

Druk 3D modeli reaktorów jądrowych

Piotr Garczyński, Jan Kłos, Adam Malinowski,
Aleksandra Skruch, Krzysztof Solak

Maj 2025

1 Motywacja

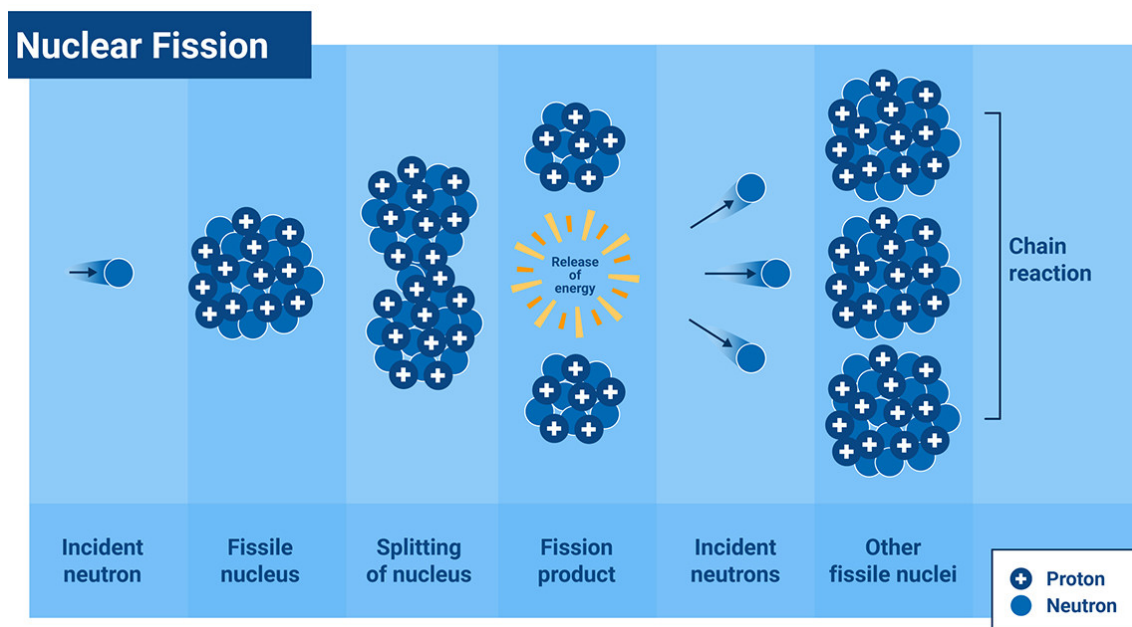
Jako studenci kierunku specjalizującego się w fizyce jądrowej, chcieliśmy aby nasz projekt przyczynił się do rozpowszechniania wiedzy na temat energetyki jądrowej. Poznanie tego tematu jest obecnie szczególnie istotne ze względu na trwające przygotowania do budowy pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce. Zrozumienie sposobu ich działania może przyczynić się do obalenia powszechnie występujących szkodliwych mitów dotyczących energetyki jądrowych. Dodatkowo, promocja energii jądrowej jest istotna ze względu na zmiany klimatyczne. Dlatego też w ramach projektu przygotowaliśmy modele najważniejszych elementów reaktorów jądrowych PWR oraz BWR. Modele zostały wydrukowane na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w przestrzeni "Makerspace", a następnie w celach edukacyjnych zaprezentowane w czasie Dni Odkrywców Kampusu Ochota (DOKO).

