. One of such OCs is substances based on iron and manganese oxides. Both iron and manganese oxide are characterised by low price; they are also non-hazardous materials. Moreover, OCs based on such oxides are capable of spontaneous emission of oxygen in a reaction that results in a drop of its partial pressure in the reaction environment. This effect is referred as Chemical Looping with Oxygen Uncoupling (CLOU). The CLOU effect plays a significant role in the combustion of solid fuels. It has been reported that OCs with CLOU properties are capable of reacting with solid fuels up to 5 times faster than OCs that do not exhibit such an effect [2]. The mechanical properties of oxygen carriers can be further increased by the addition of other oxides that do not participate in the reaction with fuels, so-called inert materials. Commonly used inerts are ZrO_2 , TiO_2 , or Al_2O_3 [3].

In the research presented, results of thermogravimetric analysis of coal combustion of several selected mixed metal oxygen carriers synthesised from iron and manganese oxide are presented.



Funding sources

The work was financed by the National Science Center project no. 2020/37/B/ST5/01259.

Literature

- [1] Adánez J., Abad A., *Chemical-looping combustion: Status and research needs*, „Proc. Combust. Inst.” 2019, Vol. 37, pp. 4303–4317, <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2018.09.002>
- [2] Leion H., Mattisson T., Lyngfelt A., *Using chemical-looping with oxygen uncoupling (CLOU) for combustion of six different solid fuels*, „Energy Procedia” 2009, Vol. 1, pp. 447–453, <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2009.01.060>
- [3] Ksepko E., Lysowski R., *Extremely Stable and Durable Mixed Fe–Mn Oxides Supported on ZrO₂ for Practical Utilization in CLOU and CLC Processes*, „Catal.” 2021, Vol 11, p. 1285, <https://doi.org/10.3390/CATAL11111285>

A PRELIMINARY STUDY ON THE APPLICATION OF TWO-PHASE VOLUMETRIC EXPANDERS IN KALINA CYCLES

WSTĘPNA ANALIZA ZASTOSOWANIA DWUFAZOWYCH EKSPANDERÓW OBJĘTOŚCIOWYCH W OBIEGACH KALINY

Sindu Daniarta^{1,2}, Przemysław Błasiak¹, Piotr Kolański¹, Attila R. Imre^{2,3}

¹Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources,
Wrocław University of Science and Technology

²Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Power Engineering,
Budapest University of Technology and Economics

³Department of Thermohydraulics, Centre for Energy Research

E-mail addresses: *sindu.daniarta@pwr.edu.pl*, *daniarta@energia.bme.hu*

The Kalina cycle, which is a type of thermodynamic power cycle using an ammonia-water mixture as a working fluid, has been seen as an ambitious competitor to the organic Rankine cycle (ORC) and is an important advancement in thermal power plant design since the introduction of ORC in the 1850s [1]. Compared to ORC, it likely has similar components in the configuration of the system but different working fluids. There are several configurations of the Kalina cycle, and each type is designed for a specific application such as bottoming cycle, low-temperature geothermal, industrial waste heat, cogeneration, nuclear reactor, combined cycle plants, etc. Some configurations of the Kalina cycle may work under two-phase conditions (after the separator). Typically this two-phase state of the working fluid is avoided in the expansion process due to several issues related to turbomachinery, such as erosion of the blade surface, condensation in the working chamber, and so on [2, 3] and a throttle valve is used to handle this state in the system. Nevertheless, recent review articles [2, 3] reported that some volumetric expanders might be able to operate under these two-phase conditions. Therefore, this study aims to present a possible improvement of the Kalina cycle using a two-phase expansion that was not considered in the prior investigation. This study discusses the literature review, the mathematical model, and the advantages of employing two-phase expanders in the Kalina cycle. The obtained result shows that by the application of two-phase expanders, the efficiency and generated power of the Kalina cycle could be improved.



Literature

- [1] Zhang X. et al., *A Review of Research on the Kalina Cycle*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2012, Vol. 16, Issue 7, pp. 5309–5318, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.040.
- [2] van Heule X. et al., *Two-Phase Volumetric Expanders: A Review of the State-of-the-Art*, “Energies” 2022, Vol. 15, Issue 14, p. 4991, doi: 10.3390/en15144991.
- [3] Francesconi M. et al., *A Review on Two-Phase Volumetric Expanders and Their Applications*, “Applied Sciences” 2022, Vol. 12, Issue 20, p. 10328, doi: 10.3390/app122010328.

DESIGN OF PARTIALLY EVAPORATED ORGANIC RANKINE CYCLE AND TRILATERAL FLASH CYCLE TEST-STAND

PROJEKT STANOWISKA BADAWCZEGO DO TESTOWANIA UKŁADÓW ORC Z CZĘŚCIOWYM ODPAROWANIEM CZYNNIKA ROBOCZEGO ORAZ UKŁADÓW TFC

Sindu Daniarta^{1,2}, Dawid Sowa¹, Piotr Kolański¹

¹Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources,
Wrocław University of Science and Technology

²Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Power Engineering,
Budapest University of Technology and Economics

