# TECHNOLOGIE ENERGETYCZNE REGIONU BAŁTYCKIEGO

Wyjazd naukowo techniczny 2019



# Spis treści

## SEKCJA POŚWIĘCONA ZAGADNIENIOM CFD

ANALIZA AERODYNAMICZNA STUDENCKIEGO PROJEKTU ZESPOŁU ZABUDOWY, Grzegor	z Królak3
NUMERYCZNE BADANIE EFEKTYWNOŚCI MECHANICZNEJ TURBULIZACJI PRZEPŁYWU W KOLEKTORZE SŁONECZNYM, Piotr Błach	14
NUMERYCZNE BADANIE EFEKTYWNOŚCI AKUSTYCZNEJ TURBULIZACJI PRZEPŁYWU W KO SŁONECZNYM, Fabian Dietrich	DLEKTORZE
SEKCJA POŚWIĘCONA ZAGADNIENIOM ENERGETYKI JĄDROWEJ	
HPWR , COMPARISON OF CHINESE REACTORS WITH OTHER TECHNOLOGIES, Igor Niewia	adomski 44
SEKCJA POŚWIĘCONA ZAGADNIENIOM MODELOWANIA	
MODELOWANIE SEKWESTRACJI DWUTLENKU WĘGLA W PROGRAMIE ASPEN PLUS, Kam Bogdanowicz	ıila 54
MODELOWANIE BLOKU ENERGETYCZNEGO KLASY 200 MW W PROGRAMIE ASPEN HYSY PODSTAWIE BLOKU NR 4 ELEKTROWNI KOZIENICE, Hubert Smoliński	'S NA 62
SEKCJA POŚWIĘCONA ZAGADNIENIOM KOGENERACJI I CIEPŁOWNICTWA	
KOGENERACJA ROZPROSZONA BIOMASY – ROZWIĄZANIE ENERGETYCZNE DLA POLSKI, I Murawka	Filip 69
SEKCJA POŚWIĘCONA ZAGADNIENIOM ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII	
ANALIZA STANU ZASTOSOWAŃ FOTOWOLTAIKI W POLSCE I NA ŚWIECIE, Agnieszka Kam	nińska 81
KRÓTKI OPIS FOTOWOLTAIKI, Teodor Sawicki	88
RODZAJE SYSTEMÓW INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH?, Łukasz Szymański	
SEKCJA POŚWIĘCONA ZAGADNIENIOM MAGAZYNOWANIA ENERGII	
SYSTEM POWER TO GAS JAKO PRZYSZŁOŚĆ MAGAZYNOWANIA ENERGII, Maciek Bąkała	
SEKCJA POŚWIĘCONA OGÓLNYM ZAGADNIENIOM ENERGETYKI	
ANALIZA NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH STOSÓW MCFC Górski, Adam Kujtkowski	C, Arkadiusz 106
ROZWÓJ ENERGETYKI PROSUMENCKIEJ JAKO METODY ENERGETYCZNEGO UNIEZALEŻNI POLSKI, Eryk Sochacki	IENIA SIĘ 117
SYSTEM CERTYFIKATÓW ENERGETYCZNYCH, Patrycja Krasoń	124
NOWOCZESNE DOMY PASYWNE, Tomasz Sadowski	129

# Analiza aerodynamiczna studenckiego projektu zespołu zabudowy

Grzegorz Królak

Opiekun naukowy: dr inż. Marta Poćwierz

Słowa klucz.	Streszczenie.	Artykuł	ten	obejmuje	podsumowanie	analizy	aerodynamicznej
	studenckiego p	rojektu ze	społu	zabudowy.	Badania te obejmo	owały wyl	konanie i zbadanie
	w tunelu aeroo	lynamiczn	ym n	nodelu w sk	ali 1:500 zespołu	budynkó	w, które stanowią
Aerodynamika	koncepcję arch	itektonicz	ną zag	gospodarow	ania przestrzeni u	ı zbiegu u	lic Indiry Gandhi
hudvnków	i Jana Rosoła	na warsza	wskir	n Ursynow	ie. Używając tecl	hniki olej	owej oraz saltacji
Symulacia	otrzymano roz	kład linii p	rądu i	i prędkości j	przy powierzchni g	gruntu w c	bszarze pomiędzy
numeryczna	budynkami. W	yniki tego	bada	ania stanow	iły bazę do walid	acji symu	lacji numerycznej
numer yezha	analogicznego	zagadnien	ia prz	zeprowadzo	nej w środowisku	ANSYS	Fluent. Następnie
	porównano wy	niki ekspe	rymer	ntalne i num	eryczne oraz sfori	nułowano	wnioski.

#### 1 Wstęp

#### 1.1 WPROWADZENIE

Zagadnienia związane z aerodynamiką budynków zaczynają być coraz częściej badane nie tylko na polu akademickim, ale również przy tworzeniu koncepcji urbanistycznych miast. Jest to spowodowane tym, że budowle które budujemy w centrach dużych miast osiągają coraz większe wysokości i wpływają w ten sposób na kształtowanie się pola przepływu powietrza. Przy źle zaprojektowanej przestrzeni miejskiej zdarzają się sytuacje, gdy nawet przy niewielkim wietrze prędkość przepływu powietrza wzmacnia się lokalnie do tak dużych wartości, że wpływa bardzo negatywnie na komfort przechodzących pomiędzy budynkami ludzi. Analogicznie obserwuje się przeciwny problem – zdarzają się miejsca zastoju powietrza, w których nie ma szans na skuteczną wentylację, co powoduje szereg problemów począwszy od ryzyka nadmiernych temperatur, kończąc na zbieraniu się pyłów oraz rozwijaniu niebezpiecznych grzybów.

W związku z tym badanie projektów przyszłych inwestycji pod kątem oddziaływania na aerodynamikę otoczenia wydaje się być konieczne do uwzględnienia w procesie projektowania budynków.

#### 1.2 CEL I ZAKRES PRACY

Podstawą do napisania tej pracy były badania wykonane podczas zajęć z aerodynamiki budynków. We współpracy ze studentami architektury, którzy stworzyli projekt osiedla (Rysunek 1), model oraz zbadali go w tunelu aerodynamicznym wykonano symulację komputerową analogicznego zagadnienia za pomocą techniki RANS, używając środowiska ANSYS Fluent. Celem wykonania tego samego badania za pomocą technik numerycznych i badań w tunelu była oprócz walidacji modelu numerycznego możliwość porównania stopnia skomplikowania obu podejść, czasu niezbędnego na otrzymanie wyników, zakres otrzymanych danych oraz dokładność.



Rysunek 1 – Wizualizacja projektu badanego osiedla

#### 1.3 ANALIZA AERODYNAMIKI BUDYNKÓW W TUNELU AERODYNAMICZNYM

Istnieją dwa podstawowe podejścia, za pomocą których można analizować aerodynamikę budynków. Klasyczne podejście opiera się na wykonaniu modelu w skali badanej geometrii i zachowując zasadę podobieństwa dynamicznego dokonania badania w tunelu aerodynamicznym. Najprostsze metody pozyskania danych są to wizualizacje powierzchniowe. Ich wadę stanowi fakt, że dostajemy dane o polu przepływu tylko przy powierzchni podłoża. Przykładem takich metod są metoda saltacji oraz filmu olejowego.

#### 1.3.1 Metoda saltacji

Polega ona na wykorzystaniu zjawiska wyrzucania cząsteczek (erozji) kalibowanego piasku z chwilą, gdy przepływ nad piaskiem osiągnie pewną krytyczną wartość. Saltacja nastąpi tylko na tych obszarach, gdzie prędkość przepływu płynu była wyższa bądź równa krytycznej. w ten sposób powtarzając doświadczenie przy różnych prędkościach przepływu w niezakłóconym polu otrzymujemy mapę prędkości przepływu.

#### 1.3.2 Metoda filmu olejowego

W tej metodzie badaną powierzchnię pomiędzy modelami budynków pokrywa się warstwą oleju z pigmentem. Prędkość spływania oleju zależy od jego lepkości i naprężeń stycznych przy powierzchni, natomiast te naprężenia zależą od prędkości przepływu. Im większa prędkość przepływu, tym większa warstwa pigmentu zostanie zmyta, więc otrzymujemy obraz uśrednionych w czasie prędkości i naprężeń stycznych.

#### 1.4 ANALIZA AERODYNAMIKI BUDYNKÓW ZA POMOCĄ SYMULACJI NUMERYCZNEJ

Drugim podejściem jest symulacja numeryczna. Polega na przeniesieniu geometrii badanego obiektu do postaci trójwymiarowego modelu, stworzenie domeny obliczeniowej na podstawie tej geometrii, zdyskretyzowaniu jej za pomocą siatki obliczeniowej oraz na przeprowadzeniu symulacji przepływu. Coraz większa doskonałość oraz szybkość otrzymania wyników, która rośnie wraz z rozwojem komputerów wpływa na zwiększającą się popularność tego podejścia oraz to, że nie ma potrzeby wykonywania modelu i używania tunelu aerodynamicznego, co generowałoby spore koszty.

#### 2 Model numeryczny

#### 2.1 GEOMETRIA

Domena obliczeniowa została wykonana na podstawie fragmentu osiedla zaprojektowanego przez Marię Tańską, studentkę Wydziału Architektury. Projekt ten wraz z numeracją budynków przedstawia poniższy rysunek.



Rysunek 2 – Projekt badanego osiedla wraz z numeracją budynków

Na podstawie geometrii osiedla wykonano model domeny obliczeniowej. Powstał on po przeskalowaniu osiedla do rozmiaru 1:500, ponieważ w takiej skali wykonano model, który był badany w tunelu aerodynamicznym. Granice obszaru domeny wokół osiedla przyjęto takie, aby nie wpływały one na jakość obliczeń wewnątrz obszaru obliczeniowego. Zgodnie ze wskazówkami z literatury (Tominaga i *in.*, 2008) przyjęto wysokość domeny w wysokości pięciokrotności najwyższego budynku, szerokość na boki 2,3 szerokości osiedla, zaś za osiedlem pozostawiono piętnastokrotność wysokości najwyższego budynku. Dłuższy obszar utworzono na wlocie, aby ustabilizować warstwę przyścienną w swobodnym polu przepływu.

#### 2.2 SIATKA OBLICZENIOWA

Na podstawie omówionej geometrii domeny obliczeniowej wykonano siatkę obliczeniową. Dokonując analizy wrażliwości siatki stwierdzono, iż rozmiar oczek siatki na jakość obliczeń przestaje mieć wpływ, gdy ma ona rozmiar 4 712 130 komórek oraz 906 256 węzłów.



Rysunek 3 – Siatka obliczeniowa – widok ogólny

Dookoła budynków oraz w bramach utworzono obszary o większym zagęszczeniu, co przedstawia poniższy rysunek:



Rysunek 4 – Siatka obliczeniowa - widok od spodu



Rysunek 5 – Siatka obliczeniowa - zbliżenie na bramy

Zadbano o zasymulowanie warstwy przyściennej o grubości pierwszego rzędu oczek zawierającej się w optymalnych wartościach parametru  $y^+$ .

#### 2.3 WARUNKI BRZEGOWE

Przepływ wymuszono za pomocą warunków velocity-inlet oraz pressure-outlet. Profil włotowy pola prędkości zdefiniowano za pomocą pliku udf jako logarytmiczny w osi pionowej definiując prędkość normalną (na wys. Referencyjnej 10 m wynosiła 10 m/s) oraz energię kinetyczną turbulencji i współczynnik dyssypacji. Ścianom zewnętrznym domeny obliczeniowej przypisano warunek symmetry, zaś na podłożu zamodelowano szorstkość o wysokości referencyjnej odpowiadającej 2 m przed przeskalowaniem.

#### 2.4 USTAWIENIA SOLVERA

Prędkości przepływu są na tyle niewielkie, że solver typu Pressure-Based jest zdecydowanie wystarczający. Analizowano przypadek ustalony. Najczęściej używanym i polecanym do zastosowań aerodynamiki budynków modelem turbulencji jest Realizable k-ε ze standardową funkcją ścianki (Jędrzejewski, Pocwierz i Zielonko-Jung, 2017), więc właśnie ten model został zastosowany. Właściwości płynu przyjęto jak dla powietrza w standardowych warunkach. Zbieżność residuów ustalono na poziomie 10<sup>-9</sup>.

#### 3 Wyniki

#### 3.1 PORÓWNANIE MAPY KONTUROWEJ PRĘDKOŚCI I WYNIKÓW SALTACJI

#### 3.1.1 Kierunek zachodni



Rysunek 6 – Mapa konturowa wartości wektorów prędkości, kierunek zachodni

Rysunek 7 – Wyniki saltacji, kierunek zachodni

Przedstawione powyżej rysunki przedstawiają wyniki numeryczne oraz pozyskane metodą saltacji pola prędkości na wysokości h = 1,75 m. Można zauważyć spore podobieństwo, ale też i drobne różnice pomiędzy wynikami numerycznymi i eksperymentalnymi. Pewien wpływ ma dokładniejsze odwzorowanie geometrii zagadnienia w przypadku symulacji numerycznej (zamodelowanie obecności bram). Dodatkowo można zauważyć, iż kształty obszarów zastoju mają niekiedy nieco odmienne kształty.



