

■ Prof. dr hab. inż. arch. Wacław Gudowski,
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
Royal Institute of Technology,
Doradca Orlen Synthos Green Energy

SMR

Czyli jak mały jest mały reaktor?

Tytuł tego artykułu brzmi dla wielu czytelników jak oksymoron. Przyjrzyjmy się więc tej tezie bardziej uważnie. Najpierw musimy podkreślić, że określenie SMR (ang. *Small Modular Reactors*), czyli po polsku małe modułowe reaktory to pojęcie bardzo, bardzo szerokie. Mówi ono tylko i aż tyle, że reaktory SMR są o mniejszej mocy, czyli są fizycznie mniejsze od reaktorów budowanych przez ostatnie kilkadziesiąt lat i popularnie zwane „dużym atomem” oraz, że są wysoce zmodularyzowane.

Modułowość, czy modularyzacja oznacza, że większość komponentów jest ustandaryzowana i produkowana „na taśmach fabrycznych”. Proces budowy SMR-a to bardziej składanie gotowych elementów, niż duży plac budowy.

Ponadto modułowość może oznaczać także możliwość podłączania kilku „modułów” energetycznych do tej samej tzw. wyspy konwencjonalnej, czyli do turbiny wraz z generatorem. Modułowość i mniejszy rozmiar przekłada się na kró-

tszy czas budowy, niższy próg finansowy oraz możliwość stopniowej rozbudowy elektrowni, czy elektrociepłowni wraz ze wzrostem zapotrzebowania. Ponadto planowany czas pracy SMR-ów to ponad 60+ lat, kilkukrotnie dłuższy niż dla

innych technologii generowania energii. Praktyka technologii jądrowej pokazuje również, że rzeczywisty czas życia reaktorów wynosił w większości przypadków na świecie ponad 150% planowanego czasu. Dlatego rzeczywisty czas eksploatacji SMR-ów w przyszłości to nie planowane 60, a nawet 80-90 lat. Rzadko która technologia energetyczna oferuje rozwiązania z tak długim czasem eksploatacji.

Istota „małych modułowych” technologii jądrowych

Termin SMR nie mówi nam natomiast nic na temat konkretnej technologii jądrowej, kryjącej się pod tą nazwą. Technologia jądrowa, w pewnym uproszczeniu, określona jest tym, jakie paliwo jądrowe i jaka forma chłodziwa zastosowana jest w konstrukcji reaktora. Chłodziwo - to medium, substancja, która odbiera i transportuje ciepło z paliwa jądrowego w rdzeniu reaktora do turbiny, czyli do wyspy konwencjonalnej, bądź transportuje ciepło bezpośrednio do użytkownika.

Używając terminu **SMR**, jest podobnie, gdy mówimy „samochód”. Czy można podać cenę i ocenić dojrzałość technologiczną pytając o „samochód”? Nie można, gdyż trzeba określić, czy mówimy np. o samochodzie na benzynę, na ropę, czy o samochodzie elektrycznym, czy też o samochodzie napędzanym wodorem. Musimy także określić markę samochodu, który chcemy ocenić - jakość i technologie są różne. **SMR-y są bardzo zróżnicowane** jeśli chodzi o zastosowane technologie jądrowe. Można je podzielić wstępnie na:

- SMR-y oparte na technologii chłodziwa, którym jest zwykła woda nazywana żargonowo technologią lekkowodną, a paliwem jest standardowe paliwo jądrowe, takie jak w „dużym atomie”, czyli tlenek niskowzbogaconego uranu. Naturalny uran, aby stać się paliwem jądrowym musi być wzbogacony

w swój izotop uran-235 do poziomu ok. 5%. Naturalny uran zawiera tylko 0.7% izotopu uranu-235, czyli trzeba tę zawartość zwiększyć 7-krotnie. Uran wzbogacony do 5% dostępny jest obecnie na rynku paliw jądrowych.

- SMR-y oparte na technologii chłodziwa, którym jest gaz szlachetny hel. SMR-y te nazywane są wysokotemperaturowymi reaktorami chłodzonymi gazem (po angielsku - *High Temperature Gas Cooled Reactors* - HTGR). Ich specyficzną cechą jest paliwo jądrowe nazywane TRISO (skrót od angielskiej nazwy „potrójne struktury - jednorodne”), w formie kuleczek wielkości ziarnka maku, bardzo odporne na wysokie temperatury do 1600°C. Ponadto rdzeń reaktora, w postaci sześciokątnego graniastopu, zbudowany jest z grafitu odpornego również na bardzo wysokie temperatury. Inną formą rdzenia jest tzw. złożo usypane, czyli rdzeń reaktora usypany z kul grafitowych wielkości piłek tenisowych,