E-mail addresses: sindu.daniarta@pwr.edu.pl, daniarta@energia.bme.hu

Organic Rankine cycle (ORC), which is a promising type of thermodynamic power cycle using organic working fluid, has been seen as an important advancement in thermal power plant design. This technology can be implemented in a wide range of heat source operating temperatures. However, utilizing low-grade heat sources (e.g., intermittent and fluctuating heat sources) could lead to unsuccessful or partial evaporation of the working fluid before the expansion process (indicated with vapour quality, x), which significantly influences the performance of the system. Vapour quality plays an important role in thermodynamic power cycles and could change the term of the process. The state of the working fluid at the inlet to the expander with $x = 0$ describes the trilateral flash cycle (TFC) while the system with $0 < x < 1$ refers to the partially evaporated ORC (PE-ORC). In the preliminary mathematical modelling studies, the obtained results show that PE-ORC might outperform the ORC and TFC under certain conditions [1, 2]. Therefore, we seek to improve the understanding of the comparison between ORC, PE-ORC, and TFC in the experiment to prove and validate the simulation model. In order to do that, we have been working on redesigning the existing ORC test-stand, so that an experimental setup could be used to analyse the influence of vapour quality on the performance of the overall system performance and each component. This study reviews several possibilities on how to obtain two-phase conditions in the lab-scale ORC system. In addition, the redesign process of the experimental ORC, PE-ORC, and TFC test-stand at the Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources, Wrocław University of Science and Technology is reported using the sensors of refrigerant vapour quality to measure the dryness at the inlet and outlet of the expander.



Funding sources

This work was supported and funded by the Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources, Wrocław University of Science and Technology. Moreover, this work was also supported and funded by the Faculty of Mechanical and Power Engineering, Wrocław University of Science and Technology through “Wspieramy Młodych Naukowców 2022” programme.

Literature

- [1] Daniarta S. et al., *Thermodynamic Efficiency of Trilateral Flash Cycle, Organic Rankine Cycle and Partially Evaporated Organic Rankine Cycle*, “Energy Conversion and Management” 2021, Vol. 249, 114731, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114731.
- [2] Daniarta S. et al., *Thermodynamic Efficiency of Subcritical and Transcritical Power Cycles Utilizing Selected ACZ Working Fluids*, “Energy” 2022, Vol. 254, 124432, doi: 10.1016/j.energy.2022.124432.

UTILIZATION OF PLASMA TECHNOLOGY TO MINIMIZE EMISSIONS OF HAZARDOUS SUBSTANCES

WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII PLAZMOWYCH DO OGRANICZANIA EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ

Tolganay Kaltay¹, Magzhan Orynbasar^{1,2,3}

¹ Al-Farabi Kazakh National University

² Institute of Combustion Problems

³ Wrocław University of Science and Technology

E-mail address: tolganaykaltay@gmail.com

Solid fuels have a huge potential to take a leading position in the future energy market from the point of view of ecology and energy. Scientific and technological progress has made it possible to use coal with minimal harmful emissions, in addition, sufficient reserves of solid fuel can maintain the global energy balance in the coming years. This type of solid fuel is the main one for the production of thermal and electrical energy and is able to maintain price stability in the long term. The use of highly reactive fuels (heavy oil and natural gas) for combustion leads to various environmental and economic costs, climate change, and environmental pollution. The search for alternative technologies for clean fuel combustion is becoming a trend for the energy industry and environmentalists. One of the promising technologies that have been presented at various international exhibitions and are widely used in a number of countries is plasma technology. This technology produces low-temperature plasma using a plasmatron and replaces heavy oil and gas burners. The temperature of the plasma torch at the outlet of the plasma-coal burner can reach 5000 K and is able to completely remove toxic substances in the environment.

EXPERIMENTAL SETUP FOR THERMAL ANALYSIS OF EVAPORATOR'S FIN SURFACE DURING FROST FORMATION OCCURRING IN DOMESTIC REFRIGERATOR

STANOWISKO DOŚWIADCZALNE DO ANALIZY TERMICZNEJ POWIERZCHNI ŻEBER PAROWNIKA PODCZAS POWSTAWANIA SZRONU W LODÓWCE DOMOWEJ

Daria Krasota, Piotr Kolasiński, Przemysław Błasiak

Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources,
Wrocław University of Science and Technology

E-mail address: daria.krasota@pwr.edu.pl

In depth analysis of recent scientific publications indicates the increase of interest to the topic of frost formation which occurs on the surface of heat exchangers [1]. Significant amount of research is dedicated to understanding such phenomena occurring on the evaporator of domestic refrigerator, due to the fact, that in this area the conditions are the most extreme. The difference of temperatures of cold evaporator and relatively warm stream of air, provoking present humidity to sublimate on the surface of the fin, which drastically decrease the cross-section of airflow passage. Therefore, the value of heat transfer between evaporator and air is dropping drastically, and the refrigerator needs more time to cool down. This consequentially will require longer running time of compressor and fan (if present) and as the result such changes will lead to the higher energy consumption. Energy consumption as well as temperature levels of the refrigerator are parameters that can not be compromised. Hence, understanding and preventing frost formation on the surface of the evaporator is an important challenge.

In current available literature the articles treating about different experimental studies dedicated to this topic can be found. However, most of the experiments are conducted inside the wind tunnel. It surely has its advantages, nonetheless it has been proven [2] that the significance of the velocity profile as one of the dominating factors considering the impact to such outputs as frost profile, frost growth rate and its volume. Therefore, for understanding frost formation occurring on the evaporator of a domestic refrigerator, it is important to conduct the test as well inside the cabinet. It's geometry (i.e., connection between warmer and colder compartment, called return duct) pays major contribution to forming the velocity profile. It is as well important to have quantitative outputs, which besides common understanding may contribute to the validation of CFD (Computational Fluid Dynamics) models.