#### 3.1.2 Kierunek północny

Rysunek 8 – Mapa konturowa wartości wektorów prędkości, kierunek północny

Rysunek 9 – Wyniki saltacji, kierunek północny

W tym kierunku napływu zdecydowanie da się zauważyć różnicę w obecności bramy pod budynkiem C1 i C2 (zgodnie z numeracją przyjętą na Rysunek 2). Natomiast za budynkiem L1 i L2 widać na wynikach numerycznych strefę zastoju, jednak brak jej w wynikach saltacji. Inaczej również wykreował się przepływ wzdłuż wschodniej ściany osiedla. Natomiast strefy lokalnego spadku prędkości powodowane spiętrzeniami przy zachodniej ścianie zostały oddane dość wiernie. Dużą zgodność wykazuje również pole przepływu pomiędzy pozostałymi budynkami.

#### 3.2 PORÓWNANIE WEKTORÓW PRĘDKOŚCI I WYNIKÓW METODY OLEJOWEJ

#### 3.2.1 Kierunek zachodni



Rysunek 10 – Wektory prędkości, kierunek zachodni



Rysunek 11 – Metoda olejowa, kierunek zachodni

Układ linii prądu widocznych poprzez pozostawiany pigment w metodzie olejowej dość dobrze pokrywa się z układem wektorów prędkości otrzymanych w wyniku badań numerycznych. w szczególności w obu przypadkach dobrze widać kanał mający swój wlot pomiędzy budynkami G1 i F3 oraz wylot pomiędzy D1 i C4. Dobrze również widać strefę zawirowania przy budynku G.

#### 3.2.2 Kierunek północny



Rysunek 12 – Wektory prędkości, kierunek północny



Rysunek 13 – Metoda olejowa, kierunek północny

#### 3.3 PRZEKRÓJ PIONOWY POLA PRĘDKOŚCI

Nie jest łatwo otrzymać w tunelu aerodynamicznym pole prędkości w innym miejscu, niż przy podłożu. Wymaga to zastosowania dużej ilości czujników, bądź stosowania bardziej skomplikowanych metod. Jednak w przypadku symulacji numerycznej jest to łatwe do wykonania. Poniżej przedstawiono przekroje pionowe, widać obszary zastoju pomiędzy budynkami, a do tego w przypadku przekroju wzdłużnego (wzdłuż osi przepływu płynu) widać także długi cień oddziaływania osiedla na obszar za nim.

conto Veloci	ur-3 ity Magnitude	
	1.86e+01	
	1.67e+01	
	1.49e+01	
	1.30e+01	
	1.11e+01	
	9.29e+00	
	7.43e+00	
	5.57e+00	
	3.72e+00	
	1.86e+00	
[ m/s ]	0.00e+00	

Rysunek 14 – Mapa wartości wektorów prędkości – przekrój pionowy poprzeczny

con Vek	tour-3 ocity Magnitude			
r	1.86e+01			
	1.68e+01			
	1.49e+01			
	1.30e+01			
	1.12e+01			
	9.31e+00			
	7.45e+00			
	5.59e+00			
	3.72e+00			
	1.86e+00			
[ m/	0.00e+00 (s ]			

Rysunek 15 – Mapa wartości wektorów prędkości – przekrój pionowy wzdłużny (kierunek przepływu od prawej do lewej)



3.4 MAPA KONTUROWA CIŚNIENIA STATYCZNEGO

Rysunek 16 – Mapa konturowa ciśnienia statycznego - kierunek zachodni

Mapa konturowa ciśnienia jest dobrym przykładem jednego z podstawowych odczytów które bardzo łatwo otrzymać poprzez badanie numeryczne aerodynamiki budynków, natomiast w przypadku badania w tunelu wymagałoby to użycia dużej ilości mierników. Na mapie konturowej widać wyraźnie punkt spiętrzenia od strony napływającego powietrza oraz lokalne maksimum ciśnienia w miejscu, gdzie napływające powietrze natrafia na budynek w kształcie litery C. Można również zauważyć, że linia budynków najbardziej od strony zawietrznej ma okna wychodzące na przeciwległe strony tak, że pomiędzy nimi tworzy się spory gradient ciśnienia. Tworzy to dogodne warunki do przewietrzania mieszkania.



Rysunek 17 – Mapa konturowa ciśnienia statycznego - kierunek północny

W przypadku kierunku północnego widać mechanizm powstawania dużej prędkości w okolicy bram. Punkt spiętrzenia znajduje się przy kierunku napływu, zaś za pierwszym rzędem budynków jest obszar zastoju. Duży gradient ciśnień pomiędzy tymi obszarami powoduje powstanie dużego wymuszenia w rejonie bramy i dużą prędkość wiatru.





Rysunek 18 – Linie prądu

Ten rodzaj odczytu pozwala na zaobserwowanie co dzieje się z płynem także w kierunku pionowym, jak cząsteczki płynu wirują we wszystkich kierunkach. Można zaobserwować także, że osiedle działa jak ogromny klin rozdzielający powietrze na 2 części. Ciekawe jest również, w jaki sposób kształtują się turbulencje w obszarach zastoju powodując odrywanie cząsteczek powietrza od podłoża ku górze.

#### 4 Wnioski

Na podstawie dokonanego porównania badania aerodynamiki osiedla za pomocą tunelu aerodynamicznego oraz symulacji numerycznej można stwierdzić, iż oba te podejścia mają swoje wady i zalety. Pomiary w tunelu aerodynamicznym dają dużą wierność wyników, są jednak pracochłonne i nie da się w prosty sposób otrzymać innych raportów, niż dotyczących powierzchniowego pola przepływu prędkości.

Natomiast symulacja numeryczna możliwa jest do wykonania bez potrzeby tworzenia modelu fizycznego. Ogranicza to koszty związane z pracą tunelu i materiałami do wykonania modelu. Zdarzają się pewne niedokładności w odwzorowaniu wyników doświadczalnych, jednak ogólne jakościowe tendencje zachodzących procesów są odwzorowane poprawnie. Otwiera się natomiast pole możliwości uzyskiwania skomplikowanych raportów dotyczących różnych parametrów przepływu w całym jego polu.

#### Bibliografia

- Jędrzejewski, M., Pocwierz, M. i Zielonko-Jung, K. (2017) "The problem of airflow around building clusters in different configurations", *Archive of Mechanical Engineering*, 64(3), ss. 401–418. doi: 10.1515/meceng-2017-0024.
- [2] Tominaga, Y. i *in.* (2008) "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), ss. 1749–1761. doi: 10.1016/j.jweia.2008.02.058.

#### Wykaz rysunków

ļ
j
,
,
'
;
;
;
;
)
)
)
)
)
ĺ
)
2
,

## Numeryczne badanie efektywności mechanicznej turbulizacji przepływu w kolektorze słonecznym

Piotr Błach

Opiekun naukowy: dr inż. Karol Pietrak

#### Słowa klucz. wymiana ciepła, turbulizacja, Ansys Fluent

**Streszczenie** W artykule poruszona jest kwestia intensyfikacji wymiany ciepła na powierzchni absorbera kolektora słonecznego przy użyciu turbulizatorów mechanicznych. Turbulizatory badane w tym artykule są w kształcie litery "L" z dodatkowym daszkiem. Badane jest 6 przypadków: pierwszy jest referencyjny w pozostałych zmieniany jest jeden z wymiarów turbulizatora.

#### 1. Wstęp 1.1. Kolektory słoneczne

Jednym z ważniejszych kierunków rozwoju energetyki jest poprawa efektywności przeprowadzanych procesów. Wprowadzane nowe restrykcje dotyczące emisji zanieczyszczeń wymuszają stosowanie odnawialnych źródeł energii (OZE), które są zeroemisyjne. Kopalne źródła energii mają także swoje limitowane zasoby, które w najbliższych latach będą się wyczerpywać. Obecnie największą uwagę poświęca się OZE, które uznaje się za przyszłościowe, powstają coraz to nowe materiały, technologie, które polepszają sprawność. Badacze na całym świecie skupiają się na tym, aby OZE były jeszcze bardziej efektywne i konkurencyjne dla konwencjonalnych źródeł energii. Jednym z takich źródeł jest energia promieniowania słonecznego. Wykorzystywana jest ona albo jako źródło ciepła albo konwertowana na energię elektryczną. W tej pracy skupimy się na powietrznych kolektorach słonecznych. Jednym z argumentów za pozyskiwaniem ciepła z kolektorów słonecznych jest niski koszt produkcji, co jest znaczące w krajach rozwijających się, w których dodatkowo występuje duże nasłonecznienie. Dodatkowo ze względu na prostą budową nie wymagają one częstych napraw[1]. Oprócz wykorzystania jako źródło ciepła w domu wykorzystywane są również w przemyśle jako ciepło przemysłowe lub do utwardzania przemysłowego[2].



Rysunek 1 Schemat kolektora słonecznego

Opisując w skrócie zasadę działania kolektora można napisać, że: Słońce ogrzewa absorber, który umieszczony jest w kolektorze, tam energia słoneczna zamieniana jest na ciepło, które następnie oddawane jest czynnikowi grzewczemu (wodzie, powietrzu) co powoduje wzrost temperatury tego czynnika.

#### 1.2. Obliczenia numeryczne mechaniki płynów (CFD)

Jednym z najważniejszych dostępnych obecnie narzędzi inżynierskich są programy do symulacji komputerowych. Udostępniają one szeroką gamę możliwości od analiz wytrzymałościowych do symulacji przepływów oraz wymiany ciepła. Przy odpowiednim przygotowaniu symulacji (dobór siatki, warunków obliczeniowych i modeli) dokładność tych symulacji sprawia, że wyniki generowane z zastosowaniem metod numerycznych są dobrym odzwierciedleniem rzeczywistości. W nauce opracowano wzory pozwalające wykonywać obliczenia dla kolektorów ze sztuczną chropowatością[3]. Dzięki symulacjom komputerowym jesteśmy w stanie zaobserwować, jak wygląda przepływ, w których miejscach następuje turbulizacja[4]. Są to sytuacje, których nie jesteśmy w stanie zaobserwować stosując wzory analityczne. Jedyną alternatywą jest konstrukcja fizycznego stanowiska i przeprowadzenie rzeczywistych badań[5]. Obliczenia CFD obecnie pozwalają w szybki sposób sprawdzić wiele wariantów związanych z kształtem, parametrami termodynamicznymi[6].

# Podłoże teoretyczne 2.1. Wymiana ciepła w absorberach

Absorber jest najważniejszym elementem kolektora słonecznego. To on zapewnia zamianę energii słonecznej na ciepło. Sam absorber wykonywany jest z aluminium lub miedzi. To co jest ważniejsze to powłoka, którą jest pokrywany. Powłoka ta musi pochłaniać jak największą ilość energii słonecznej, aby zminimalizować straty. Obecnie wykorzystywane są powłoki z[7]:

- czarnego niklu
- czarnego chromu
- czarnej miedzi
- napylanej powłoki wysokoselektywnej z tlenku tytanu

Jak widać bardzo ważnym elementem jest skuteczność przejmowania ciepła przez tą powierzchnię.

#### 2.2. Równania opisujące wymianę ciepła

Podstawowym równaniem opisującym wymianę ciepła jest równanie Hottel-Whillier-Bliss'a[8]:

$$Q_u = A_c [I(\tau \alpha)_e - U_L(T_i - T_a)]$$
<sup>(1)</sup>

gdzie:

- Q<sub>u</sub> strumień energii użytecznej [W];
- $A_c$  powierzchnia adsorpcyjna kolektora [m<sup>2</sup>];
- I całkowite natężenie promieniowania słonecznego  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ ;
- $\tau \alpha$  współczynnik transmisyjno-adsorpcyjny;
- $U_L$  współczynnik przejmowania ciepła  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ ;

A T<sub>i</sub> oraz T<sub>a</sub> to temperatury włotowa czynnika grzewczego oraz temperatura otoczenia. Sprawność takiego układu określana jest wzorem:

 $\eta = \frac{Q_u}{A_c I}$ 



Rysunek 2 Strumienie cieplne w kolektorze

#### 2.3. Metody numeryczne w wymianie ciepła oraz przepływie płynu

Metody numeryczne to metody służące do aproksymacji rozwiązań, których obliczenie poprzez proste równania nie jest możliwe. Otrzymane wyniki są przybliżone do rzeczywistych, dokładność tych wyników jest z góry określona co pozwala na jej dobranie w zależności od potrzeb, a wyniki można traktować jak rzeczywiste. Składnikami metody numerycznej są[9]:

- model matematyczny;
- metoda dyskretyzacji;
- siatka obliczeniowa;
- skończona aproksymacja;
- metoda rozwiązania;
- kryterium zbieżności.

(2)

#### 2.4. Metoda objętości skończonych

Jest to jedna z metod numerycznych wykorzystywana do rozwiązywania układów równań różniczkowych[10]. Metoda objętości skończonych wykorzystuje całkową wersję równania ciągłości jako punkt początkowy:

$$\int_{S} \rho \Phi \cdot n ds = \int_{S} \Gamma \nabla \Phi \cdot n ds + \int_{\Omega} q_{\Phi} d\Omega$$
(3)

Metoda objętości skończonych jest jedną z metod dyskretyzacji wykorzystywaną w programie Ansys Fluent. Jest to metoda wykorzystująca siatkę, która aproksymuje kształt obiektu. Wokół danego węzła budowany jest obszar kontrolny. W obszarze tym wymagane jest spełnienie warunku opisanego przez równanie różniczkowe. Warunek ten nie musi być spełniony dla całej objętości obiektu.