2 Część teoretyczna

2.1 Elektrownie Jądrowe

Elektrownie jądrowe jako źródło energii wykorzystują energię powstałą w wyniku rozszczepień jąder atomowych. Ciężkie jądra (np. ^{235}U) w trakcie rozczepienia uwalniają energię cieplną, która wykorzystywana jest do podgrzewania wody i produkcji pary, napędzającej turbiny generatorów prądu. W wyniku tego procesu emitowane są neutrony, rozszczepiające kolejne jądra, wywołując reakcję łańcuchową. Schemat procesu przedstawiono na rysunku 1. Neutrony z rozpadu posiadają zbyt wysoką energię kinetyczną by podtrzymać reakcję łańcuchową, dlatego muszą zostać spowolnione do energii termicznej (około 0,025 eV), dla której prawdopodobieństwo rozpadu jest wyższe. Spowalnianie zachodzi w wyniku zderzeń neutronów z moderatorem — substancją posiadającą wysokie prawdopodobieństwo na ich rozproszenie przy jednoczesnym braku ich nadmiernego pochłaniania. Najczęściej spotykanym moderatorem jest woda lub ciężka woda.

W zależności od żądanych parametrów, istnieją różne typy reaktorów wykorzystujące inne składniki paliwa jądrowego, materiałów moderatora czy obiegu chłodziwa. Najczęściej spotykanymi obecnie typami są reaktory wodne ciśnieniowe (PWR) oraz wodne wrzące (BWR).



Rysunek 1: Schematyczne przedstawienie rozszczepienia jądra atomowego indukowanego neutronami termicznymi. Rysunek pochodzi z ref. [1]

2.2 Reaktor wodny ciśnieniowy — PWR

Reaktor wodny ciśnieniowy (PWR) to jeden z przykładów reaktorów jądrowych, który zaliczamy do lekkich wodnych reaktorów (LWR). Moderatorem w tego typu reaktorach jest woda. Paliwo z reguły wykonane jest w postaci pastylek z dwutlenku uranu UO_2 , zamkniętych w koszulce z cyrkonu lub stali nierdzewnej. Aby zapewnić maksymalną powierzchnię prętów, gwarantującą dobre warunki chłodzenia, pręty paliwowe mają niewielką średnicę ok. 10 mm [2]. W reaktorach PWR stosowane są dwa obiegi wody, co pozwala to na zmniejszenie ryzyka wycieku radioaktywnych substancji.

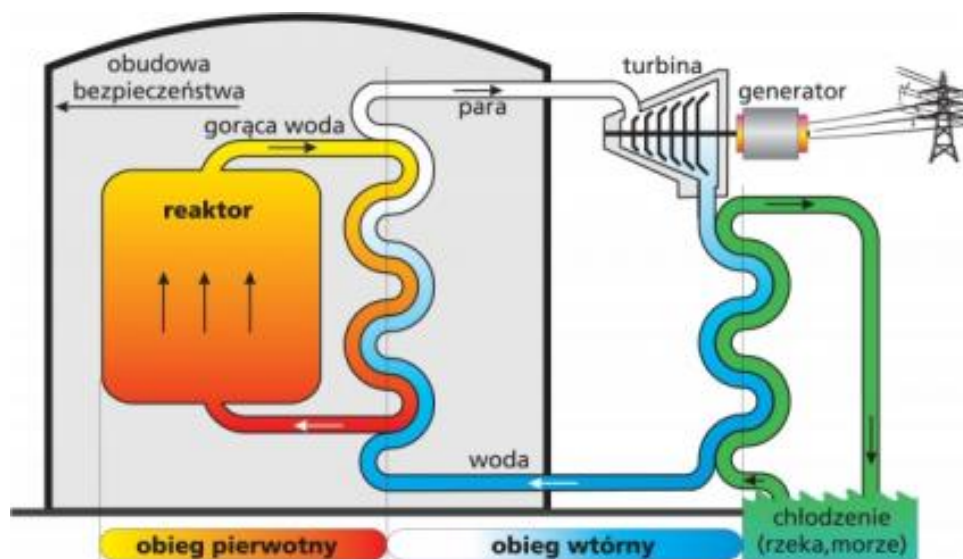
Obieg pierwotny

Głównym zadaniem obiegu pierwotnego jest chłodzenie reaktora. Dzieje się to przez odbieranie ciepła generowanego przez reakcje jądrowe mające miejsce w zbiorniku reaktora. Woda utrzymywana jest pod bardzo wysokim ciśnieniem pomiędzy 12–16 MPa, co pozwala utrzymać ją dalej w stanie ciekłym mimo wysokiej temperatury (300–350 °C) [3], która w warunkach normalnych doprowadziłaby do wrzenia. Cały