In this article, a test-stand which has been designed in the laboratory at the Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources, Wrocław University of Science and Technology is presented. Test-stand consists of BM (Bottom Mount) FNF (Full No Frost – compartments are connected, and the fan is present) Refrigerator; camera and measuring system which estimates humidity of the internal and external air, thermocouples and heat flux sensors. The novelty of the measuring technique is the scale, which is providing the data of frost mass growth varying in time with a relatively small error due to the measuring system sensitivity.

Funding sources

The publication was produced within the framework of competition “Wspieramy Młodych Naukowców 2022” financed by Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources, Wrocław University of Science and Technology.

Literature

- [1] Krasota D., Błasiak P., Kolański P., *Literature Review of Frost Formation Phenomena on Domestic Refrigerators Evaporators*, “Energies” 2023, Vol. 16, 2945, <https://doi.org/10.3390/en16072945>
- [2] Leoni A. et al., *State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces*, “Int. J. Refrig.” 2016, Vol. 68, pp. 198–217.

PLASMA IGNITION OF COAL: NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENT

ZAPŁON WĘGLA Z WYKORZYSTANIEM PLAZMY: BADANIA NUMERYCZNE ORAZ EKSPERYMENTALNE

Vladimir Messerle^{1,2}, Magzhan Orynbasar^{1,2,3}, Halina Pawlak-Kruczek³, Alexander Ustimenko^{1,2}

¹Institute of Combustion Problems

²Al-Farabi Kazakh National University

³Wrocław University of Science and Technology

E-mail address: *orynbassar_magzhan@live.kaznu.kz*

The thermodynamic analysis was carried out using the universal TERRA program, which allowed determining the optimal parameters of the plasma ignition process and solid fuel combustion stabilization [1, 2]. The PlasmaKinTherm program was used for kinetic modelling of the process of plasma ignition and combustion stabilization of solid fuels [3]. Changes in temperature, velocity, and concentration of components of high-temperature two-component fuel throughout the plasma fuel system were revealed. Experiments on the plasma ignition of Ekibastuz coal ensured a steady ignition of the flame (Fig. 1). The temperature, composition of high-temperature two-component fuel, and degree of coal gasification were determined. A comparison of experimental data and calculations showed a satisfactory coincidence.



Fig. 1. Bench tests of the plasma fuel system and a flare of high-temperature two-component fuel at the outlet



Literature

- [1] Gorokhovski M. et al., *Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory*, “Journal of the Energy Institute” 2005, Vol. 78, No. 4, pp. 157–171, <https://doi.org/10.1179/174602205X68261>
- [2] Messerle V.E. et al., *Plasma preparation of coal to combustion in power boilers*, “Fuel Process. Technol.” 2013, Vol. 107, pp. 93–98, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.07.001>
- [3] Messerle V.E., Ustimenko A.B., *Modeling of Coal Ignition in Plasma-Fuel Systems with an Electric Arc Torch*, “IEEE Transactions on Plasma Science” 2020, Vol. 48, No 2, pp. 343–349, <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2956847>

APPLICATION OF THE AP1000 NUCLEAR POWER UNIT TO SUPPLY HEAT TO THE DISTRICT HEATING SYSTEM

WYKORZYSTANIE BLOKU AP1000 DO ZASILANIA MIEJSKIEGO SYSTEMU CIEPŁOWNICZEGO W CIEPŁO

Tesfatsyon Simon Ochono^{1,2}, Melkamu Ada Anjulo³, Wogen Yigebahal Zada⁴,
Belayneh Semahegn Ayalew¹

¹Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw University of Technology

²Department of Mechanical Engineering, Wolaita Sodo University

³Faculty of Mechanical Engineering, Arba Minch University

⁴Department of Mechanical Engineering, Haramaya University

E-mail address: *tesfasimon1@outlook.com*

The need for technological advancements toward carbon-free solutions is imperative for reducing CO₂ emissions. One such solution is generating carbon-free heat for district heating through nuclear power plants, in addition to producing carbon-free electricity. Nuclear power is more environmentally friendly and reliable than fossil fuels, meeting the crucial priorities of the global energy supply, such as cleanliness, high efficiency, and low carbon content [1]. One of the primary benefits of nuclear power is its reputation as a clean energy source with minimal environmental impact from carbon emissions. When compared to similar wattages of natural power sources like wind and solar, nuclear power emits a comparable amount of greenhouse gases over its lifetime. As of the 2018 report of the IAEA, one entire fuel cycle of nuclear power emits between 5 and 20 grams of CO₂ per kilowatt-hour [2]. This is significantly less than the amount released by similar wattage coal power plants. As a result, nuclear power plays an important role in mitigating environmental harm and meeting future power demands.

One of the most effective solutions for improving the efficiency of thermal power plants globally is Cogeneration. This method is widely utilized in traditional coal-fired and gas-fired power plants to produce useful output from the conversion of fuel chemical energy, resulting in combined heat and power plants (CHP). In nuclear power plants, a considerable amount of low-temperature heat energy is wasted as a byproduct, mainly in the condensers. Hence, integrating this capacity into the district heating system and creating a nuclear combined heating and power generation (NCHP) facility can be economically beneficial. Moreover, utilizing cogeneration applications can significantly reduce its adverse environmental impacts [3].