#### 2.5. Turbulizacja przepływu

Ruch turbulentny płynu przejawia się w występowaniu wirów i innych struktur koherentnych, zjawisku oderwania strugi, zjawisku mieszania. Wg. sformułowanego w 1937 roku kreślenia Taylora i von Kármána przepływ turbulentny charakteryzuje się: nieregularnym i nieuporządkowanym ruchem cząstek płynu[11]. Przepływy turbulentne charakteryzują się fluktuującymi polami prędkości, czyli wektor prędkości zmienia swój kierunek i zwrot w sposób nie dający się przewidzieć.



Rysunek 3 Sygnał pomiaru prędkości (w kierunku przepływu) dla przepływu turbulentnego

Modele turbulencji mogą zostać sklasyfikowane. W programie Ansys Fluent dostępne są następujące modele: Spalart-Allmaras, Standard, RNG, Standard , Reynolds Stress Model.

#### 2.6. Współczynnik y+

W analizie numerycznej dokładność wyników zależy od wybranego modelu turbulencji, sposobu określania warstwy przyściennej[12]. W mechanice płynów "prawo ściany" określa, że średnia prędkość przepływu turbulentnego w określonym punkcie jest proporcjonalna do logarytmu odległości tego punktu do ściany albo do granicy regionu płynu. Współczynnik y+ jest bezwymiarowy, określa on czy uderzenia w komórkach sąsiadujących ze ścianą są turbulentne czy laminarne, dzięki czemu wskazują część turbulentnej warstwy przyściennej, którą rozwiązują. Określany jest on przez wzór:

$$\mathbf{y}^{+} = \frac{u_{\tau} \times \mathbf{y}}{v} \tag{4}$$

 $y^+$  jest współrzędną ściany: y to odległość od ściany, która zmieniana jest na bezwymiarową poprzez wprowadzenie prędkości tarcia  $u_{\tau}$  oraz lepkości kinematycznej v. Poniższa tabela prezentuje dozwolone wartości współczynnika y+ dla określonych modeli obliczeniowych.

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

Model	y+
Spalart Allmaras	y+=1 dla bardzo dobrej siatki; y+≥30
Standard wall function k-ε	$30 \le y^+ \le 300$
Scalable wall finction k-ε	$1 \le y^+ \le 30$
Standard k-ω	$y^+ \leq 1$
SST k-ω	$y^+ \leq 1$

Tabela 1 Wartości współczynników y+ dla różnych modeli[13]

Współczynnik y+ jest zależny od geometrii, typu płynu i prędkości.

#### 3. Problem badawczy

Rozważanym tu aspektem będzie wartość liczby Nusselta na powierzchni absorbera w zależności od zastosowanego elementu turbulizującego przepływ. Liczba Nusselta zostanie przedstawiona na wykresie w zależności od miejsca na absorberze oraz przedstawiona zostanie średnia wartość na powierzchni absorbera. Pokazane zostanie 6 przypadków: pierwszy tzw. referencyjny, kiedy to w układzie nie ma umieszczonej żadnej przegrody. W pozostałych przypadkach stworzona została geometria w kształcie litery L z dodatkowym daszkiem, w każdym przypadku zmieniany zostawał jeden z parametrów geometrycznych.

#### 4. Metody 4.1. Geometria

We wszystkich przypadkach modelowany był kolektor słoneczny o następujących wymiarach:

- Wysokość (V317): 20 mm;
- Długość (H313): 461 mm;
- Odległość od początku do powierzchni absorbera (H315): 225 mm;
- Długość absorbera (H316): 121 mm;



Rysunek 4 Wymiary kolektora słonecznego

We wszystkich przypadkach turbulizatory zostały rozmieszone w takiej samej odległości.

Piotr Błach



Rysunek 5 Rozmieszczenie turbulizatorów



Rysunek 6 Odległość pomiędzy turbulizatorami

Wymiary elementów turbulizujących prezentują się następująco:

- O Przypadek 1
- Wymiar V9: 0,5 mm,
- Wymiar V8: 0,5 mm, .
- Wymiar V10: 0,5 mm, Wymiar V20: 1,75 mm, •
- ٠
- Wymiar H23: 1,5 mm,
- Wymiar H21: 0,5 mm.



Rysunek 7 Wymiary turbulizatora przypadku pierwszego

#### o Przypadek 2

Wszystkie wymiary takie same oprócz wymiaru zaznaczonego na czerwono na rysunku.

• Wymiar V20: 2,25 mm.



Rysunek 8 Wymiary turbulizatora przypadku drugiego

• Przypadek 3 Wszystkie wymiary takie same oprócz wymiaru zaznaczonego na czerwono na rysunku.

• Wymiar V8: 1 mm.





Rysunek 9 Wymiary turbulizatora przypadku trzeciego

Przypadek 4
 Wszystkie wymiary takie same oprócz wymiaru zaznaczonego na czerwono na rysunku.

Wymiar H23: 2 mm. •



Rysunek 10 Wymiary turbulizatora przypadku czwartego

• Przypadek 5

Wszystkie wymiary takie same oprócz wymiaru zaznaczonego na czerwono na rysunku.

• Wymiar V10: 1 mm.



Rysunek 11 Wymiary turbulizatora przypadku piątego

#### 4.2. Siatka obliczeniowa

Siatka obliczeniowa została wykonana w programie Ansys Mesh. Całą siatkę pokazuje rysunek 12. Siatkę w otoczeniu turbulizatora pokazuje rysunek 13.



Rysunek 12 Siatka obliczeniowa – cała





Rysunek 13 Siatka obliczeniowa – w pobliżu turbulizatora

Poniższa tabela przedstawia parametry dotyczące ilości elementów siatki obliczeniowej oraz jakości.

	REF	1	2	3	4	5
Liczba elementów	144698	149656	149402	149211	149702	149737
Max Skeweness	0,63	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
Average Skeweness	0,00924	0,0127	0,0122	0,0116	0,0138	0,0115
Min. Orthogonal quality	0,58	0,18	0,0659	0,11	0,0472	0,0298
Average Orhogonal quality	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Max Aspect ratio	7,85	13,78	39,01	23,23	54,73	15,75
Average y+	0,47	0,17	0,17	0,16	0,17	0,18

Tabela 2 Parametry siatki obliczeniowej

Średnia wartość współczynnika y+ została obliczona na podstawie średniej arytmetycznej z danych otrzymanych w programie Ansys Fluent. W obliczeniach wykorzystany został model  $k - \omega SST$ , dla którego wartość współczynnika y+ musi być poniżej 1, co w tym przypadku jest spełnione. Mimo, że skrajne parametry siatki wskazują, że siatka obliczeniowa jest wykonana błędnie, to w fazie obliczeń otrzymane zostały zbieżności na poziomie  $10^{-10}$ , na tej podstawie siatka obliczeniowa pozostała bez zmian. Elementy, które wskazywane są jako niedokładne znajdują się w miejscach, które nie mają wpływu na obliczenia.

#### 4.3. Warunki brzegowe

Wartości zadane dla wszystkich obliczeń zostały przyjęte takie same.

- Prędkość wlotowa 12<sup>*m*</sup>/<sub>*s*</sub>;
- Natężenie promieniowania na absorber 1000 <sup>W</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub>;
- Czynnikiem grzewczym było powietrze;
- Absorber wykonany jest z aluminium.

Poniższa tabela prezentuje wartości współczynników wykorzystane do obliczeń.

Tabela 3 Wartości współczynników[14]

W /1 '1	D	A1
wspołczynnik	Powietrze	Aluminium
Ciepło właściwe	1006,43	871
$\left[C_p\right] = \left[\frac{J}{kgK}\right]$		
Przewodność cieplna	0,0242	202,4
$[k] = \left[\frac{W}{mK}\right]$		
Gęstość	1,225	2719
$[\rho] = \left[\frac{kg}{m^3}\right]$		
Lepkość	1,7894E05	-
$[\mu] = \left[\frac{N}{m^2}\right]$		

#### 4.4. Metody rozwiązania[15]

Do obliczenia wykorzystany został model  $k - \omega$  (SST). Jest to model, który łączy zalety modelu  $k - \omega$ i  $k - \epsilon$  oraz wprowadza dodatkowy człon ograniczający

nadprodukcję energii kinetycznej turbulencji w obszarach silnych dodatnich gradientów ciśnienia. Model  $k - \omega$  SST można otrzymać transformując model  $k - \epsilon$ .  $\omega$  to właściwa dyssypacja energii kinetycznej turbulencji, a k to energia kinetyczna turbulencji,  $\omega = \frac{\epsilon}{k}$ . Następnie równania mnożone są przez funkcję (a dokładniej  $1 - F_1$ ), która ma wartość 1 na brzegu i 0 wewnątrz przepływu. Dodatkowo opracowany został człon limitujący wartości naprężeń głównych przepływu. Stąd w nazwie SST – Shear Stress transport.

Do obliczeń wykorzystane zostały równania:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \left( (\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\mu}_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \right)$$
(5)

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \widehat{G_k} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$
(7)

$$\frac{\partial\rho\omega}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu}\widehat{G_k} - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right) + 2\rho(1 - F_1)\sigma_{\omega^2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}$$
(8)

Gdzie  $\widehat{G_k}$  to:

$$\widehat{G_k} = \min\left(\mu_t S^2, 10\rho\beta^*k\omega\right) \tag{9}$$

Nazwijmy przez  $\Phi_1$  dowolną stałą oryginalnego modelu (np.  $\sigma_{k1}$ ) oraz przez  $\Phi_2$  dowolną stałą przetransformowanego modelu  $k - \epsilon$ . Wówczas każda stała w końcowym modelu  $\Phi$  wyraża się przez

$$\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \tag{10}$$

W modelu występują następujące zestawy danych:

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \alpha_1 = 0.556, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41, \gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1}\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$
  
$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.075, \alpha_2 = 0.556, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41, \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2}\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

Funkcja  $F_1$  wyrażona jest w następujący sposób:

$$F_1 = \tanh\left(\arg_1^4\right) = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500}{\omega y^2}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right)$$
(11)

$$CD_{k\omega} = max \left( 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right)$$
(12)

Lepkość turbulentna określana jest ze wzoru:

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \tag{13}$$

$$F_2 = tanh \left(arg_2^2\right) \tag{14}$$

$$arg_2 = max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500}{y^2\omega}\right)$$
 (15)

$$\mu_t = \rho v_t \tag{16}$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{17}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right)$$
(18)

Obliczenia zostały wykonane w stanie ustalonym przy użyciu metody objętości skończonych. Wykorzystano solver coupled równaniami drugiego rzędu. We wszystkich przypadkach zbieżność była w zakresie od  $10^{-10}$  do  $10^{-18}$ .

#### 5. Wyniki 5.1. Liczba Nusselta na powierzchni absorbera

Uśrednione wartości liczby Nusselta prezentuje poniższa tabela. Średnia wyliczona została na podstawie średniej arytmetycznej liczb Nusselta na powierzchni absorbera otrzymanych z programu Ansys Fluent.

Przypadek	Wartość
Referencyjny	29,9
Pierwszy	21,1
Drugi	22,38
Trzeci	20,44
Czwarty	21,2
Piąty	21,84

Tabela 4 Wartości	i liczby Nusselto
-------------------	-------------------



10 0 0,22 0,24 0,26 0,28 0,3 0,32 0,34 0,36 Długość absorbera [m]

Rysunek 14 Wartości liczby Nusselta



Rysunek 15 Współczynnik y+ przypadek referencyjny



Rysunek 16 Współczynnik y+ przypadek 1



Rysunek 17 Współczynnik y+ przypadek 2

NSYS 2019 R2



0.2400 0.2600 0.2800 0.3000 0.3200 0.3400 Position (m)



0.0000

0.2200

0.3600



Rysunek 20 Współczynnik y+ przypadek 5

#### 5.3. Energia kinetyczna turbulencji



Rysunek 21 Energia kinetyczna turbulencji przypadek referencyjny

Numeryczne badanie efektywności mechanicznej turbulizacji przepływu w kolektorze słonecznym











Rysunek 24 Energia kinetyczna turbulencji przypadek 3

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

Piotr Błach









Rysunek 26 Energia kinetyczna turbulencji przypadek 5

#### 5.4. Prędkość przepływu



Rysunek 27 Prędkość przepływu przypadek referencyjny





Rysunek 28 Prędkość przepływu turbulencji przypadek 1



Rysunek 31 Prędkość przepływu turbulencji przypadek 4

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

- 1.66e+00 0.00e+00 [ m/s ]



Rysunek 32 Prędkość przepływu turbulencji przypadek 5

#### 6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzanych obliczeń można stwierdzić, że zastosowany układ turbulizatorów nie poprawia wymiany ciepła na całej powierzchni absorbera. Wykres przedstawiający zależność liczby Nusselta od powierzchni absorbera wskazuje, że wszystkie przypadki w odniesieniu do przypadku referencyjnego osiągają miejscami wyższe wartości, jednak później następuję znaczny spadek (miejscami nawet trzykrotny). Patrząc na uśrednione wartości można zauważyć, że w przypadku referencyjnym jest to 29,9, a pozostałe przypadki to okolicy 21-22, jest to znacząca różnica. Powodem takich wyników może być zbyt rzadkie rozmieszczenie turbulizatorów na powierzchni absorbera, co można wnioskować na podstawie publikacji Experimental and CFD investigation of convection heat transfer in solar air heater with reverse L-shaped ribs[4]. Jednak w tamtej publikacji geometria była mniejsza, co również mogło mieć ostateczny wpływ na takie wyniki. Problemem może być także daszek, który został wprowadzony poniżej kształtu "L". Ważnym spostrzeżeniem jest to, że w przypadku 2, który osiągnął najlepszy rezultat zmieniana była długość kształtu "L", jest to podstawa do dalszych analiz zmiany długości dla tego wymiaru. We wszystkich przypadkach współczynnik y+ znajdował się w graniach wymaganych w danym modelu obliczeniowym. Podsumowując warto dodać, że zarówno rozmiary jak i prędkość czynnika w kolektorze nie są tożsame z rzeczywistością. Wykonanie wszystkich modeli, wraz z referencyjnym stanowi jednak podstawę do analizowania w jakim stopniu zmieniły się dane współczynniki w odniesieniu do przypadku referencyjnego.