układ jest całkowicie odseparowany od otoczenia i zamknięty z reaktorem w obudowie ochronnej, zwanej "containmentem". Obudowa bezpieczeństwa jest masywną konstrukcją zbudowaną z betonu zbrojonego, najmocniejszym i najszczelniejszym budynkiem w każdej elektrowni jądrowej. Zamknięty w nim cały chłodzący układ obiegu pierwotnego jest zabezpieczony i odizolowany od środowiska zewnętrznego. Uniemożliwia to wydostanie się skażeń promieniotwórczych nawet w przypadku uszkodzenia rdzenia reaktora. Chłodziwo następnie jest transportowane do generatora pary, gdzie przekazuje swoje ciepło do obiegu wtórnego.

Obieg wtórny

Obiekt wtórny służy do przekształcania ciepła przekazanego z pierwotnego obiegu wody w parę wodną, która następnie napędza turbinę generującą energię elektryczną. W obiegu wtórnym ciśnienie jest niższe i woda zmienia stan skupienia. Para wytworzona w wytwornicy pary w obiegu wtórnym ma ciśnienie 5–6 MPa i temperaturę 270–300°C [3]. Po osuszeniu jest kierowana na turbiny obracające generatory prądu. Po przejściu przez turbinę para wodna trafia do kondensatora, w którym jest schładzana i skraplana do postaci ciekłej. Chłodzenie odbywa się poprzez wymianę ciepła z wodą zewnętrzną (z dużych zbiorników wodnych jak morza). Skroplona woda wraca do obiegu wtórnego, a proces się powtarza.



Rysunek 2: Schemat elektrowni jądrowej typu PWR. Rysunek pochodzi z ref. [3]

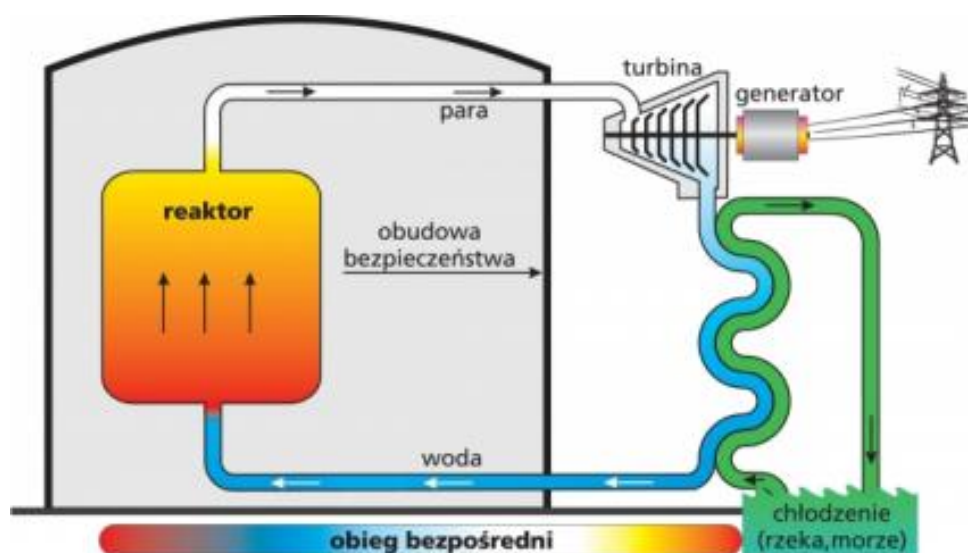
2.3 Reaktor wodny wrzący — BWR

Reaktor wrzącej wody (BWR) to drugi najczęściej stosowany typ reaktora, stanowiący ok. 20% wszystkich reaktorów na świecie (około 84 placówek). Podobnie jak w przypadku reaktorów typu PWR, w reaktorach BWR chłodziwem i modera-

torem również jest woda. Oba typy reaktorów wykorzystują również to samo paliwo - pastylki z dwutlenku uranu UO_2 .