This study focuses specifically on implementing the AP1000 nuclear power unit to supply heat to the district heating system, and the study presents a model of the unit operating in cogeneration

to evaluate the technical feasibility and the performance of the cogeneration plant under different operating conditions, such as varying heat demand and load fluctuations. The study utilizes the Epsilon Professional software to model the AP1000 nuclear power unit's energy balance and optimize the extraction of steam for cogeneration. The resulting model, the AP1000-CHP nuclear power plant (Fig. 1) was designed to simulate both 100% and part-load conditions, such as CK90, CK70, CK50, and CK30, to meet varying energy demands for district heating applications throughout different seasons. The study also provides an overview of the history and current status of nuclear district heating systems globally, along with expected developments in heat generation. Moreover, this study contributes to the understanding of the feasibility of using nuclear power plants to supply carbon-free heat for district heating and provides insights into the modeling and optimization of such systems.

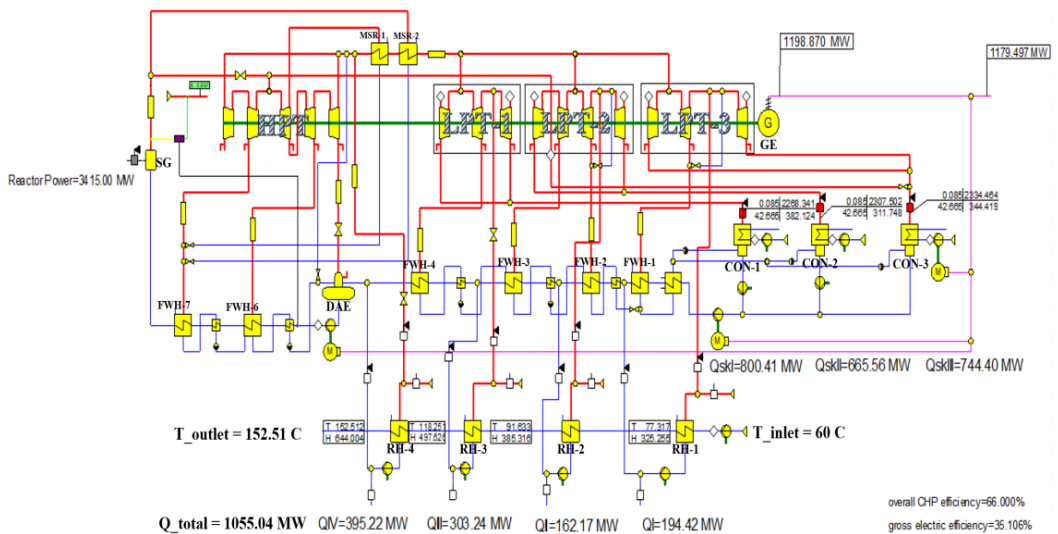


Fig. 1. Schematic diagram of AP1000-CHP unit in design condition, modelled by Epsilon professional software for the calculations of thermodynamic cycle state properties, energy balance, and heat and electric power output

Notes: SG stands for Steam generator; MSR-1 and MSR-2 represent Moisture separator/reheater 1 and 2, respectively; HPT stands for high pressure turbine; LPT-1, LPT-2 and LPT-3 stand for low pressure turbines 1, 2 and 3, respectively; GE stands for Generator; DAE stands for deaerator; CON stands for Condenser; FWH-1–FWH-7 stand for the feedwater heaters 1–7, respectively; RH-1, RH-2, RH-3 and RH-4 stand for water heaters 1, 2, 3 and 4, respectively, for the district heating system

Literature

- [1] Liu M., Wang S., Yan J., *Operation scheduling of a coal-fired CHP station integrated with power-to-heat devices with detail CHP unit models by particle swarm optimization algorithm*, “Energy” 2021, Vol. 214, doi:10.1016/j.energy.2020.119022
- [2] International Atomic Energy Agency, *Climate Change and Nuclear Power*, Vienna 2018.
- [3] International Atomic Energy Agency, *Industrial Applications of Nuclear Energy*, Nuclear Energy Series, No. NP-T-4.3, Vienna 2017.

A SYSTEM ENHANCING THE EFFICIENCY OF ENERGY USED IN ELECTRIC VEHICLES

SYSTEM ZWIĘKSZAJĄCY EFEKTYWNOŚĆ WYKORZYSTANIA ENERGII W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH

Mikołaj Rygallo

Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów,
Kolo Naukowe PWr Solar Boat Team

E-mail address: 263543@student.pwr.edu.pl

With the transportation industry shifting towards electric vehicles some attention should be pulled to their electric energy usage and potential energy-generation modules like solar panels. One of the ways of saving energy is increasing the efficiency of its utilization, for electric vehicles that is mostly influenced by the motor. Typically, the more voltage we pass to the motor the less efficiently the energy is used. Due to that I started development on a system that will measure the flow of charge to and from the battery and simulate future behavior, as well as returning to the pilot or driver the setting that will provide the best range for the vehicle.

For battery state of charge monitoring voltage measurement with the use of a lookup table, coulomb counting and Kalman filtering will be used. To measure the initial accumulated charge, I'll use the discharging curve from the technical documentation of the battery, create a lookup table and then extrapolate a polynomial from which the microcomputer will calculate the charge of the battery. After the initial measurement I'll use coulomb counting along with Kalman filtering to keep track of the state of charge. Knowing that charge is the integral of current over time – equation (1) – I can measure the current and use the microcomputers built-in clock in a loop to get the value of charge moved to and from the battery:

$$E = \int I(t)dt \quad (1)$$

where: E is charge, I – current, t – unit of time. I use the method above in tandem with Kalman filtering in order to increase the state of charge measurement accuracy, lowering the error on SoC estimation from 11.4% to about 2.5% [1]. The system would measure both the energy consumption and generation from modules like solar panels.

