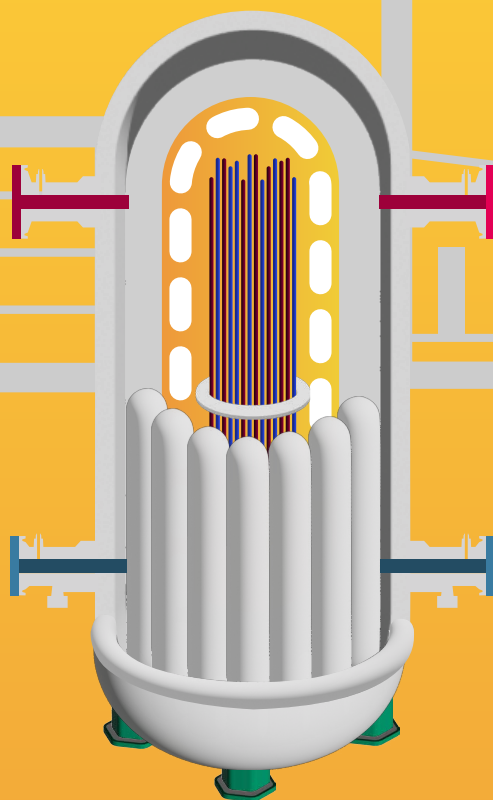




Polski  
Instytut  
Ekonomiczny

CZERWIEC 2023

WARSZAWA



ISBN 978-83-67575-31-7

# Perspektywy wykorzystania reaktorów SMR w polskiej transformacji energetycznej

Cytowanie: Juszczak, A. (2023), *Perspektywy wykorzystania reaktorów SMR w polskiej transformacji energetycznej*, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa.

Warszawa, czerwiec 2023 r.

Autor: Adam Juszczak

Komitet sterujący: dr inż. Piotr Darnowski, dr inż. Paweł Gajda, Maciej Lipka, Łukasz Sawicki

Redakcja merytoryczna: Piotr Arak, Magdalena Maj, Paweł Śliwowski

Redakcja: Jakub Nowak, Małgorzata Wieteska

Projekt graficzny: Anna Olczak

Skład i łamanie: Tomasz Gałązka

Współpraca graficzna: Sebastian Grzybowski

Polski Instytut Ekonomiczny

Al. Jerozolimskie 87

02-001 Warszawa

© Copyright by Polski Instytut Ekonomiczny

ISBN 978-83-67575-31-7

# Spis treści

Kluczowe liczby . . . . .	4
Kluczowe wnioski . . . . .	5
Wprowadzenie . . . . .	7
1. Obecny stan rozwoju technologii . . . . .	9
2. Zalety i wady SMR. Możliwości zastosowania w przyszłości . . . . .	15
2.1. Wykorzystanie SMR w przemyśle . . . . .	17
2.2. Wykorzystanie SMR do produkcji ciepła systemowego . . . . .	18
2.3. Wykorzystanie SMR do produkcji wodoru . . . . .	20
3. Małe reaktory jądrowe w oczach ekspertów – wyniki badania ankietowego . . . . .	23
3.1. Tezy delfickie (I część badania) . . . . .	23
3.2. Pozostałe pytania ankietowe (II część badania) . . . . .	32
Podsumowanie . . . . .	40
Rekomendacje . . . . .	42
Aneks metodologiczny . . . . .	44
Metodyka badań . . . . .	44
Próba badawcza . . . . .	46
Bibliografia . . . . .	48
Spis ramek, rysunków, tabel i wykresów . . . . .	52

# Kluczowe liczby

## 3 reaktory SMR

funkcjonujące w modelu kogeneracji (w którym jednostka wytwarza jednocześnie ciepło i energię elektryczną) mogą zapewnić 60 proc. ciepła systemowego potrzebnego Warszawie

## połowa

badanych ekspertów wyraża opinię, że produkcja przynajmniej 20 proc. ciepła systemowego przez SMR dla największych polskich aglomeracji będzie mieć duże znaczenie dla transformacji energetycznej w Polsce

## 67 proc. ekspertów

widzi szanse na to, że SMR będą w przyszłości zaspokajać przynajmniej 20 proc. zapotrzebowania 10 największych polskich aglomeracji na ciepło systemowe

## 42 proc.

ekspertów uważa, że moc zainstalowana bloków SMR w Polsce przekroczy 5 GWe między 2041 a 2045 r.