Główne różnice między nimi związane są z ich konstrukcją. Reaktor BWR posiada tylko jeden obieg bezpośredni, w którym woda, zamieniona w reaktorze na parę, jest kierowana bezpośrednio na turbiny, po czym schłodzona i skroplona wraca do reaktora. W elektrowni BWR nie ma konieczności zapobiegania wrzeniu wody przez stosowanie bardzo wysokich ciśnień, elementy takie jak generator pary i stabilizator ciśnienia są zbędne, ponieważ osuszanie pary następuje bezpośrednio w zbiorniku reaktora.

Cecha charakterystyczną reaktorów BWR jest jeden obieg wody. Woda chłodząca paliwo ma pewien poziom aktywności, pochodzący np. z aktywności jodu i gazów szlachetnych przenikających przez koszulki prętów paliwowych. Skażona para przechodzi przez cały układ reaktora, łącznie z turbinami, skraplaczem i pompami zasilającymi znajdującymi się poza obudową bezpieczeństwa. Wymusza to konieczność zabezpieczenia tych urządzeń osłonami, co utrudnia ich obsługę i eksploatację.



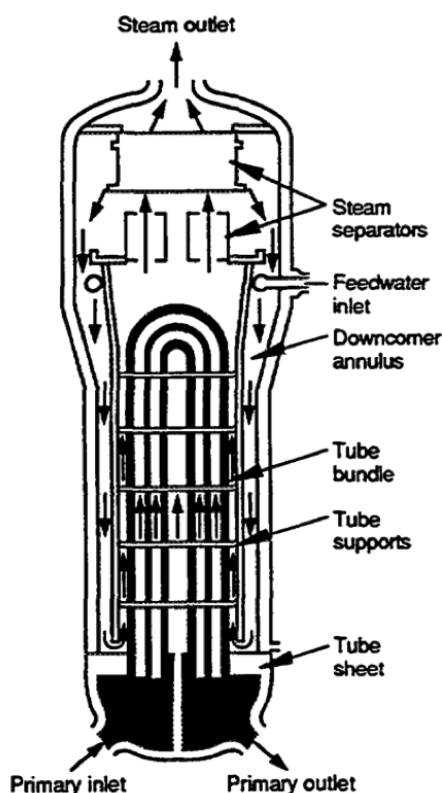
Rysunek 3: Schemat elektrowni jądrowej typu BWR. Rysunek pochodzi z ref. [3]

2.4 Generator pary

Wytwornica pary, zwany również "generatorem pary" jest niezbędnym elementem działania każdego reaktora PWR. Woda, podgrzana w rdzeniu reaktora do około 300 stopni (pozostająca w stanie ciekłym we względu na ciśnienie około 15 MPa), wypływa ze zbiornika reaktora i kierowana jest z kierunku wytwornicy pary, której schemat pokazano na rysunku 4. Wytwornica pary jest elementem reaktora służącym wymianie ciepła między obiegiem pierwotnym a obiegiem wtórnym. Jak wskazuje na to nazwa, główną funkcją wytwornicy jest generowanie pary wodnej w obiegu wtórnym poruszającej turbiny generujące prąd.

Istnieją obecnie dwa typy generatorów pary: z jednym przepływem (once through SG) oraz stosujące przepływ wody obiegu pierwotnego przez U-rurki. W przypadku pierwszego typu woda obiegu pierwotnego wpływa do generatora z góry i przepływa przez proste kanały na dół. Efektywna wymiana ciepła pozwala na uzyskanie na wylocie generatora pary suchej — pozbawionej kropelek wody — nie wymagającej zastosowania separatorów wilgoci, co stanowi zasadniczą zaletę tego typu urządzeń. Wadę stanowi natomiast duże napięcia w ścianach kanałów spowodowane różną rozszerzalnością cieplną między wnętrzem i zewnętrzem rurki.