#### 7. Bibliografia

- A. S. Yadav and J. L. Bhagoria, "A CFD (computational fluid dynamics) based heat transfer and fluid flow analysis of a solar air heater provided with circular transverse wire rib roughness on the absorber plate," *Energy*, vol. 55, pp. 1127–1142, Jun. 2013.
- [2] Nowak W., Stachel A., "Kolektory słoneczne i panele fotowoltaiczne jako źródło energii w małych instalacjach cieplnych i elektroenergetycznych," *Energ. Odnawialna*, no. 4, pp. 55–65, 2010.
- [3] V. Hans, R. P. Saini, and J. S. Saini, "Performance of artificially roughened solar air heaters—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 1854–1869, Oct. 2009.
- [4] V. B. Gawande, A. S. Dhoble, D. B. Zodpe, and S. Chamoli, "Experimental and CFD investigation of convection heat transfer in solar air heater with reverse L-shaped ribs," *Sol. Energy*, vol. 131, pp. 275– 295, 2016.
- [5] D. A. Yadav and M. Thapak, "Artificially roughened solar air heater: Experimental investigations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 370–411, Aug. 2014.
- [6] R. Karwa, "EXPERIMENTAL STUDIES OF AUGMENTED HEAT TRANSFER AND FRICTION IN ASYMMETRICALLY HEATED RECTANGULAR DUCTS WITH RIBS ON THE HEATED WALL IN TRANSVERSE, INCLINED, V-CONTINUOUS AND V-DISCRETE PATTERN," Int. Commun. Heat Mass Transf., vol. 30, no. 2, pp. 241–250, Mar. 2003.
- [7] K. Kamiński, "Charakterystyka cech eksploatacyjnych kolektorów płaskich cieczowych wykorzystywanych w ciśnieniowych instalacjach myjących," pp. 216–227.
- [8] John A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley, 2013.
- [9] H. Gunes, "Numerical Methods in Fluid Flow and Heat Transfer The Scientific Method and Mathematical Modeling."
- [10] S. Z. Camacho, "Numerical methods in heat transfer and fluid dynamics," no. September, 2017.
- [11] J. Sodja and R. Podgornik, "Turbulence models in CFD," Univ. Ljubljana, 2007.
- [12] S. M. Salim, M. Ariff, and S. C. Cheah, "Wall approach for dealing with turbulent flows over a wall mounted cube," *Prog. Comput. Fluid Dyn. An Int. J.*, vol. 10, no. 5/6, p. 341, 2010.
- [13] E. Atiba, "NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW IN A SOLAR AIR HEATER WITH NON-UNIFORMLY SPACED ARTIFICIAL ROUGHNESS ON THE ABSORBER PLATE SURFACE," no. 302557, 2019.
- [14] Wiesław Gogół, "Wymiana ciepła tablice i wykresy." .
- B. Górecki, "Instrukcja 8 Model turbulencji k- ω SST." Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska.

# Numeryczne badanie efektywności akustycznej turbulizacji przepływu w kolektorze słonecznym

#### Fabian Dietrich

Opiekun naukowy: dr inż. Karol Pietrak

Słowa klucz. Kolektor, wymiana ciepła, fale akustyczne, turbulizacja

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono rezultaty obliczeń numerycznych mechaniki płynów mających na celu zbadanie wpływu fal dźwiękowych na wymianę ciepła. Obiektem badanym jest kolektor słoneczny, a dźwięk wytwarzany jest bez użycia dodatkowych urządzeń, w komorze rezonansowej. Zbadano wpływ wielkości komory oraz jej położenia względem wymiennika na rozkład i wartości współczynnika przejmowania ciepła.

#### Oznaczenia

 $\begin{array}{l} a -prędkość dźwięku, m/s\\ E - energia, J,\\ F - siła, N,\\ I - tensor jednostkowy, -,\\ k - energia kinetyczna turbulencji, J/kg,\\ l -wymiar charakterystyczny, m,\\ p - ciśnienie, kPa,\\ S_m -masa w fazie rozproszonej, kg,\\ t -czas, s,\\ T - temperatura, K,\\ u - prędkość elementów powierzchni normalnie d opowierzchni, m/s,\\ \mu - lepkość dynamiczna, Pa·s,\\ \rho - gęstość, kg/m3,\\ \tau - naprężenie styczne, kPa, \end{array}$ 

#### 1. Wstęp

Postępujący rozwój cywilizacji nieodwracalnie wiąże się z wzrostem zapotrzebowania na energię. Wraz z rosnącą świadomością wpływu konwencjonalnych jej źródeł na środowisko, generuje to konieczność poszukiwania nowych technologii i metod zwiększania efektywności istniejących. Największą uwagą obecnie cieszą się źródła odnawialne, które pomimo oczywistych korzyści nie są jednak pozbawione wad. Podstawowymi problemami większości rozwiązań odnawialnych są niska sprawność konwersji energii oraz zależność produkcji od warunków zewnętrznych. Nad rozwiązaniem drugiego z nich pracują specjaliści w zakresie magazynowania energii, pierwszy wymaga pracy u źródeł.

Szeroko pojęta energetyka solarna jest prawdopodobnie najbardziej rozpowszechnionym wariantem energetyki odnawialnej. Czy to w formie instalacji fotowoltaicznych, dostarczających energię elektryczną, czy też różnorodnych typów kolektorów solarnych, pozwalających korzystać z energii Słońca do ogrzewania. W systemach tego typu używa się energii dostarczonej w postaci promieniowania do podniesienia temperatury

czynnika. Do zalet tej metody należą między innymi prostota konstrukcji kolektorów solarnych oraz szeroka paleta dostępnych czynników, zwiększająca zakres możliwych zastosowań. Można stosować czynniki zarówno w stanie ciekłym (powszechne choćby w domowych instalacjach do podgrzewu ciepłej wody użytkowej), jak i gazowym – kolektory powietrzne stosowane są w instalacjach suszarniczych.

Jedną z metod poprawy efektywności kolektorów solarnych typu powietrznego jest poprawa wymiany ciepła na drodze absorber – czynnik. Można to osiągnąć np. zwiększając współczynnik przejmowania ciepła po stronie czynnika poprzez zwiększenie turbulentności przepływu. Celem tej pracy jest zbadanie efektywności turbulizatora akustycznego, działającego na zasadzie gwizdka (patrz rys. 1).



Rysunek 19 Zasada działania gwizdka

#### 2. Analityczne podstawy symulacji

Obliczenia wykonywane są za pomocą programu ANSYS Fluent 19.2. Program ten wykorzystuje metodę objętości skończonych do rozwiązania równań opisujących ruch płynu ściśliwego: równania ciągłości, zmiany pędu oraz energii.

a) Równanie ciągłości

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \, \boldsymbol{v}) = S_m \tag{1}$$

b) Równanie zmiany pędu

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{v}) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} \boldsymbol{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F}$$
(2)

Gdzie

$$\tau = \mu \left[ (\nabla \boldsymbol{\nu} + \nabla \boldsymbol{\nu}^{\mathrm{T}}) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \boldsymbol{\nu} \mathbf{l} \right]$$
<sup>(3)</sup>

c) Równanie energii całkowitej

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(\boldsymbol{\nu}(\rho E + p)\right) = \nabla \cdot \left(k_{eff}\nabla T - \sum_{j}h_{j}\boldsymbol{J}_{j} + \left(\tau_{eff}\cdot\boldsymbol{\nu}\right)\right) + S_{h}$$
(4)

Wykorzystano model k-omega SST, ze względu na połączenie cech pozytywnych modelu k-omega (dobre modelowanie warstwy przyściennej) i k-epsilon (stabilność obliczeń w strumieniu niezaburzonym). Eksperymentalnie zostało również wykazane, iż pozwala on również na dokładniejsze odwzorowanie

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

rzeczywistości przy późniejszym modelowaniu fal akustycznych. Do tego celu zastosowany został moduł Acoustics programu Ansys Fluent pozwalający na śledzenie powstawania fal akustycznych oraz wartości ich określających. Wykorzystano model Broadband Noise Sources, który określa moc akustyczną generowaną przez turbulencje w przepływie w zależności od ich intensywności:

$$P_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l}\right) \frac{u^5}{a_0^5} \tag{5}$$

#### 3. Model i przebieg symulacji

Na potrzeby symulacji wykonano domenę obliczeniową 2-D w postaci prostokątnego kanału (Rys.2). Reprezentuje on kanał powietrzny pod absorberem kolektora, sam absorber został odwzorowany jako środkowa część górnej ściany kanału. Odcinki przed i za absorberem służą ustabilizowaniu przepływu. Założono warunki brzegowe w postaci prędkości i temperatury na włocie do kanału oraz strumienia cieplnego na powierzchni absorbera. Rezultaty symulacji posłużyły jako wartość referencyjna dla dalszych badań. Jako kryterium porównawcze ustalono liczbę Nusselta, będącą stosunkiem szybkości wymiany ciepła na drodze przewodzenia. Zwiększenie tego parametru oznacza poprawę konwekcji, co świadczy o skuteczności działania turbulizatora.

#### Warunki brzegowe:

- Prędkość wlotowa 12 m/li>
- Temperatura powietrza na włocie 300K
- Gęstość strumienia ciepła na płycie absorbera 1000 <sup>W</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub>



Rysunek 2 Geometria referencyjna

WYMIAR	WARTOŚĆ [mm]
H1	461
Н3	225
H4	121
V2	20

Tabela 1 Wymiary geometrii z rysunku 2

Kolejnym krokiem było stworzenie geometrii turbulizatora, maksymalizującej generację fal akustycznych w wyniku przepływu. Po kilku symulacjach pomocniczych otrzymano geometrię jak na rys.3. Odległość od absorbera ustalono iteracyjnie, na podstawie obserwacji położenia pola turbulencji i wartości liczby Nusselta (patrz rys. 4 i 5).



Rysunek 3 Geometria po dodaniu turbulizatora

WYMIAR	WARTOŚĆ [mm]
Н5	461
H7	225
H8	121
H1	212
L6	202
L12	20
L13	7
V4	20
H9	3
V11	10

Tabela 2 Wymiary geometrii z rysunku 3



Rysunek 4 Wykres liczby Nusselta na powierzchni absorbera



Rysunek 5 Kontur energii kinetycznej turbulencji

Wyniki symulacji przy turbulizatorze ustawionym w optymalnym położeniu stały się zbiorem wartości referencyjnych dla finalnej serii, w której manipulowano rozmiarem komory rezonansowej. Celem tego badania było sprawdzenie wpływu tego parametru na intensywność turbulencji, a co za tym idzie generację fal



akustycznych. Wyniki przedstawiono na poniższych rysunkach. Zmiana rozmiaru komory realizowana była modyfikacją parametru L6, w interwałach co 5mm (patrz tab. 3)

Rysunek 6 Wykres liczby Nusselta na powierzchni absorbera

Lp.	NAZWA	L6 [mm]
1	FLU 4	202
2	FLU 5	197
3	FLU 6	192
4	FLU 7	187

Tabela 3 Zmiany parametru L6 w kolejnych przypadkach



Rysunek 7 Kontur energii kinetycznej turbulencji



Rysunek 8 Kontur generowanej mocy akustycznej

Siatka obliczeniowa w każdym z przypadków była dostosowana do modelu obliczeń, tj. parametr y $^+$  utrzymany był w przedziale y $^+ \le 1$ .

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

#### 4. Obserwacje i wnioski

W prezentowanym przypadku dodanie turbulizatora spowodowało znaczny wzrost liczby Nusselta dzięki intensywnej turbulizacji przepływu pod absorberem. Można jednocześnie zauważyć, iż umiejscowienie pola turbulencji ma duży wpływ na uzyskany efekt. Zwiększanie komory rezonansowej przyczyniło się do spadku intensywności turbulencji, a co za tym idzie zmniejszeniem poziomu generowanego dźwięku oraz pogorszenia konwekcji w rozważanym obszarze.