Assuming an accurate charge measurement I next simulate the future discharging using a mathematical model created in the MATLAB® and Simulink environment, based on the specific batteries used in the vehicle. Multiple models are simulated for different settings of the throttle, then



depending on the expectations, we pick the best model. We can choose a time limit for our run, then we would pick the model which discharges a little after the limit. This may be useful for endurance categories in electric vehicle races, where the goal is to cover as much distance as possible within a time limit. Alternatively, it could be used in the functioning of public transportation like water buses, allowing for the balancing of speed, and thus time between stops and energy efficiency.

Acknowledgements

The system is being worked on with financial backing from the “Talenty” Scholarship Fund.

Literature

- [1] Wanga J. et al., *Combined state of charge estimator for electric vehicle battery pack*, “Control Engineering Practice” 2007, Vol. 15, p. 1569–1576.

DETERMINATION OF PARTIAL DISCHARGE LOCATION IN CABLE CROSS-BONDING SYSTEM

LOKALIZOWANIE WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNEGO W SYSTEMIE KRZYŻOWANIA KABLI

Anatolii Tymchenko^{1,2,3}, Bogdan Gorgan³

¹Control in Power Engineering, Wydział Elektryczny, Politechnika Wroclawska

²Faculty of Electrical Engineering, RWTH Aachen University

³OMICRON Energy Solutions GmbH

E-mail address: 240839@student.pwr.edu.pl

Energy transmission is an important and complex topic and one of the optimal solutions is the utilization of power cable lines. For energy transfer for long distances, power cable lines consist of multiple cable sections, which are connected by cable joints. To avoid induction current losses, transposition strategy is commonly used (Fig. 1). The voltages induced in the individual loops ideally add up to zero along the length between the grounding points, so that no induction current flows on the cable sheaths despite rigid grounding of the shields at the ends [1].

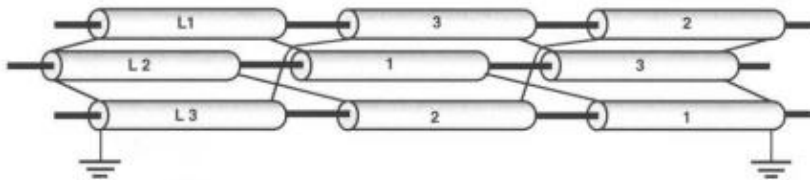


Fig. 1. Cross bonding scheme [1]

In case of any insulation defects in cross-linked cables, partial discharge (PD) will be observed and will lead to a degradation of the cable insulation. For online monitoring of the power cables insulation quality, a high-frequency current method is commonly used.

In case of a cross bonded cable system there is a crosstalk of all three phases possible. The cross-bonding link cables are the connecting elements of this coupled system. So, a PD pulse can leave its fault related phase and can be also verified in the other two phases. Figure 2 shows a schematic diagram of the pulse propagation at a cross bonding link [3].

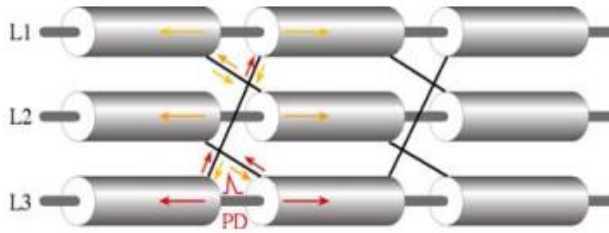


Fig. 2. Propagation of PD signal in cross-bonding system [3]

Determination of PD at the cross-bonding section can be performed by HFCT (MCT120), which are installed around the cable screens, could be connected to different OMICRON PD solutions (MPD800, MONTESTO200/OMS841), as it is shown in Fig. 3. Measurement setup is influenced by the stray capacitances to ground. Moreover, the cable model must be checked for good contact to the used adapters.

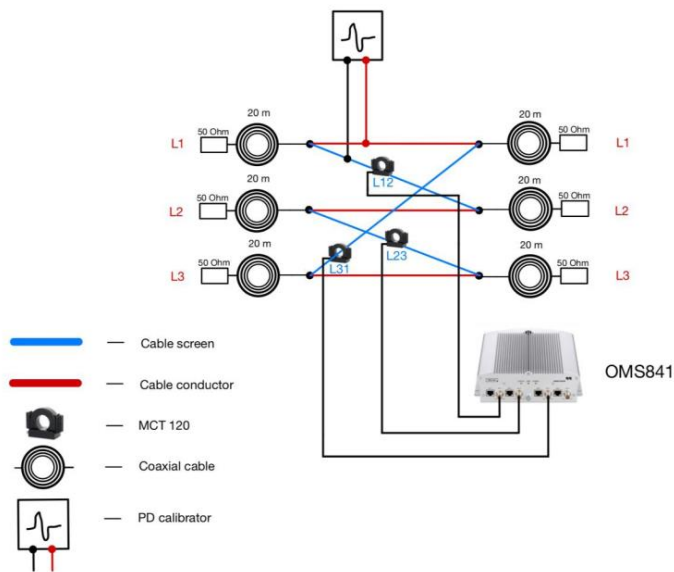


Fig. 3. Monitoring test setup

Monitoring test setup was constructed to check the method in laboratory conditions. Partial discharge is simulated by Calibrator type B.