ciekłym ołowiem lub eutektycznym stopem bizmutu i ołowiu. SMR-y „ciekłometaliczne” mogą używać różnych typów paliwa jądrowego, ale paliwa te muszą być wzbogacone w uran-235 lub w pluton do prawie 20%. Paliwa takie nie jest obecnie dostępne na rynku paliwa jądrowego. Ważną cechą SMR-ów chłodzonych ciekłym metalem jest ich potencjał do powielania paliwa, czyli do produkcji większej ilości paliwa jądrowego niż same zużywają. Nie jest to jakieś perpetuum mobile, tylko zamiana poprzez reakcje z neutronami w rdzeniu reaktora izotopu uranu-238, który nie jest paliwem jądrowym, na pluton, który jest paliwem jądrowym. To taka „magia” fizyki jądrowej, która może zapewnić dostęp do paliwa jądrowego i do energii jądrowej na **tysiące lat!**

- SMR-y chłodzone ciekłymi solami. Te sole to np. fluorki lub chlorki berylu i litu, które są świetnym materiałem do transportu ciepła, jak również mogą rozpuszczać w so-

”

Technologia jądrowa, w pewnym uproszczeniu, określona jest tym, jakie paliwo jądrowe i jaka forma chłodziwa zastosowana jest w konstrukcji reaktora. Chłodziwo - to medium, substancja, która odbiera i transportuje ciepło z paliwa jądrowego w rdzeniu reaktora do turbiny, czyli do wyspy konwencjonalnej, bądź transportuje ciepło bezpośrednio do użytkownika

zawierających w sobie cząsteczki paliwa TRISO. Ciepło z rdzenia w obydwu przypadkach odbierane jest przez bardzo szybki przedmuch helu. Paliwo TRISO w tych reaktorach wymaga wzbogacenia uranu w 235-U powyżej 10% i nie jest obecnie dostępne na rynku paliw jądrowych.

- Bardzo szeroką grupą projektów są SMR-y chłodzone ciekłym metalem. Mogą to być SMRy chłodzone albo ciekłym sodem, albo

bie fluorki lub chlorki uranu lub plutonu, stając się w ten sposób „ciekłym paliwem jądrowym”. Ciekłe paliwo jądrowe to „marzenie fizyka jądrowego”, ale „koszmar inżyniera jądrowego” - tyle trudnych problemów inżynierskich do rozwiązania! Są też projekty SMR-ów na ciekłych solach bez rozpuszczania paliwa jądrowego, a zamiast tego użycia paliwa TRISO w postaci kulek o wielkości piłeczki pingpongowej unoszących się w ciekłej soli. Wiele elementów

reaktorów na stopionych solach trzeba jeszcze dokładnie przebadać, aby takie reaktory były licencjonowalne w Polsce.

Pomijając kilka bardziej egzotycznych pomysłów, te cztery powyższe kategorie to jest to, co rozumie się pod nazwą SMR. Kategorie te - bez wchodzenia w detale - mają bardzo różny stopień dojrzałości technologicznej i w konsekwencji dość różny horyzont czasowy. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) (np. „*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*” 2022) i Agencja Energii Atomowej NEA/OECD, prowadzą ciągłą ocenę dojrzałości technologicznej SMR-ów i ubiegłoroczny raport „*The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Volume I and II*”, ocenia dojrzałość technologiczną SMR-ów właśnie w tej kolejności, jak przedstawione powyżej. **Czyli technologia SMR oparta na sprawdzonej technologii reaktorów chłodzonych wodą, jest najbardziej dojrzała i wdrożenia w perspektywie czasu do 10 lat.**

Chcąc przeprowadzić wiarygodną analizę kosztów SMR-ów, porównując to raz jeszcze do samochodów, trzeba się zdecydować, czy mówimy o mercedesie, czy o fiacie... Koszty, w zależności od typu samochodu tej samej technologii, mogą być bardzo różne, biorąc