Przedstawiona geometria powoduje znaczne oscylacje przepływu, które intensyfikują wymianę ciepła dzięki poprawie konwekcji. Efektem ubocznym jest powstawanie dźwięku. Przy założonej metodyce badania nie udało się oddzielić wpływu fal akustycznych od wpływu oscylacji mechanicznych. Wyłączenie modułu Acoustics w celu pominięcia wpływu fal dźwiękowych a tym samym wyizolowania ich wpływu na wymianę ciepła nie przyniosło zamierzonego efektu, ponieważ program Fluent oblicza generację dźwięku jako wtórny efekt turbulencji mechanicznych. Efektem badania jest zatem stworzenie efektywnego turbulizatora oraz wyniki stanowiące bazę pod dalsze badania, mające na celu rozdzielenie wpływu zastosowanych metod.

#### Bibliografia

[1] F. Zink, J. Vipperman, and L. Schaefer, "CFD simulation of thermoacoustic cooling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2010.

[2] A. S. Yadav and J. L. Bhagoria, "Heat transfer and fluid flow analysis of solar air heater: A review of CFD approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013.

[3] B. A. Tuna and D. Rockwell, "Self-sustained oscillations of shallow flow past sequential cavities," *J. Fluid Mech.*, 2014.

[4] S. Rulik, W. Wróblewski, G. Nowak, and J. Szwedowicz, "Heat transfer intensification using acoustic waves in a cavity," *Energy*, 2015.

[5] J. G. Leishman, "Subsonic unsteady aerodynamics caused by gusts using the indicial method," *J. Aircr.*, 1996.

[6] M. A. Kegerise, E. F. Spina, and L. N. Cattafesta, "An experimental investigation of flow-induced cavity oscillations," in *30th Fluid Dynamics Conference*, 1999.

[7] M. A. Gómez, D. Patiño, R. Comesaña, J. Porteiro, M. A. Álvarez Feijoo, and J. L. Míguez, "CFD simulation of a solar radiation absorber," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2013.

[8] S. Dykas, W. Wróblewski, S. Rulik, and T. Chmielniak, "Numerical method for modeling of acoustic waves propagation," *Arch. Acoust.*, 2010.

## HPWR, COMPARISON OF CHINESE REACTORS WITH OTHER TECHNOLOGIES

Igor Niewiadomski

Opiekun naukowy: Aleksej Kaszko (NCBJ)

#### ABSTRACT

Currently there are many different Nuclear Power Plant designs. HPR1000 developed by the China National Nuclear Corporation is one of such technology. Is not common and there are not many information about it. On the other hand one of the most popular and widely used design is PWR (Pressurized Water Reactor). The main goal of this paper is to compare and present the advantages and disadvantages of both of them and give not expert opinion.

#### **1. INTRODUCTION**

Generation of nuclear energy for electricity began in the late 1950s and went over the following half century. Currently, nuclear energy give 11% of the world's electricity, with 435 power reactors in 31 countries. The designs of nuclear power plants (NPPs) are classified by "generation." It started by the prototype reactors of Generation-I and the commercial reactors of Generation-II. After that it was time for Generation-III light water reactors (LWRs) improvement in the areas of fuel technology, thermal efficiency, and safety systems. The accepted criteria for Generation-III LWRs are contained in two documents: the Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document (URD) issued by the US Electric

Power Research Institute (EPRI), and the European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants (EUR) issued by a cooperative organization of European utilities.

#### 2. PWR

Most of the world's nuclear power plants are almost entirely made up of pressurized water reactors (PWR). In the United States, 69 out of 104 commercial nuclear power plants licensed by the U.S Nuclear Regulatory Commission are PWR's.In an archetypal design of a PWR, as represented in Fig. 1, heat is created inside the core of the reactor. High-pressurized water is pumped to the core where it is further heated by the energy produced by the fission of atoms. The pressurized water in a primary coolant loop, then carries this thermal energy to the steam generator. Heat carried from the primary coolant loop vaporizes water from a secondary loop, producing steam



(within the steam generator). This stem is pushed to the main turbine generator, and powering it and further creating electricity. Any unused steam is condensed into water and pumped out of the condenser, reheated and then pumped back into the steam generator where the cycle begins again.

#### 2.1 EPR

The EPR is a III generation pressurised water reactor design. It has been designed and developed mainly by Framatome (part of Areva between 2001 and 2017) and Électricité de France (EDF) in France, and Siemens in Germany. In Europe this reactor design was called European Pressurised Reactor, and the internationalised name was Evolutionary Power Reactor, but it is now simply named EPR.

#### 2.2 EPR DESIGN PHILOSOPHY

The EPR design philosophy is governed by three essential targets: Improved safety level as compared to existing plants is due to deterministic and probabilistic considerations, mitigation of hypothetical severe accidents by restricting their consequences to the plant itself, plus competitive power generation costs.

#### 2.3 TECHNICAL FEATURES OF EPR

A twofold strategy is pursued for the EPR safety requirements: First, to improve the preventive measures against accidents, and second, - although the severe accident frequency has been further reduced by deterministic design criteria and verified by probabilistic assessments of the design choices – to mitigate severe accidents consequences.

These safety requirements are implemented by designing the plant on a strong deterministic basis and, beyond this basis, by consideration of risk reduction measures (Fig 1)



Fig. 1. Main Safety Features

The EPR provides particularly effective physical protection against external hazards.

- To withstand an airplane crash (APC), the Reactor Building, control room, Spent Fuel Building and two of the four Safeguard Buildings (2 and 3) are protected by an outer shell made of reinforced concrete, thick enough to withstand the high-speed impact of a military aircraft and also a commercial aircraft. The other two Safeguard Buildings are located at opposite sides of the Reactor Building so that only one would be destroyed by an aircraft crash, therefore without any safety consequences. Similarly, the Diesel generators for emergency electricity supply are located in two different buildings, also protected by geographical separation (Fig 2).



- To withstand severe earthquakes, the EPR is designed with large safety margins. The entire nuclear island stands on a single reinforced concrete base. The height of the buildings has been minimized. The heaviest components, in particular the water tanks, are located at the lowest possible level.

The main data are shown in the following table:

#### 3. HPR

After the Fukushima Daiichi NPP accident on March 11, 2011 safety of NPPs has become again number one topic. The International Atomic Energy Agency (IAEA), governments, and nuclear safety authorities all issued special reports on the lessons learned from the Fukushima accident.

The technology of advanced NPPs has been revised and nuclear safety standards for new NPPs in the post-Fukushima era will be more strict. With this situation as a background, the China National Nuclear Corporation (CNNC) developed the evolutionary advanced pressurized water reactor (PWR) HPR1000.

The CNNC has been dedicated to developing advanced PWRs going through three phases, which are respectively represented by three successively developed models CNP1000, CP1000 and HPR1000. The development of CNP1000 occurred in 1999, and

CP1000 has incorporated 22 major improvements based on CNP1000 since 2007. The concept of HPR1000 was proposed as the final solution for the Generation-III PWR,

In April 2013, the basic design of HPR1000 was reviewed by an expert group organized by the China Nuclear Energy Association (CNEA). The first deployment of HPR1000 is at the units 5 and 6 of Fuqing NPP, located in Fujian Province. Construction started on May 7, 2015 after the preliminary safety analysis report (PSAR) was reviewed and a construction license was granted by the NNSA.

Fig. 2. Plot plan

#### **3.1 DESIGN PHILOSOPHY**

The fundamental safety functions to be ensured for nuclear power reactors are: control of the reactivity, removal of heat from the core and the spent fuel, and confinement of radioactive materials and control of operational discharges, as well as limitation of accidental releases. Active and passive safety design is the most remarkable innovation for HPR1000 and is also a typical example of fulfilling the diversity criteria. Active and passive features are employed to guarantee the safety functions of emergency core cooling, residual heat removal, in-vessel retention (IVR) of the molten core, and containment heat removal (Fig. 3). It is worth pointing out that the



application of the passive systems does not provide an excuse for reducing the design requirements of the active systems.

# Fig. 3. Active and passive systems of HPR1000. Red line active systems; green line passive systems; IRWST in-containment refueling water storage tank.

In order to further eliminate the residual risk, the design includes appropriate measures and adequate margins to protect the plant from beyond-design-basis external events such as earthquakes, flooding, and large commercial aircraft crashes. The emergency response capability is enhanced by providing mobile pumps and mobile diesel generators. The passive systems are able to operate for 72 h with a sufficient inventory of storage water and dedicated batteries, which significantly extends the plant autonomy period. As HPR1000 is a new model available after the Fukushima accident, its designers have learned from the accident and taken provisions to ensure the plant's survival under a similar scenario.

#### **3.2 TECHNICAL FEATURES**

Table 1 presents the general parameters of HPR1000, and this section briefly introduces its major technical features: the reactor core and fuel, RCS, engineering safety features, severe accident prevention and mitigation measures, buildings and structures.

Parameter	Value
Reactor thermal output	3050 MW <sub>th</sub>
Power plant output, gross	~1170 MWe
Power plant output, net	~1090 MWe
Power plant efficiency, net	~36%
Mode of operation	Baseload and load follow
Plant design life	60 years
Plant availability target	≥ 90%
Refueling cycle	18 months
Safety shutdown earthquake (SSE)	0.3g (g, gravitation constant)
Core damage frequency (CDF)	< 10 <sup>-6</sup> per reactor-year
Large release frequency (LRF)	< 10 <sup>-7</sup> per reactor-year
Occupational radiation exposure	< 0.6 person-Sv per reactor-year
Operator non-intervention period	0.5 h
Plant autonomy period	72 h

The HPR1000 reactor core generates 3050 MW of thermal power with an average linear power density of 173.8  $W \cdot cm^{-1}$ . The reactor core is loaded with 177 fuel assemblies, ensuring sufficient thermal margin while increasing output power. The core design permits a refueling cycle of 18 months by lowleakage loading patterns, with the flexibility of extending the refueling cycle. The CF3 fuel assembly is composed of 264 fuel rods arranged within a 17 × 17 supporting structure. The fuel rods contain UO2 pellets or Gd2O3-UO2 pellets.



Fig. 2. The reactor coolant system (RCS) of three loops.

The Reactor coolant system (RCS) of HPR1000 is a mature three-loop design, which has gathered abundant operating experience around the world. Three loops connect in parallel to the reactor pressure vessel (RPV), each containing an SG and a reactor coolant pump (Fig. 2). An electrically heated pressurizer is connected to one of the reactor coolant loops.

The engineering safety features are adopted to mitigate designbasis accidents (DBAs), and include a safety injection system, auxiliary feedwater system, and containment spray system (Fig. 3). The engineering safety features are comprised of redundant trains to fulfill single failure criteria. Independence is ensured by arranging each train in a physically separate building and supplying power by each of the emergency diesel generators.



Fig. 3. Engineering safety features. MHSI-middle head safety injection; LHSIlow head safety injection.

The safety injection system consists of two active subsystems, the middle head safety injection (MHSI) subsystem and low head safety injection (LHSI) subsystem and one passive subsystem the accumulator injection subsystem.

The general arrangement of HPR1000 is based on the single- unit layout, which can be divided into a nuclear island (NI), a conventional island (CI) and the balance of plant (BOP). The reactor building is located in the center of the NI, surrounded by the fuel building, the electrical building and two safeguard buildings. Other buildings are located on the periphery, such as the nuclear auxiliary building, access building, and so forth (Fig. 4). Each of the redundant trains of engineering safety features is arranged in a different safeguard building, and the two safeguard buildings are placed on opposite sides of the reactor building to achieve complete physical separation. This setup minimizes the potential of common cause failures that are induced by external events. The two emergency diesel

generator buildings are also physically separated, for the same reason.



Fig. 4. Nuclear island (NI) general layout. NB—reactor building; NF—fuel building; ND/NE—electrical building; NL safeguard building A; NR—safeguard building B; NX— nuclear auxiliary building; NN—connection building; NU— emergency diesel generator building A; NV—emergency diesel generator building B; NA—access building; NC— emergency compressor house; NG—reactor building gantry; NP—fire protection pump station for NI; NH—SBO diesel generator building.

#### 4. COMPARISON PWR - HPR

Currently there are many commercial Nuclear Power Plant designs. Here we compare EPR with HPR1000.

#### 4.1 MAIN DIFFERENCES

Name	EPR	HPR1000
Core thermal power	4300 MWt	3180 MWt
Net power output	1600 MWe	1200MWe
Number of loops	4	3
Number of fuel assemblies	241	177
Number of control rod cluster assemblies	89	69
Fuel assembly array	17 x 17-24	17 x 17
Life	60 years	60 years
efficiency [1]	36-37%	36%

#### **4.2 BUILDINGS AND STRUCTURES**



HPR1000:

-Inner shell: prestressed reinforced concrete with a leaktight steel liner inside

- Outer shell: reinforced concrete structure
- Annular space: keeping negative pressure, collection and filtration of the leak
- -Free volume: ~87,000 m3
- Prolonged lifetime: 60 years
- Withstand external events: large commercial aircraft crash, tornado, missile, explosion and etc.
- Physical Barrier protection (for Reactor Building, Fuel Building and Electrical Building containing MCR)
  - Physical separation of redundant systems (for Safeguard building etc.)

EPR:

- The Reactor Building, control room, Spent Fuel Building and two of the four Safeguard Buildings are protected by an outer shell made of reinforced concrete. The other two Safeguard Buildings are located at opposite sides of the Reactor Building.





-The Diesel generators for emergency electricity supply are located in two different buildings, also protected by geographical separation o withstand severe earthquakes.