During the tests, PD pulse was injected from the both sides of the cross-bonding joint model. Measurements have been performed for different frequencies for the proofing of stability and reliability of the model. All test results satisfy all requirements, and “damaged” phase can be determined properly. 3PAR diagrams for each phase and side of injection are provided below.

With the help of a PD monitoring software with 3PARD (3 phase-resolved partial discharge) patterns, the user can determine defected phase. 3PARD axes are not directly related to the phases L1, L2, L3, but related to the according screens: L1 – L2, L2 – L3, L3 – L1. The resulting color-coded PD cluster lies between the axes L12 and L31. Therefore, the origin of the PD pulses can determine to the phase L1.

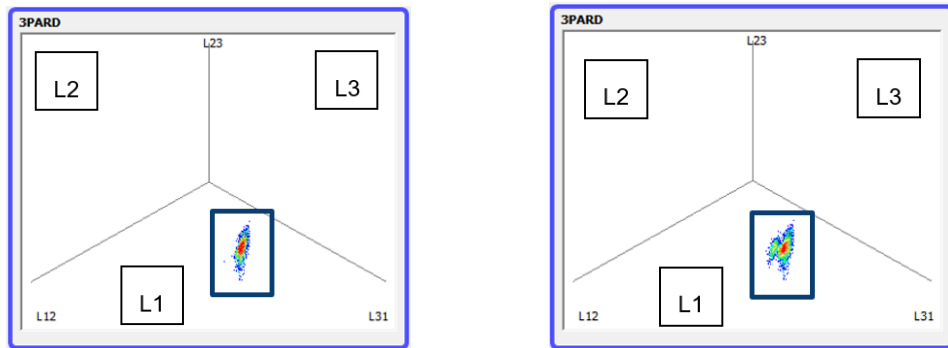


Fig. 4. PD clusters for 800 kHz and 2 MHz, determined from injection in L1, left side of joint model

Functional test setup provides correct phase identification for different amplitudes of the charge injected by the calibrator (10 nC, 5 nC, 2 nC, 1 nC) and for different values of frequency up to 10 MHz.

Monitoring system MONCABLO provided by OMICRON company can determine continuously monitor HV cable lines. It is designed for buried or tunnel cable systems. Also, it provides an integration of data from other sensors and export them to SCADA. Company also evaluates measurement dates (periodically or on request) and provides software updates [3].

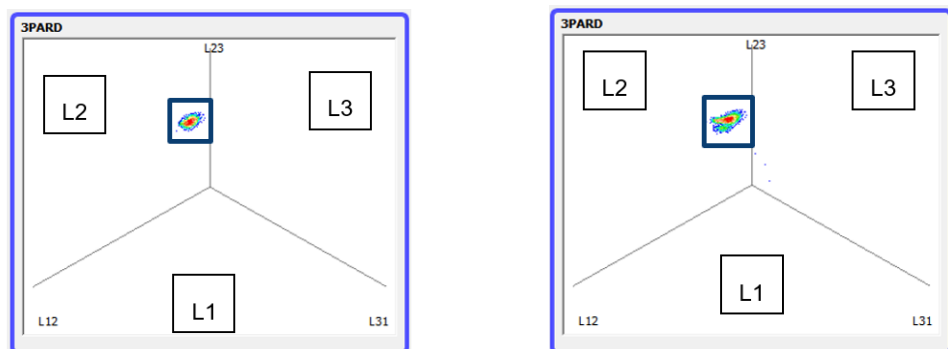


Fig. 5. PD clusters for 800 kHz and 2 MHz, determined from injection in L2, right side of joint model

On figures below, active monitoring system of cable line (XLPE 4 3 × 380 kV) in Belgium is presented. System involves 156 HFCT sensors, which are connected to 52 monitoring units, which are connected to the server by fiber-optic connection [3].

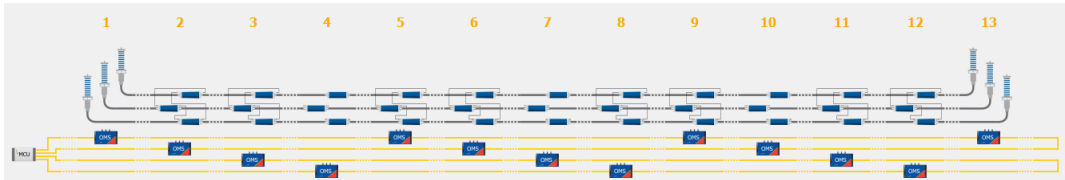


Fig. 6. Monitoring system of HV cable line [3]



Fig. 7. Connection of OMS843 to the server through fiber-optic connection [3]

Monitoring system perform measurements simultaneously at all cable accessories during the AC voltage after-installation test of the cable system. Software of the system provide following functions: present scalar values with timestamp, visualize PRPD pattern, perform automated cluster separation.

In conclusion, OMICRON monitoring software provide stable observation of HV cable lines and, as it was shown, PD solutions can determine location of partial discharge in three-phase cross-bonding system by utilizing of HFCT sensors.