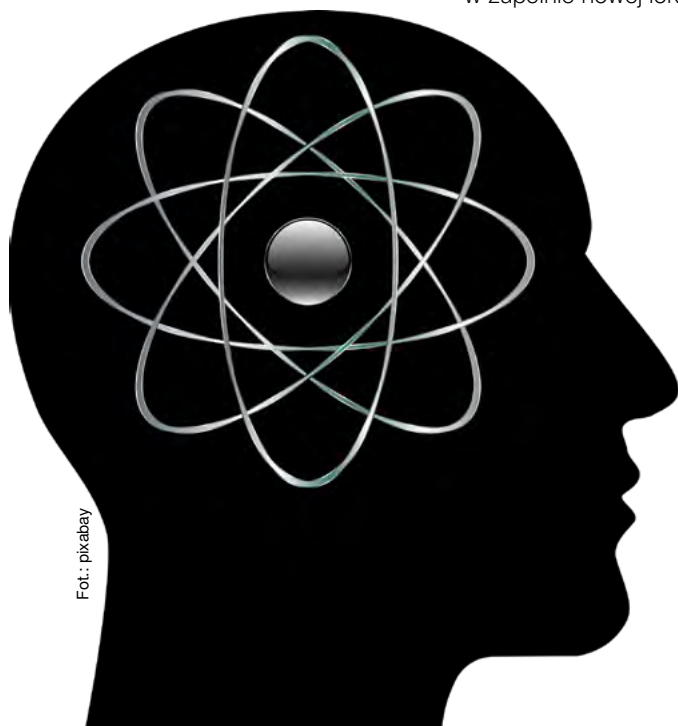
pod uwagę model i markę. Podobnie jest z SMR-ami technologii reaktorów chłodzonych wodą - jest wiele modeli tych reaktorów, wielu dostawców i różne horyzonty czasowe. Dokładna analiza potrzeb polskiej transformacji energetycznej wykonana wraz z renomowaną firmą audytorsko-doradczą KPMG, dochodzi do następujących wniosków:

- Podstawowym wyzwaniem dla polskiego sektora elektroenergetycznego jest transformacja w kierunku rozwiązań niskoemisyjnych, w związku z wygaszaniem starych bloków węglowych, których średni okres eksploatacji to 48 lat i ich czas życia dobiega nieubłagane technologicznego końca.
- SMR o mocy ok. 300 MW_{el} mogą optymalnie zastąpić wygaszane elektrownie węglowe. Zarówno lokalizacje, jak i infrastruktura wykorzystywana przez obecne elektrownie węglowe, nadaje się do adaptacji na potrzeby budowy reaktorów SMR.
- Wykorzystanie części elementów elektrowni węglowej, takich jak teren, budynki, przyłączenia do sieci przesyłowych, stacje transformatorowe oraz infrastruktura chłodząca, pozwoli zaoszczędzić do **30% kosztów** w porównaniu do budowy SMR w formule greenfield, czyli w zupełnie nowej lokalizacji.

- Sektor ciepłowniczy oparty w 70% na węglu, czeka radykalna modernizacja związana z dostosowaniem do Dyrektywy IED (*Industrial Emissions Directive*), czyli Dyrektywa Emisji Przemysłowych.
- Osiągnięcie statusu efektywnych sieci ciepłowniczych oraz uniknięcie emisji zanieczyszczeń z ograniczonym wykorzystaniem gazu, jest możliwe poprzez wykorzystanie SMR jako źródła kogeneracyjnego.
- Koszt ciepła wytworzonego w kogeneracji z SMR jest niezależny od wahań cen węgla, gazu i uprawnień do emisji CO₂, przez co oferuje stabilną cenę dla odbiorców końcowych.
- Najbardziej dojrzałe technologie SMR mogą odgrywać kluczową rolę w elektryfikacji krajowego przemysłu (np. wprowadzając piece elektryczne w hutnictwie). Z kolei bezpośrednie wykorzystanie pary technologicznej o niższych parametrach, będzie możliwe w ograniczonej liczbie procesów przemysłowych (głównie w przemyśle papierniczym), ale we współpracy z innymi konwencjonalnymi źródłami ciepła, para technologiczna może mieć szersze zastosowania (np. w przemyśle chemicznym).
- Wraz z postępowaniem i dojrzewaniem technologii SMR, nowe typy reaktorów o wyższych parametrach pary będą mogły znaleźć zastosowanie w dekarbonizacji kolejnych gałęzi przemysłu (np. produkcji wodoru, cementu, czy szkła).

Kwestie ekonomiczne „małego atomu”

Mając na uwadze powyższe wnioski, przyjrzyjmy się bliżej analizie ekonomicznej dla konkretnego typu reaktora SMR - BWRX-300. Chcąc być wiarygodni w tej analizie, musimy być konkretni, a reaktor technologii BWRX-300 odpowiada bardzo dobrze potrzebom polskiej transformacji energetycznej. Oszacowany został wpływ ekonomiczny reaktora BWRX-300



Fot.: pixabay

za pomocą uznanego modelu ekonomicznego zwanego „Input-Output”. Model ten umożliwia analizę zależności między gałęziami gospodarki oraz pozwala oszacować wpływ działalności na całą polską gospodarkę. Wpływ ten został oszacowany dla następujących kategorii: **wartość dodana brutto, wynagrodzenia oraz zatrudnienie**.