- The entire nuclear island stands on a single reinforced concrete base. The height of the buildings has been minimized.

- The heaviest components, in particular the water tanks, are located at the lowest possible level.
- The EPR has a single steam turbine capable of using all the steam generated.

#### **4.2 SAFETY DESIGN**

HPR 1000

- Active: proven and verified
- Passive: no need for power Active + Passive: diverse approaches to perform safety functions -Emergency core cooling
- Core residual heat removal Cavity flooding and cooling (In-vessel retaining)
- Containment heat removal
- Increased core thermal margin
- Improved RPV material and quality
- Increased water inventory of primary loop
- Reliability design of SSC
- Advanced in-core instrumentations
- Digital I&C system and advanced MCR, reducing the possibility of human error
- Improved configuration of safety injection
- Absolute physical separation for safety trains
- Prolonged nonintervention duration

#### EPR

-Simplification of the safety systems with increased reliability through a 4-fold 100% redundancy (4-train concept).

-Elimination of common mode failures by physical separation and diverse back-up for safety functions.

- Extended grace periods for operator actions by designing components (e.g. pressurizer and steam generators) with larger water inventories to smoothen transients.

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

 Reduced sensitivity to human errors due to an optimized man-machine interface based on fully digitalized instrumentation and control systems and status-oriented information supplied by modern operator information systems.

- Prevention of high pressure core melt by high reliability of decay heat removal systems, complemented by dedicated severe accident depressurization valves.

- Prevention of hydrogen combustion by reducing the hydrogen-concentration in the containment at an early stage by catalytic hydrogen recombiners.

- Control of the containment pressure increase by a dedicated containment heat removal system (CHRS), which consists of a spray system and which allows recirculation through the cooling structure of the melt retention device.

- Collection of all leaks and prevention of any bypass of the confinement is achieved by double wall containment.

#### 5. CONCLUSIONS

As a Generation-III PWR design developed by the CNNC, HPR1000 and EPR fulfills the international utility requirements for advanced LWRs, and the increasingly stringent nuclear regulations and safety standards. It has also taken into account the feedback from the Fukushima accident.

Its excellent safety and performance design, and its economic competitiveness, make HPR1000 a perfect choice for new NPPs in both domestic and international markets, but EPR is better option for Poland, because of the technology, that is promoted by European Union.

#### REFERENCES

[1] International Atomic Energy Agency [Internet]. Vienna: 50 years

of nuclear energy. [cited 2015 Aug 13]. Available from: https:// www.iaea.org/About/Pol-

icy/GC/GC48/Documents/ gc48inf-4\_ftn3.pdf. [2] OECD Nuclear Energy Agency. Nuclear energy today. 2nd ed. Paris: Nuclear Energy Agency of the OECD; 2013.

[3] World Nuclear Association [Internet]. London: nuclear power in the world to- day. 2016 Jan [cited 2015 Aug 13]. Available from: http://www.world-nuclear. org/info/Current-and-Future-Generation/ Nuclear-Power-in-the-World-Today/.

[4] International Atomic Energy Agency. Nuclear power reactors in the world (2015 edition). Vienna: IAEA; 2015.

[5] Goldberg SM, Rosner R. Nuclear reactors: generation to generation. Cam- bridge: American Academy of Arts and Sciences; 2011.

[6] Zhang RP, Zhang X, Zhang LQ. Technical evolution of leading nuclear power reactor types in the world. China Nucl Power 2009;2(1):85–9; 2(2):184–9; 2(3):276–81; 2(4):371–9. Chinese. [7] Electric Power Research Institute. Advanced light water reactor utility requirement document. Palo Alto, CA: EPRI; 1990. [8] EUR organization. European utility requirements for LWR nuclear power plants. 2001.

[9] International Atomic Energy Agency. IAEA international fact finding expert mission of the Fukushima Daiichi NPP accident following the Great East Ja- pan Earthquake and Tsunami. Vienna: IAEA; 2011.

[10] Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan. Report of Japanese government to IAEA ministerial conference on nuclear safety—the accident at TEPCO's Fukushima nuclear power stations. 2011.

[11] Miller C, Cubbage A, Dorman D, Grobe J, Holahan G, Sanfilippo N; US Nuclear Regulatory Commission. Recommendations for enhancing reactor safety in the 21st century: the near-term task force review of insights form the Fukushima Daiichi accident. New York: Progressive Management; 2011.

[12] HM Chief Inspector of Nuclear Installations. Japanese earthquake and tsunami: implications for the UK Nuclear Industry. 2011.

[13] Wu YX, Song DY, Zhao GH. Post-Fukushima tendency of nuclear power codes and standards. Nucl Sci Eng 2013;33(3):329–36. Chinese.

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

- [14] Autorité de Sûreté nucléaire. Complementary safety assessment of the French nuclear power plants (European "stress tests") —report by the French Nuclear Safety Authority. 2011.
- [15] European Commission. Communication from the commission to the council and the European parliament on the interim report on the comprehensive risk and safety assessments ("stress tests") of nuclear power plants in the European Union. 2011.
- [16] China National Nuclear Safety Administration. General technical requirements for post-Fukushima improvement actions of NPP (tentative). 2012. Chinese.
- [17] WENRA Reactor Harmonization Working Group. Report—safety of new NPP designs. 2013.
- [18] International Atomic Energy Agency. Safety of nuclear power plants: design. IAEA Safety Standards Series No.: SSR-2/1 (Rev. 1). Vienna: IAEA. Forthcoming 2016.

[19] China National Nuclear Safety Administration, National

Development and Reform Commission, Ministry of Finance of the PRC, National Energy Administration, State Administration of

Science, Technology and Industry for National Defence, PRC. The 12th Five-Year Plan and long-term goal of nuclear safety and prevention and control of radioactive pollution. 2012. Chinese.

[20] Ji Xing\*, Daiyong Song, Yuxiang Wu. HPR1000: Advanced Pressurized Water Reactor with Active and Passive Safety. 2016.

- [21] China National Nuclear Corporation. HPR1000 Advanced PWR Technology. 24 Apr., 2019
- [22] The European Pressurized Water Reactor: A Safe and Competitive Solution for Future Energy Needs. Rüdiger Leverenz, Ludwig Gerhard, Andreas Göbel.
- [23] Advantages of Pressurized Water Reactors (PWR). Sydney Shaw. February 18, 2017
- [24] B. Zarubin, Introduction to Light Water Reactors, Physics 241, Stanford University, Winter 2015.
- [25] "2012-2013 Information Digest," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1350, Vol 24, August 2012, p. 28.

[26] A. Crerend, "Nuclear Fission in the Context of Pressurized Water Reactors," Physics 241, Stanford University, Winter 2015.

### Sekwestracja dwutlenku węgla

Kamila Bogdanowicz

Opiekun naukowy: dr inż. Grzegorz Niewiński

#### Słowa klucz.

**Streszczenie**. Ze względu na wzrost znaczenia czynników antropogenicznych w pogłębiających się zmianach klimatu, pojawia się konieczność redukcji emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Postępujący wzrost cen praw do emisji dwutlenku węgla motywuje do rozwijania technologii jego wychwytu i składowania (Carbon Capture and Storage - CCS). W tej pracy zostały przedstawiona charakterystyka metod wychwytu i składowania dwutlenku węgla. Zostało również omówione praktyczne zastosowanie CCS na przykładzie elektrowni Karlshamn.

#### 1. Wstęp

Zmiany klimatyczne na Ziemi zachodzące w ostatnich dziesięcioleciach postrzegane są w świecie nauki dwojako: część ekspertów uważa je za naturalną kolej rzeczy, uznając je za kolejny etap w dziejach Ziemi, jednak większość coraz częściej przypisuje je działalności ludzi, szczególnie związanej z przemysłem ciężkim i energetyką. Postępujący wzrost cen praw do emisji dwutlenku węgla, mający generalnie na celu zmuszanie do redukcji użycia wysokoemisyjnych paliw kopalnych na rzecz źródeł odnawialnych, motywuje również do rozwijania technologii wychwytu i składowania dwutlenku węgla (Carbon Capture and Storage - CCS).



Rysunek 1. Podział ogólnoświatowej emisji gazów cieplarnianych pochodzenia antropologicznego wg sektorów (źródło: "CO2 emissions from fuel combustion highlights 2017" International Energy Agency")

#### 2. Wydzielanie dwutlenku węgla

Największe emisje dwutlenku węgle w energetyce związane są ze spalaniem paliw kopalnych takich jak węgiel kamienny, węgiel brunatny, ropa naftowa oraz gaz ziemny. W 2017r. światowa emisja C02 wynikająca ze spalania paliw kopalnych i produkcji cementu wyniosła 36,2 mld t. [1] Była ona o 1,6% wyższa względem emisji z 2016r.



Rysunek 2. Trendy w emisji dwutlenku węgla w latach 1870-2014 (źródło: "CO2 emissions from fuel combustion highlights 2017" International Energy Agency )

#### 3. Metody wychwytywania dwutlenku węgla

Wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla (Carbon Capture and Storage – CCS) polega na wydzieleniu dwutlenku węgle podczas spalania i zmagazynowaniu go, zwykle w złożach geologicznych. Metody wychwytu dwutlenku węgla dzieli się na 3 kategorie [2], w zależności od tego na jakim etapie spalania paliwa jest ten proces przeprowadzany:



Rysunek 3. Metody wychwytu dwutlenku węgla (źródło: van Harmelen, Toon & Koornneef, Joris & Horssen, Arjan & Ramirez-Ramirez, C.A. & van Gijlswijk, Rene. (2008). "The impacts of CO2 capture technologies on transboundary air pollution in the Netherlands.")

#### 3.1. Tlenowe spalanie węgla (Oxyfuel Combustion)

Metoda ograniczania emisji dwutlenku węgla poprzez spalanie mieszanki paliwowej w czystym tlenie zamiast w powietrzu celem otrzymania spalin składających się w dużej części z dwutlenku węgla i pary wodnej (która w późniejszym etapie zostaje wykroplona). Z racji spalania w czystym tlenie, temperatura płomienia jest bardzo wysoka, co wymaga kontroli jej poziomu, poprzez wpuszczanie do komory spalania ochłodzonych spalin. Czasem ten sposób spalania paliw kopalnych określany jest jako zero-emisyjny ze względu na fakt, że wydzielone i

TERB 2019, Koło Naukowe Energetyków Politechniki Warszawskiej

zmagazynowane  $CO_2$  nie jest jedynie częścią spalin, a całym strumieniem spalin, czyli teoretycznie nie ma tu żadnej emisji. Jednostka wydzielająca tlen z powietrza (Air Separation Unit) wymaga wysokich nakładów energetycznych. [3]



Rysunek 4. Schemat tlenowego spalania węgla (źródło: "Carbon Dioxide Capture by Chemical Absorption: A Solvent Comparison" Study by Anusha Kothandaraman)

#### 3.2. Wychwytywanie przed spalaniem (Pre Combustion CO2 Capture)

Jak nazwa wskazuje, metoda polega na wychwycie dwutlenku węgla przed spaleniem mieszanki paliwowej. Metoda ta nie ma zastosowania w kotłach pyłowych, nadaje się za to bardzo dobrze do systemów IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle). Najpierw następuje gazyfikacja węgla do gazu syntetycznego, który następnie w wyniku reakcji z wodą tworzy tlenek węgla i wodór. Kolejnym etapem jest przeprowadzenie reakcji konwersji tlenku węgla z parą wodną, co pozwala otrzymać dwutlenek węgla i dodatkowy wodór. Ostatnim etapem jest spalenie w turbinie gazowej czystego wodoru. System ten jest tańszy niż opisany później wychwyt dwutlenku węgla po spalaniu, jednakże nakłady na budowę IGCC są znacznie wyższe niż w przypadku konwencjonalnych instalacji z kotłami pyłowymi. [4]

$$\begin{array}{l} \text{Coal} \stackrel{\text{gasification}}{\Longrightarrow} \text{CO} + H_2 \\ \text{CO} + \text{H}_2 \text{O} \stackrel{\text{water-gas shift}}{\Longrightarrow} \text{H}_2 + \text{CO}_2 \end{array}$$

 $\mathrm{CH}_4 + \mathrm{H}_2\mathrm{O} \overset{\mathrm{reform}}{\Longrightarrow} \mathrm{CO} + \mathrm{H}_2$ 

Rysunek 5. Reakcje zachodzące w procesie wychwytu dwutlenku węgla przed spalaniem (źródło: D. Y. Leung, G. Caramanna, and M. M. Maroto-Valer, "An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies," Renewable and Sustainable Energy Reviews)



Rysunek 6. Schemat IGCC z wychwytem dwutlenku węgla przed spalaniem (źródło: National Energy Technology Laboratory, https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-capture/pre-combustion)

#### 3.3. Wychwytywanie po spalaniu (Post Combustion CO2 Capture)

Technologia popularna obecnie w różnych dziedzinach przemysłu, rozwija się w energetyce. Dwutlenek węgla wychwytywany jest z gazów spalinowych w elektrowniach opalanych paliwami kopalnymi. Metoda preferowana ze względu na brak konieczności znacznych modyfikacji istniejących instalacji elektrowni, a jedynie dobudowania dodatkowego modułu. Jej sporą zaletą jest możliwość pracy bloku nawet w przypadku awarii systemu wychwytu CO<sub>2</sub> (w przeciwieństwie do wcześniej omówionych metod, które wymuszają odstawienie całego bloku w przypadku awarii).