Literature

- [1] Rethmeier K., *Neue Auskoppelverfahren und Sensoren zur Vor-Ort-Teilentladungsmessung an Hochspannungskabelanlagen*, Dipl.-Ing., Technische Universität Berlin, 2006.
- [2] Qian Y. et al., *Amplitude Distribution of Partial Discharge Signals on Tunnel-Installed High-Voltage Cables*, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao tong University, Shanghai, China, 2019.
- [3] Koltunowicz W., *Doświadczenia z monitorowania WNZ w kablach XLPE wysokich napięć*, OMICRON Energy Solutions.

SELECTED CHALLENGES OF DESIGNING AN AEROSPIKE NOZZLE FOR ADDITIVE MANUFACTURING

WYBRANE ZAGADNIENIA Z PROJEKTOWANIA DYSZ TYPU AEROSPIKE Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII ADDYTYWNYCH

Paweł Wiatrzyk

Kolo Naukowe PWr in Space, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska

E-mail address: pawel.wiatrzyk@pwr.edu.pl

Aerospike nozzles are a promising solution for rocket engines due to their increased operational range and efficiency when compared to traditional converging-diverging nozzle designs. However, the application of aerospike nozzles in the aerospace industry has been limited due to the complex manufacturing methods and the challenge of effective heat dissipation. This study aims to highlight the crucial aspects and design challenges of creating an aerospike nozzle for additive manufacturing. The complex shape of the aerospike nozzle makes it an ideal candidate for additive manufacturing techniques such as Laser Powder Bed Fusion. By using metal 3D printing, the design of the aerospike nozzle can be simplified and produced as a single part. This allows for rapid prototyping and provides the flexibility needed to iterate and refine the design.

The design of the aerospike nozzle is influenced by several factors such as the combustion chamber pressure, nozzle exit diameter, and nozzle length. These factors affect the shape of the nozzle and the efficiency of the propulsion system. Additionally, the materials used in the manufacturing process play a critical role in the heat dissipation properties of the nozzle. The use of advanced simulation and optimization techniques can aid in the design process of the aerospike nozzle. Finite element analysis and computational fluid dynamics simulations can be used to model and optimize the performance of the nozzle. This allows for a better understanding of the effects of different design parameters and materials on the nozzle's performance. The challenges associated with designing an aerospike nozzle for additive manufacturing include the need for precise control over the printing process, knowledge of metal powder properties as well as adequate heat treatment to ensure the final product meets the required specifications. Additionally, the large size of the nozzle can pose a challenge for certain types of metal AM printing techniques. Overall, this study provides an overview of the design challenges associated with creating an aerospike nozzle for additive manufacturing.

**WYKŁADY
PLENARNE
I GOŚCINNE**

AIRBUS ZEROE – THE AEROSPACE FUTURE WITH HYDROGEN

AIRBUS ZEROE – PRZYSZŁOŚĆ LOTNICTWA Z PALIWEM WODOROWYM

Anna Renata Adamczyk

Airbus Operations GmbH

E-mail address: anna-renata.adamczyk@airbus.com

In order to actively contribute to the fulfilment of the aviation decarbonisation targets, Airbus' plan is to offer its first hydrogen-powered commercial aircraft by 2035. The ZEROe project enables exploration of a variety of configurations and technologies that will prepare the development of a future hydrogen aircraft. The lecture (presentation) will focus on hydrogen as a future aviation fuel and specific technologies in the context of the investigated propulsion solutions. The presentation also looks into liquid hydrogen characteristics and technological challenges, related to the integration of the liquid hydrogen storage as well as the management system on a commercial aircraft.

NISKOTEMPERATUROWA ENERGIA ODPADOWA – JAK JĄ EFEKTYWNIE WYKORZYSTAĆ DO PRODUKCJI CHŁODU?

LOW-TEMPERATURE WASTE ENERGY – HOW TO EFFICIENTLY USE IT IN COOLING SYSTEMS?

Jerzy Gagan, Kamil Śmierciew, Michał Łukaszuk,
Dariusz Butrymowicz, Andrzej Pawluczuk

Katedra Techniki Ciepłej, Politechnika Białostocka

Adres do korespondencji: k.smierciew@pb.edu.pl

Ciepło odpadowe uchodzi za największe na świecie niewykorzystane źródło energii. Szacuje się, że ilość ciepła odpadowego wyprodukowanego tylko w samej UE wynosi 2860 TWh rocznie. Jest to niemal równe całkowitemu zapotrzebowaniu UE na ogrzewanie oraz ciepłą wodę w budynkach mieszkalnych i użytkowych. Większość tego ciepła można łatwo przechwycić i wykorzystać. Spośród dostępnych technologii układów chłodniczych napędzanych energią ciepłą, układy strumienicowe pozwalają na wykorzystanie ciepła przy najniższym potencjale, tj. temperaturze źródła ciepła poniżej 80°C do wytwarzania mocy chłodniczej. W pracy przegląd najnowszych badań układów strumienicowych zastosowanych do produkcji chłodu w dużej i małej skali. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych strumienicowego układu chłodniczego wdrożonego w zakładzie przemysłowym do odzyskiwania ciepła odpadowego z zespołów sprężarek tłokowych. Dostępna moc ciepła źródła ciepła odpadowego dla badanego układu wynosiła 200 kW. Po raz pierwszy system strumienicowy został przetestowany pod kątem pracy z niepalnym czynnikiem chłodniczym R1233zd(E) o ekstremalnie niskim GWP i odbierającym ciepło w temperaturze niższej niż 70°C. Uzyskano 45 kW mocy chłodniczej. Pokazano również wyniki numeryczne i eksperymentalne miniaturowego urządzenia chłodniczego o mocy 6 W zaproponowanego do chłodzenia urządzeń elektronicznych. Taka ilość ciepła odpowiada potrzebom chłodzenia procesorów w typowych smartfonach, a zakres temperatury źródła ciepła nieprzekraczającego 60°C czyni te urządzenia bardzo atrakcyjnymi. W pracy przedstawiono charakterystyki robocze, omówiono warunki pracy i uzyskiwane sprawności dla różnych czynników roboczych.