W przypadku drugiego typu wytwornicy woda obiegu pierwotnego kierowana jest przez system U-rurek (bardziej odpornych na rozszerzanie cieplne) gdzie przekazuje ciepło do obiegu wtórnego. Jedna wytwornica pary, w zależności od rodzaju, zawiera od 3000 nawet do 16000 U-rurek. W przypadku tego typu generatora, para wodna zmieszana jest z kropelkami wody (w stanie nasycenia) dlatego konieczne jest zastosowanie separatora i osuszacza. Woda wydzielona z pierwotnej mieszaniny kierowana jest z powrotem do ponownego podgrzania natomiast para zostaje przekazana ku systemowi turbin. Oddzielenie wody od pary wodnej jest konieczne ze względu na ochronę turbin przez korozją i zużyciem.

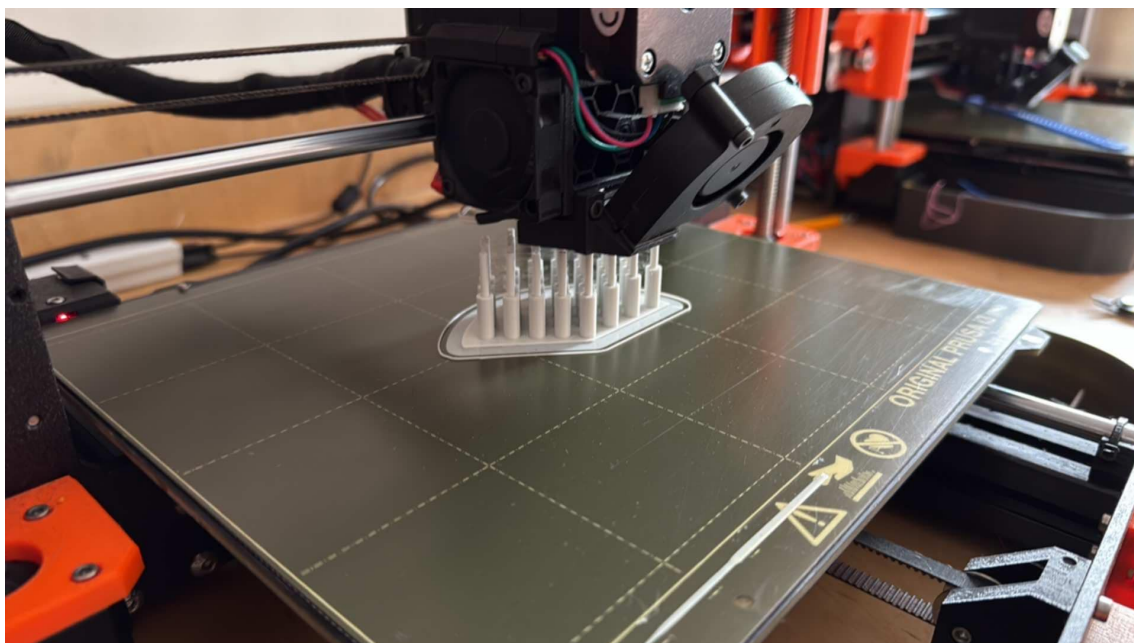


Rysunek 4: Schemat generatora pary. Rysunek z ref. [1].