Rysunek 7. Schemat instalacji z wychwytem wtórnym dwutlenku węgla (źródło: National Energy Technology Laboratory, https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-capture/post-combustion)

Wyróżnia się cztery grupy metod [5] wychwytu dwutlenku węgla po spalaniu:

#### 3.3.1. Absorpcja

Proces separacji CO<sub>2</sub> zachodzi w kolumnach zwanych aparatami absorpcyjnymi. Dwutlenek węgla w postaci gazu zostaje pochłonięty przez ciecz (absorbent), płynącą zwykle w przeciwprądzie do gazu. Typowymi sorbentami są etanoloamina (MEA), dietanoloamina (DEA) i węglan potasu. Etanoloamina uznawana jest za najbardziej efektywna dla wychwytu dwutlenku węgla (sprawność powyżej 90%). Metoda popularna w przemyśle chemicznym i petrochemii ze względu na dużą sprawność (duża czystość otrzymywanego CO<sub>2</sub>). Zaletą jest możliwość odzysku sorbentu poprzez podgrzanie lub zmniejszenie ciśnienia

(wymaga to jednak dużych nakładów energetycznych). Ważne jest, żeby przed wychwytem  $CO_2$  metod absorpcji oczyścić spaliny ze związków siarki, gdyż mogą one reagować z aminami i tworzyć sole, które nie rozłożą się potem w procesie regeneracji sorbentu (co wpływa na wzrost kosztów całego procesu). Po przejściu przez desorber, wydzielone  $CO_2$  zostaje oczyszczone i sprężone. [5]



Rysunek 8. Schemat układu absorpcji chemicznej dwutlenku węgla (źródło: Li, Fei & Zhang, Jie & Shang, Chao & Huang, Dexian & Oko, Eni & Wang, Meihong. (2017). Modelling of a Post-combustion CO2 Capture Process Using Deep Belief Network. Applied Thermal Engineering. 130. 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.078.)

Oprócz omówionej powyżej absorpcji chemicznej, jest również możliwa fizyczna absorpcja dwutlenku węgla. Absorpcja przez rozpuszczalnik zachodzi zgodnie z prawem Henry'ego. Efektywność tej metody rośnie ze wzrostem całkowitego ciśnienia gazu i stężenia separowanych związków.



Rysunek 9. Schemat układu absorpcji fizycznej dwutlenku węgla (źródło: "A Physical Absorption Assessment of a New Alternative Solvent for Carbon Capture" Muhammad Zulhilmi Ahmada, Haslenda Hashim\*,a, Nor Alafiza Yunusa, Jeng Shiun Lima, Wai Shin Hoa, Ho Chin Siongb)

#### 3.3.2. Adsorpcja

W przeciwieństwie do absorpcji, w tym procesie używany jest sorbent w stanie stałym, a dwutlenek węgla jest wiązany na jego powierzchni. Jako adsorbenty wykorzystywane są materiały o dużej powierzchni właściwej, takie jak na przykład węgiel aktywny, koks aktywny czy węglowe i zeolitowe sita molekularne. Proces przebiega najlepiej w niskiej temperaturze i przy wysokim ciśnieniu. Zaletami są wysoka sprawność oraz możliwość odzysku adsorbenta. Regeneracja adsorbenta może być przeprowadzana na trzy sposoby: zmiennociśnieniowy PSA (Pressure Swing Adsorption, polega na zmniejszeniu ciśnienia), zmiennotemperaturowy TSA (Temperature Swing Adsorption, poprzez podniesienie temperatury) i zmiennoelektryczny ESA (Electric Swing Adsorption, przepuszczenie niskonapięciowego prądu elektrycznego). [5]



Rysunek 10. Schemat adsorpcyjnego wychwytu dwutlenku węgla (źródło: "Sposoby redukcji emisji co2 z procesów energetycznych" Janusz Kotowicz, Katarzyna Janusz, "Rynek Energii"- nr 1/2007)

#### 3.3.3. Separacja z użyciem membran,

Jak nazwa wskazuje, w metodzie tej korzysta się z membran przepuszczalnych jedynie dla cząstek dwutlenku węgla. Membrany składają się z cienkich warstw kompozytów polimerowych. Dodatkowo wyposażone są w grubsze warstwy nieselektywne mające na celu zwiększanie mechanicznej wytrzymałości membrany. Separacja zachodzi na skutek różnic w prędkościach przenikania składników gazu przez membranę. Proces napędzany jest różnicą ciśnień cząsteczkowych usuwanych zanieczyszczeń po dwóch stronach membrany.



Rysunek 11. Schemat procesu separacji gazu z użyciem membran (źródło: "Sposoby redukcji emisji co2 z procesów energetycznych" Janusz Kotowicz, Katarzyna Janusz, "Rynek Energii"- nr 1/2007)

#### 3.3.4. Metoda kriogeniczna

Wychwyt dwutlenku węgla zachodzi w procesie destylacji przy niskiej temperaturze i wysokim ciśnieniu. Separacja następuje na skutek różnic w temperaturach wrzenia poszczególnych składników gazu. Spaliny chłodzone są do temperatury desublimacji  $CO_2$  (-100 do -135 °C) i wydzielony w ten sposób dwutlenek węgla zostaje następnie podgrzany poprzez wzrost ciśnienia, w celu otrzymania go w stanie ciekłym. [6] Ze względu na duże wahania temperatur proces ten jest bardzo energochłonny (szacuje się ok. 630kWh na tonę wychwyconego  $CO_2$ ). [7]



Rysunek 12. Schemat metody kriogenicznej wydzielania dwutlenku węgla ze spalin (źródło: "Sposoby redukcji emisji co2 z procesów energetycznych" Janusz Kotowicz, Katarzyna Janusz, "Rynek Energii"- nr 1/2007 )

#### 4. Składowanie dwutlenku węgla

- Wychwycony dwutlenek węgla może być podziemnie składowany w [8]:
- a) wyczerpanych złożach ropy naftowej i gazu,
- b) geologicznych formacjach wodonośnych,
- c) nieeksploatowanych pokładach węgla.



Rysunek 13. Geologiczna sekwestracja CO2 (źródło: Państwowy Instytut Geologiczny, https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/CO2/Geol ogiaSekwestracyjna)

Dwutlenek węgla jest wtłaczany do tych magazynów na głębokość, w której znajduje się w stanie nadkrytycznym (parametry punktu krytycznego CO<sub>2</sub>: temperatura 31,1°C, ciśnienie 73,9 bara). W takich warunkach CO<sub>2</sub> ma gęstość jak ciecz, a lepkość i ściśliwość jak gaz. Wtłaczanie dwutlenku węgla w polach naftowych w skały ubogie w ropę poprawia możliwości wydobycia tego surowca.

Wcześniej rozważane było również składowanie  $CO_2$  w oceanach, jednak technologia ta została uznana za nielegalną ze względu na negatywny wpływ na parametry oceanów.

Istnieje również możliwość mineralnej karbonatyzacji polegającej na reakcji dwutlenku węgla z tlenkami metali, której produktem są nierozpuszczalne węglany. [9]



Rysunek 14. Schemat karbonatyzacji mineralnej (źródło: "A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO2", Abass A.Olajire, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 109, September 2013, Pages 364-392)

#### 5. System CCS w elektrowni Karlshamn

Elektrownia Karlshamn to opalana olejem, a chłodzona wodą morską szwedzka elektrownia szczytowa o mocy 662MW. W 2009r. uruchomiono w niej testowy system CCS zaprojektowany do wychwytu ponad 15 000t dwutlenku węgla na rok (ze spalin z kotła na wysokosiarkowy olej). [10] Zastosowano tam wychwyt dwutlenku węgla po spalaniu (CCS), w technologii Chilled Ammonia (CAP) – jeden z rodzajów absorpcji chemicznej.

Dwutlenek węgla zostaje uwięziony w wodnym roztworze amoniaku, tworząc węglan amonu, z którego następnie jest usuwany poprzez podgrzewanie roztworu pod wysokim ciśnieniem. Starty energii związane z korzystaniem z systemu Carbon Capture wynosiło około 10% (dla pozostałych metod PCC około 30% strat), a efektywność wychwytu wtórnego wynosiła 90%. [11] Obecnie instalacja testowa została wyłączona z użytku. Oprócz systemów wychwytu CO2 elektrownia Karlshamn wyposażona jest także w katalizatory tlenków azotu (sprawność 85%), elektrofiltr o sprawności 90% i system odsiarczania typu FlowPac (mokra technologia odsiarczania pierwotnie opracowana w tej elektrowni, a następnie wprowadzona na rynek przez Alstom, o sprawności ponad 98%). [12]

#### 6. Bibliografia

[1] Corinne Le Quéré i inni, Global Carbon Budget 2018, "Earth System Science Data", 10 (4), 2018, s. 2141-2194, DOI: 10.5194/essd-10-2141-2018

[2] Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes by Tim C. Merkel

[3] "Carbon Dioxide Capture by Chemical Absorption: A Solvent Comparison" Study by Anusha Kothandaraman

[4] Howard Herzog, Jerry Meldon, Alan Hatton "Advanced post-combustion CO2 capture"

[5] "Sposoby redukcji emisji co2 z procesów energetycznych" Janusz Kotowicz, Katarzyna Janusz, "Rynek Energii"- nr 1/2007

[6] "An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies" Dennis Y.C. Leunga,n, Giorgio Caramannab, M. Mercedes Maroto-Valerb

[7] G. Gottlicher, R. Pruschek "Comparison of CO2 removal systems for fossil fuelled power plants" Energy Convers Manag

[8] "Podziemne składowanie dwutlenku węgla – możliwości wykorzystania technologii CCS w polskich uwarunkowaniach", Józef Dubiński, Jan Wachowicz, Aleksandra Koteras, Główny Instytut Górnictwa, Katowice

[9] "Mineralna karbonatyzacja jako jedna z możliwości sekwestracji CO2" Anna Majchrzak, Izabela Majchrzak-Kucęba, Wojciech Nowak, Politechnika Częstochowska

[10] "Current status and future development of solvent-based carbon capture" Eni Oko, Meihong Wang, Atuman S. Joel

[11] http://sequestration.mit.edu/tools/projects/eon\_karlshamn.html

[12] https://www.uniper.energy/sverige/reservkraft/karlshamnsverket

## Modelowanie bloku energetycznego klasy 200 MW w programie Aspen HYSYS na podstawie bloku nr 4 Elektrowni Kozienice

Hubert Smoliński

Opiekun naukowy: Arkadiusz Szczęśniak

#### Słowa klucz.

Aspen HYSYS, modelowanie, blok 200 MW

#### Streszczenie

Artykuł pod tytułem "Modelowanie bloku energetycznego klasy 200 MW w programie Aspen HYSYS na podstawie bloku nr 4 Elektrowni Kozienice" ma na celu pokazać użyteczność programu przy weryfikacji zmierzonych parametrów układu z obliczonymi na podstawie modelów termodynamicznych. W pracy zostanie przedstawiony model układu technologicznego bloku klasy 200 MW stworzony w programie Aspen HYSYS, a przede wszystkim założenia i uproszczenia przyjęte podczas jego modelowania. Zostanie przeprowadzona analiza wyników obliczeń oraz ich konfrontacja z parametrami zmierzonymi.

#### 8. Wstęp

Modelowanie zarówno nowych, jak i istniejących układów energetycznych, bądź innych instalacji przemysłowych jest nieodłączną częścią projektowania oraz eksploatacji tych układów. Poprzez modelowanie układów możemy wprowadzić zadania optymalizacyjne, co doprowadzi nas do jak najlepszego dobrania urządzeń do rozpatrywanej instalacji już na etapie projektowania. Natomiast w trakcie eksploatacji pozwala prowadzić ją w jak najbardziej sprawny i dopasowany do naszych potrzeb sposób. W świetle coraz bardziej zaostrzających się przepisów dotyczących ochrony środowiska modelowanie układów technologicznych pozwala dobrać najlepsze pod względem technicznym i ekonomicznym metody redukcji emitowanych zanieczyszczeń. Ciągła dbałość o środowisko oraz nieustanna chęć poprawiania jakości produktów skłaniają do coraz częstszego sięgania po narzędzia modelowania i optymalizacji układów technologicznych oraz procesów produkcyjnych. W niniejszym artykule przeanalizowane zostaną zdolności programu Aspen HYSYS jako wspomnianego narzędzia do modelowania.

#### 9. Blok klasy 200 MW

Aby móc ocenić zdolności programu Aspen HYSYS jako narzędzia do modelowania układów technologicznych potrzebne jest przyjęcie pewnego układu odniesienia. Zamodelowanym układem technologicznym został blok energetyczny klasy 200 MW opalany węglem kamiennym. Został on wybrany ze względu na to, że w Polsce powstały 63 takie jednostki, przez co stały się podstawowym źródłem mocy w polskim systemie elektroenergetycznym oraz ze względu na ich długi okres eksploatacji. Te dwie cechy sprawiają, że jednostki te są dobrze poznane pod względem inżynierskim, a w konsekwencji pozwala to na określenie użyteczności programu Aspen HYSYS w modelowaniu takich jednostek.