ROLA ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII W DEKARBONIZACJI PRZEMYSŁU W POLSCE

THE ROLE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE DECARBONISATION OF INDUSTRY IN POLAND

Radosław Gnutek

Polenergia S.A.

Adres do korespondencji: radoslaw.gnutek@polenergia.pl

Rozwój OZE w Polsce jest kluczowym elementem w dekarbonizacji przemysłu. Bezpośrednia elektryfikacja procesów przemysłowych jest traktowana jako podstawowa metoda obniżania emisji CO₂. Niektóre obszary uznawane są jednak jako szczególnie trudne, gdzie bezpośrednio zastosowanie energii elektrycznej nie jest możliwe. Zielony wodór jest postrzegany jako rozwiązanie tego wyzwania i traktowany jako odnawialny nośnik energii. Pozwala on także na wytwarzanie produktów pochodnych, takich jak syntetyczny amoniak, metanol czy paliwa ciekłe, zastępujących swoje kopalne odpowiedniki.

UKŁADY ORGANIC RANKINE CYCLE – ZAGADNIENIA DOBORU CZYNNIKA ROBOCZEGO I ROZPRĘŻARKI

ORGANIC RANKINE CYCLE TECHNOLOGIES – WORKING FLUID AND EXPANDER SELECTION

Piotr Kolasiński

Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: piotr.kolasinski@pwr.edu.pl

Układy ORC (*Organic Rankine Cycle*) znajdują coraz szersze zastosowanie do pozyskiwania energii ze źródeł alternatywnych (tj. odnawialnych i odpadowych). Jednym z najważniejszych zagadnień związanych z układami ORC jest prawidłowy dobór czynnika roboczego, który prowadzi się przy zastosowaniu różnych kryteriów. Najważniejszymi z nich są parametry fizykochemiczne czynnika roboczego, bezpieczeństwo jego użytkowania oraz oddziaływanie na środowisko. Rodzaj stosowanej rozprężarki ma też istotny wpływ na dobór czynnika roboczego i parametry pracy całego układu ORC. Podczas doboru czynnika roboczego i rozprężarki często uwzględniane są takie parametry pracy układu ORC, jak m.in. zakres ciśnień roboczych, gęstość czynnika roboczego, wymiary geometryczne rozprężarki i inne. Parametry te istotnie wpływają na osiąganą moc i sprawność układu ORC. W prezentacji przedstawiono wybrane zagadnienia związane z doбором czynnika roboczego i rozprężarki do układów ORC.

MAGAZYNOWANIE ENERGII – TECHNOLOGIE I PRZYKŁADY ZASTOSWAŃ

ENERGY STORAGE SYSTEMS – TECHNOLOGIES AND SELECTED APPLICATIONS

Daniel Smykowski

Katedra Inżynierii Konwersji Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Politechnika Wroclawska

Adres do korespondencji: daniel.smykowska@pwr.edu.pl

Zachodzące obecnie zmiany w obszarze energetyki powodują, że magazynowanie energii zyskuje na znaczeniu i staje się wręcz niezbędnym elementem nowoczesnych systemów energetycznych. Integracja magazynów energii z systemami elektroenergetycznymi, ciepłowniczymi lub instalacjami przemysłowymi umożliwia bardziej efektywne wykorzystanie energii, zwiększanie elastyczności pracy urządzeń wytwórczych, stabilizację systemów energetycznych oraz równoważenie popytu i podaży energii.

W referacie przedstawiono znaczenie magazynowania energii oraz wynikające z tego korzyści techniczne oraz ekonomiczne. Zaprezentowano również przegląd wybranych technologii magazynowania energii elektrycznej, takich jak ogniwa przepływowe redoks, magazynowanie energii w sprężonym powietrzu. Dodatkowo omówiono również technologie chemicznej konwersji energii, m.in. do wodoru oraz paliw syntetycznych. Ponadto, dokonano przeglądu technologii magazynowania (akumulacji) ciepła, których potencjał aplikacyjny jest największy. Należą do nich m.in. materiały zmiennofazowe (PCM – ang. *Phase Change Material*), materiały sorpcyjne, termochemiczne.

Jako przykład zastosowania technologii magazynowania energii w skali rzeczywistej, zaprezentowano innowacyjną technologię magazynowania ciepła z wykorzystaniem materiałów zmiennofazowych oraz zaawansowanego systemu zarządzania ciepłem bazującego na sztucznych sieciach neuronowych. Technologia została opracowana w ramach konsorcjum Politechniki Wrocławskiej oraz spółki KGHM Polska Miedź S.A. (program CuBR NCBiR) i zaimplementowana w postaci instalacji pilotażowej w Hucie Miedzi w Legnicy.

W referacie przedstawiono ponadto najważniejsze cechy technologii oraz korzyści wynikające z jej zastosowania w warunkach rzeczywistych.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w sprzedaży wysyłkowej:
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl
www.ksiegarnia.pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-243-1
<https://doi.org/10.37190/KME2023>



9 788374 932431 >