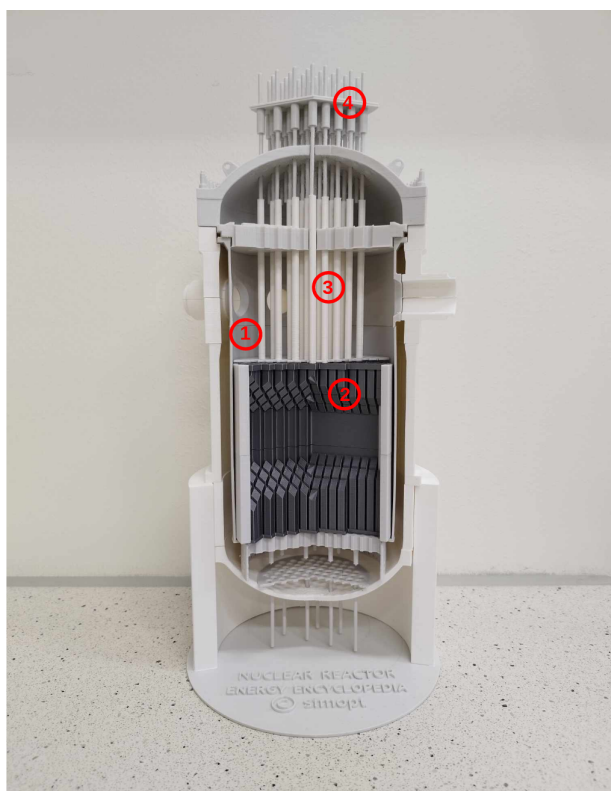
3 Część praktyczna

3.1 Druk modeli

W ramach projektu wydrukowano trzy obiekty: model reaktora PWR, generatora pary oraz model reaktora BWR. Wszystkie modele zostały pozyskane ze źródła ref. [4]. Druk przeprowadzono w Pracowni Druku 3D Makerspace na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego z wykorzystaniem drukarek Prusa i3MK3(S)-PLA. W celu dostosowania modeli do możliwości technologicznych dostępnych drukarek oraz skrócenia czasu drukowania, zostały one odpowiednio przeskalowane (70% oryginalnych rozmiarów) oraz podzielone na mniejsze fragmenty za pomocą programu Prusa Slicer (wersja 2.8.1), umożliwiając optymalizację całego procesu. Proces drukowania części modelu przedstawiony został na rysunku 5, a wydrukowane obiekty na rysunkach 6-9. Modele te wykorzystane zostały jako pomoc dydaktyczna w czasie 11-tych Dni Odkrywców Kampusu Ochota na warsztatach "Fizyka jądrowa — od medycyny do reaktorów".



Rysunek 5: Proces druku modelu mechanizmu napędu prętów kontrolnych reaktora PWR.



1. Zbiornik ciśnieniowy.
2. Rdzeń reaktora.
3. Pręty kontrolne.
4. Napędy zestawów prętów regulacyjnych.

Rysunek 6: Model reaktora PWR. Skala 1:58.



1. Rdzeń reaktora.
2. Napędy zestawów prętów regulacyjnych.
3. Pręty kontrolne.
4. Osuszacz pary.
5. Separator pary.

Rysunek 7: Model reaktora BWR.



1. Wiązka U-rurek.
2. Dystrybutor wody.
3. Kolektor osadów.
4. Pierwotny separator wilgoci.
5. Wtórny separator wilgoci.

Rysunek 8: Model generatora pary. Skala 1:68.



Rysunek 9: Wydrukowane modele. Od lewej: reaktor BWR, generator pary, reaktor PWR.

Bibliografia

- [1] IAEA International Atomic Energy Agency. *What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power*. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power>. Dostęp: Luty 2025.
- [2] Andrzej Strupczewski. *Podstawy bezpieczeństwa energetyki jądrowej*. Materiały z wykładów, Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ). 2018.
- [3] NCBJ Narodowe Centrum Badań Jądrowych. *Nieco historii reaktorów*. <https://ncbj.edu.pl/reaktory/nieco-historii-reaktorow>. Dostęp: Luty 2025.
- [4] Energy Encyclopedia. *PWR Nuclear Reactor, BWR Nuclear Reactor, Steam Generator*. <https://www.energyencyclopedia.com/en/free-downloads/3d-printing>. Dostęp: Luty 2025.