Autorem projektu układu technologicznego bloków klasy 200 MW jest firma Energoprojekt. Układ ten został przedstawiony na Rysunku 1., natomiast główne parametry fizyczne czynnika roboczego w zaznaczonych punktach układu przedstawia Tabela 1.[1]



Rysunek 20 Schemat obiegu wodno-parowego bloku klasy 200 MW wg Energoprojektu (cyfry arabskie oznaczają punkty charakterystyczne; cyfry rzymskie- numery upustów)[1]

Punkt	p [Mpa]	t [°C]	D [kg/s]	Punkt	p [Mpa]	t [°C]	D [kg/s]
1	13,5	540	180,6	22	1,6	147,5	161,06
2	12,74	535	180,6	23	0,6	158,1	180,6
3	2,89	350	156,4	24	18,5	162,7	180,6
4	2,6	535	156,4	25	18,5	184,8	180,6
5	0,135	-	130,5	26	18,5	222,9	180,6
6	0,005	32	125	27	18,5	244,1	180,6
7	4,21	378	8,61	28	4	249	8,61
8	2,82	350	12,4	29	2,68	227	21,01
9	1,29	445	10,2	30	1,22	187	10,2
10	0,6	440	2,89	31	0,5	151	15,1
11	0,52	368	4,9	32	0,28	140	21,9
12	0,3	266	6,8	33	0,13	106	28,76
13	0,14	188	6,86	34	0,036	72	1,16
14	0,028	67	5,53	35	0,026	65	5,53
15	1,6	32	133,3	36	0,005	50	0,95
16	1,6	34,5	133,3	37	0,005	50	0,55
17	1,6	35,5	133,3	38	15,3	342,8	0,9
18	1,6	68,5	133,5	39	0,6	158,1	0,4
19	1,6	72,8	133,3	40	0,6	158,1	0,5
20	1,6	100	133,3	41	0,097	225	0,31
21	1,6	127	162,06	42	0,04	44,5	1,16

Modelowanie bloku energetycznego klasy 200 MW w programie Aspen HYSYS na podstawie bloku nr 4 Elektrowni Kozienice

Tabela 4 Podstawowe parametry czynnika roboczego podczas pracy w warunkach znamionowych w charakterystycznych punktach układu przedstawionego na Rysunku 1 wg Energoprojektu[1]

#### 10. Model układu technologicznego

Podczas tworzenia modelu układu technologicznego przyjęto kilka podstawowych uproszczeń, mających na celu ułatwienie obliczeń w programie. Były to:

- założenie zerowej straty ciepła
- założenie zerowej straty ciśnienia w rurociągach i komponentach
- uwzględnienie jedynie najważniejszych wymienników regeneracji nisko i wysokoprężnej
- pominięcie strumieni czynnika roboczego pobieranych na rzecz uszczelnień turbiny

Na rysunkach o 2-9 przedstawiono poszczególne części zamodelowanego układu technologicznego. Rysunki 2, 3 oraz przedstawiają model turbiny wraz z upustami, rysunek 4 przedstawia model skraplacza wraz z pompą skroplin, natomiast rysunki 5-9 układ regeneracji niskoprężnej, odgazowywacz wraz z pompą wody zasilającej oraz układ regeneracji wysokoprężnej.



Rysunek 21 Model kotła wraz z częścią wysokoprężną turbiny oraz przegrzewem wtórnym







Rysunek 27 Model odgazowywacza oraz pompy wody zasilającej



Rysunek 28 Model układu regeneracji wysokoprężnej

#### 11. Walidacja wyników

Zaprojektowanie modelu opisanego w rozdziale 4 może posłużyć do analiz technicznych lub finansowych, jednak w pierwszej kolejności należy sprawdzić, w jakim stopniu model układu odwzorowuje rzeczywistość. Na Rysunku 1 zostały określone 42 punkty charakterystyczne, które następnie zostały opisane w Tabeli 1. W Tabeli 2 zostały zawarte wartości parametrów dla tych punktów na podstawie modelu sporządzonego w programie ASPEN HYSYS, natomiast w Tabeli 3 przedstawiono parametry dla tych samych punktów pochodzące z pomiarów układu rzeczywistego dokonanych na bloku nr 4 Elektrowni Kozienice.[1], [2]

Punkt	p [Mpa]	t [°C]	D [kg/s]	Punkt	p [Mpa]	t [°C]	D [kg/s]
1	12,79	534,4	174,5	22	16,53	152,3	151,9
2	12,79	534,4	174,5	23	16,53	166,6	174,5
3	3,381	330,3	153,1	24	12,79	169	174,5
4	3,381	536,8	153,1	25	12,79	192,5	174,5
5	0,2147	174,9	119,9	26	12,79	230	174,5
6	0,003	24,1	117,8	27	12,79	250	174,5
7	6,326	419,1	8,2	28	6,326	279	8,2
8	3,3381	330,3	13,26	29	3,381	230	21,46
9	2,892	511	7,2	30	2,892	231,8	7,2
10	2,892	511	1,2	31	1,34	150	12,5
11	1,34	394,1	5,3	32	0,4715	125	21,5
12	0,4715	259,7	9	33	0,2147	90	32
13	0,2147	174,9	10,5	34	-	-	-
14	0,015	54	2,1	35	0,015	53	2,1
15	1,653	23,88	121,9	36	-	-	-
16	1,653	23,88	121,9	37	-	-	-
17	1,653	23,88	121,9	38	-	-	-
18	1,653	32,93	121,9	39	-	-	-
19	1,653	32,93	121,9	40	-	-	-

Tabela 5 Parametry czynnika w charakterystycznych punktach według modelu stworzonego w programie ASPEN HYSYS

20	1,653	90,39	119,9	41	-	-	-
21	1,653	126,9	151,9	42	-	-	-

Tabela 6 Parametry bloku klasy 200 MW według pomiarów z bloku nr 4 El. Kozienice[2]

Punkt	p [Mpa]	t [°C]	D [kg/s]	Punkt	p [Mpa]	t [°C]	D [kg/s]
1	12,793	534,4	174,53	22	7,82	151	165,3
2	12,793	534,4	174,53	23	-	-	-
3	2,892	330,3	164,22	24	16,82	151,6	174,67
4	2,547	536,8	162,99	25	-	186,8	174,67
5	0,14	177,4	131,01	26	-	225,3	174,67
6	0,003	-	128,41	27	16,7	248,2	174,67
7	4,164	419,1	8,12	28	-	228,9	8,12
8	2,832	330,5	13,26	29	-	206,8	21,38
9	1,21	445,2	7,17	30	-	166,6	7,17
10	0,592	-	1,18	31	0,509	131,6	12,42
11	0,509	394,1	5,25	32	-	113,6	20,72
12	0,289	259,7	8,3	33	-	-	-
13	0,01	174,9	11,45	34	-	46,3	0,99
14	0,015	-	2,79	35	-	52,2	2,79
15	1,653	25,4	136,37	36	-	-	-
16	-	27,1	136,37	37	-	-	-
17	-	29,9	136,37	38	-	-	-
18	-	41,2	136,37	39	-	-	-
19	-	-	-	40	-	-	-
20	-	98,8	133,13	41	-	-	-
21	9.06	129.4	165.3	42	-	-	-

Na podstawie powyższych danych można stworzyć analizę odchyłek wartości zamodelowanych i zmierzonych względem parametrów znamionowych. Wszelkie różnice w wartościach parametrów wskazują miejsca, w których można stwierdzić zużycie urządzeń, niedoskonałości w modelach matematycznych komponentów w programie Aspen HYSYS[3] bądź po prostu zidentyfikować błąd powstały w wyniku przyjętych uproszczeń i założeń podczas tworzenia modelu. Rysunek 10 przedstawia porównanie wartości temperatury dla



Rysunek 29 Porównanie wartości temperatur dla poszczególnych punktów układu

poszczególnych punktów charakterystycznych układu.

#### 12. Podsumowanie

Dzięki modelowaniu układów technologicznych można w szybszy i prostszy sposób przeprowadzić obliczenia niezbędne do ich zaprojektowania, a także przeprowadzić symulacje wykazujące, czy wprowadzenie pewnych nowych rozwiązań będzie bezpieczne dla układu technologicznego oraz jak wpłynie na niego pod względem całkowitej sprawności i eksploatacji. Zamodelowanie bloku klasy 200 MW w programie ASPEN

HYSYS oraz zestawienie uzyskanych parametrów w punktach charakterystycznych z obliczeniami projektowymi oraz wynikami pomiarów z bloku nr 4 Elektrowni Kozienice pozwoliło na oszacowanie użyteczności tego programu w tworzeniu modeli układów technologicznych w energetyce.

Różnice, które pojawiły się w wartościach parametrów nie wynikają z błędnych obliczeń i modeli programu, a jedynie z przyjętych parametrów podstawowych bazujących na pomiarach, założeń sprawności poszczególnych urządzeń oraz uproszczeń zastosowanych podczas tworzenia modelu. Największe z nich pojawiły się w wartości ciśnienia w strumieniach wody zasilającej w obszarze wymienników wysokoprężnych, co wynika z przyjętego w modelu założenia zerowych strat ciśnienia na rurociągach, a szczególnie w kotle. Pomimo różnic wiele parametrów jest bardzo zbliżonych do siebie, a niektóre nawet się pokrywają, dlatego można stwierdzić, że model dobrze odwzorowuje rzeczywistość, a co za tym idzie program ASPEN HYSYS jest bardzo przydatnym narzędziem inżynierskim w modelowaniu oraz analizie układów technologicznych.

#### Bibliografia

- [1] M. Pawlik and F. Strzelczyk, *Elektrownie*. .
- [2] "Materiały własne."
- [3] A. E. A. Technology, "2.4 Update."

### Kogeneracja rozproszona biomasy - rozwiązanie energetyczne dla Polski

Filip Murawka

Opiekun Naukowy: dr hab. inż. Wojciech Bujalski, prof. PW

#### Słowa kluczowe

Biomasa; kogeneracja rozproszona; stabilizacja energetyczna; OZE;

#### Abstrakt

Energetyka węglowa jest głównym producentem energii elektrycznej w Polsce. Jednak obecna sytuacja klimatyczna oraz regulacje Unii Europejskiej dotyczące emisji m.in. CO<sub>2</sub> zmuszają do poszukiwania alternatyw dla paliwa opartego na węglu. Poniższy artykuł przedstawia kogenerację rozproszoną biomasową jako możliwe rozwiązanie dla polskiej energetyki. Opisany zostanie obecny wpływ biomasy na mix energetyczny kraju, a także możliwości produkcyjne tego rodzaju paliwa w Polsce. Rozważona zostanie również możliwość częściowego oparcia bezpieczeństwa energetycznego na lokalnych elektrociepłowniach opalanych biomasą w celu zapewnienia niezależności energetycznej poszczególnym regionom Polski. Zaprezentowane będą również obecne plany rozwoju sektora biopaliw w oparciu o państwowe plany dotyczące polityki energetycznej oraz korzyści i zagrożenia związane z takim rozwiązaniem.

#### Wstęp

Polski system energetyczny jest w zdecydowanej mierze oparty na przemyśle węglowym. Instalacje, które wykorzystują ten rodzaj paliwa, były w 2018r. odpowiedzialne za ok. 77% wytworzonej energii elektrycznej, co daje ok. 2100 PJ energii. W celu wyprodukowania tej energii zużyto ok. 129 Mt węgla. Jak powszechnie wiadomo, głównym produktem spalania węgla jest dwutlenek węgla. Proces ten w 2018r. odpowiadał za emisję ok. 210 MtCO<sub>2</sub> do atmosfery [1]. W obecnej sytuacji klimatycznej, europejska wspólnota wprowadza coraz bardziej restrykcyjne ograniczenia dotyczące emisji m.in. CO<sub>2</sub>. Powoduje to wzrost kosztów za produkcję dwutlenku węgla, co ma również wpływ na rosnącą cenę samego paliwa. W związku z tym, w krajach europejskich, w tym również w Polsce, rośnie zapotrzebowanie na energię wytwarzaną ze źródeł, które nie powodują emisji CO<sub>2</sub>.

Warto także zwrócić uwagę na eksploatację złóż węgla (zarówno kamiennego, jak i brunatnego) w Polsce. Jak powszechnie wiadomo, węgiel nie jest odnawialnym źródłem energii. Oznacza to, że jego pokłady są skończone i wyczerpują się wraz z ich eksploatacją. W *BILANSIE ZASOBÓW ZŁÓŻ KOPALIN W POLSCE wg stanu na 31 XII 2018 r.* Państwowego Instytutu Geologicznego przedstawiono dane dotyczące stanu zagospodarowania, eksploatacji oraz wydobycia węgla energetycznego. Przedstawia je poniższa tabela.

Surowiec		Zasoby ogółem [mln t]	Zasoby przemysłowe kopalń [mln t]	Wydobycie w roku 2018 [mln t]	
Węgle brunatne energetyczne		23 314,88	1 047,60	61,144	
Węgle	Energetyczne	42 759	2 (05.45	62 882	
kamienne	Koksujące	17 890	3 003,45	03,883	

Tabela 7 Zasoby i wydobycie węgla energetycznego wg BILANSU ZASOBÓW ZŁÓŻ I KOPALIN W POLSCE wg stanu na 31 XII 2018r. Państwowego Instytutu Geologicznego.