Ponadto wyróżnia się trzy poziomy wpływu ekonomicznego: bezpośredni - wynikający z bezpośrednich działań jednostki SMR, pośredni - wynikający z działalności dostawców i poddostawców oraz indukowany - wynikający z do-

nerować rocznie 746 mln PLN wartości dodanej brutto, 73 mln PLN wynagrodzeń oraz utrzymać 737 stanowisk pracy rocznie. W standardowym roku w fazie operacyjnej elektrownia z jednym reaktorem utrzymywać będzie 100 miejsc pracy. Przez cały okres eksploatacji (60 lat) elektrownia z jednym reaktorem może wygenerować wartość dodaną brutto w wysokości 20,9 mld PLN i przyczynić się do wzrostu wynagrodzeń szacowanych na **2,0 mld PLN**.

Ciekawym tematem są także wpływy podatkowe. Szacowany jest roczny

cowane efekty mogą zostać zwielokrotnione. Faza inwestycyjna dla budowy floty 4, 10 i 30 reaktorów może wygenerować kolejno 11 100, 25 500 oraz 73 400 mln PLN wartości dodanej, 4 250, 9 700 oraz 28 000 mln PLN wynagrodzeń, jak również utrzymać rocznie przez okres trwania fazy 9 550, 21 900 oraz 63 050 miejsc pracy. Podczas jednego uśrednionego roku eksploatacji flota 4, 10 i 30 reaktorów może wygenerować kolejno 3 000, 7 000 oraz 22 000 mln PLN wartości dodanej, 300, 700 oraz 2 000 mln PLN wynagrodzeń, utrzymać rocznie 3 000, 7 000 oraz 22 000 miejsc pracy oraz wygenerować wpływy z podatków na poziomie 400, 900 oraz 3 000 mln PLN.

Należy także zwrócić szczególną uwagę na korzyści pozafinansowe. Szacowane efekty ekonomiczne nie ograniczają się jedynie do wartości pieniężnych. Perspektywa budowy całej floty reaktorów oznacza zwiększenie zapotrzebowania na wysoko wykwalifikowanych pracowników. Planowane są programy szkolenia kadr technicznych dla energetyki jądrowej oraz współpraca ze środowiskiem akademickim, celem uruchomienia nowego kierunku studiów. I to, co najważniejsze - flota reaktorów BWRX-300 zwiększy radykalnie bezpieczeństwo energetyczne Polski. Ale to już oddzielny temat podobnie jak ogromne korzyści środowiskowe.

Podsumowując, wymierne korzyści przewyższają koszty. A jeśli ktoś dalej nie wierzy, niech spojrzy na Szwecję, czy Francję: inwestycja w energetykę jądrową w tych krajach w początkach lat 70. zeszłego wieku była motorem rozwoju i dobrobytu tych krajów. A obecnie są jedyną „deską ratunku” dla stabilizacji bardzo nadwyrężonej europejskiej sieci energetycznej. □

” Ponadto wyróżnia się trzy poziomy wpływu ekonomicznego: bezpośredni - wynikający z bezpośrednich działań jednostki SMR, pośredni - wynikający z działalności dostawców i poddostawców oraz indukowany - wynikający z dodatkowej konsumpcji i działalności pozazawodowej pracowników

datkowej konsumpcji i działalności pozazawodowej pracowników. Dodatkowo zostały oszacowane potencjalne wpływy podatkowe, z wyszczególnieniem wpływów do jednostek samorządów terytorialnych. Okres wpływu podzielono na dwie fazy - fazę inwestycyjną trwającą 7 lat, w ramach której prace budowlane trwają około 3 lata oraz fazę operacyjną trwającą 60 lat. Analiza szacuje wpływ ekonomiczny generowany przez jeden referencyjny reaktor BWRX-300 oraz multiplikację wyników przy budowie floty 4, 10 oraz 30 reaktorów z uwzględnieniem krzywej uczenia. **Faza inwestycyjna** jednego referencyjnego reaktora może wygenerować łącznie w ciągu całej fazy 3,2 mld PLN wartości dodanej brutto, 1,2 mld PLN wynagrodzeń i może utrzymać rocznie 2 719 miejsc pracy. **Faza operacyjna** może z kolei wyge-

wpływ z podatku PIT przy jednym referencyjnym reaktorze na poziomie ponad 8 mln PLN, z czego ponad 4 mln PLN to potencjalny wpływ dla jednostek samorządu terytorialnego. Potencjalny roczny wpływ z podatku CIT szacowany jest na poziomie ponad 80 mln PLN, w tym prawie 19 mln PLN wpłynęłoby do budżetów samorządów. Potencjalny wpływ z podatku od nieruchomości zasiliłby budżet gminy o ok. 360 tys. PLN rocznie. Łączny potencjalny wpływ do budżetu gmin z tytułu podatków wynosi około 9,0 mln PLN w skali roku. W przypadku, gdyby pełna wartość budowli podległa opodatkowaniu podatkiem od budowli, mogłoby to oznaczać dodatkowe wpływy do budżetu gminy w wysokości 12 mln PLN w skali roku.

W przypadku budowy niezbędnej Polsce floty reaktorów BWRX-300, osza-