## 88 proc.

ekspertów uważa, że akceptacja społeczna dla instalacji SMR będzie na podobnym lub wyższym poziomie w porównaniu do wielkoskalowej energetyki jądrowej

## 4,4 pkt.

w skali od 0 do 5 wynosił wskaźnik znaczenia wysokich cen uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> dla rozwoju technologii SMR w Polsce (najwyżej oceniany czynnik)

## ponad 70 projektów

różnych reaktorów SMR jest obecnie rozwijanych na świecie, większość z nich ciągle na etapie projektowania (konceptyjnego lub zaawansowanego)

## ponad 100 reaktorów SMR

według oficjalnych zapowiedzi ma być wybudowanych w Polsce

## 10:1

wynosi proporcja zwolenników wykorzystania najnowszych technologii jądrowych do produkcji energii elektrycznej w Polsce w stosunku do jej przeciwników

# Kluczowe wnioski

- **Celem tego raportu jest prezentacja opinii ekspertów dotyczącej tempa rozwoju projektów SMR w Polsce.** Rosyjska agresja w Ukrainie wymusiła konieczność wprowadzenia zmian w polityce energetycznej. Przy rozpoczętym procesie inwestycyjnym wielkoskalowych elektrowni w naszym kraju i ogromnym zainteresowaniu realizacją projektów SMR warto przeanalizować potencjalne problemy przy realizacji tego typu projektów. Mają one kluczowe znaczenie w przypadku realizacji Polityki Energetycznej Polski do 2040 r. i będą jednym z elementów zwiększających suwerenność energetyczną naszego kraju.
- Ocena dynamiki rozwoju SMR i ich znaczenia w transformacji energetycznej na świecie jest bardzo zróżnicowana. **Według najbardziej optymistycznych prognoz Agencji Energetyki Jądrowej moc zainstalowana bloków SMR w 2050 r. może przekroczyć 375 GWe.**
- **W opinii ekspertów ankietowanych przez PIE, najważniejszą rolą SMR w polskiej transformacji energetycznej może być ich wykorzystanie w produkcji ciepła systemowego.** Najmniejsze znaczenie w transformacji będzie z kolei miał udział SMR w produkcji niskoemisyjnego wodoru.
- **Wielu ekspertów wskazuje, że budowa reaktorów SMR – choć może odegrać istotną rolę w procesie dekarbonizacji – nie zastąpi konieczności inwestycji w OZE i wielkoskalową energetykę jądrową.** Zwracają oni uwagę, że choć istnieje potencjał wykorzystania SMR do produkcji energii elektrycznej (głównie na potrzeby własne przemysłu) i ciepła (zarówno systemowego, jak i przemysłowego), to w krajach zachodnich nie uruchomiono jeszcze ani jednego takiego reaktora. Z tego powodu eksperci podchodzili z pewnym sceptycyzmem do zapowiedzi budowy pierwszych reaktorów SMR w Polsce jeszcze przed 2030 r. – 58 proc. ekspertów wskazywało, że ich zdaniem zostaną one uruchomione w latach 2036–2040. Kluczowe dla weryfikacji tych terminów będą postępy realizacji projektów w USA, Kanadzie, Wielkiej Brytanii i tych krajach UE, które rozpoczęły działania mające na celu wdrożenie technologii SMR (Francja i Rumunia).
- **Jako najistotniejsze czynniki wspierające szybki rozwój SMR eksperci wskazują przede wszystkim wysokie ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> i wysokie ceny paliw kopalnych.** Za najmniej istotne uważają z kolei wsparcie z funduszy unijnych.

- **Zdaniem ekspertów największe bariery mogące spowolnić rozwój SMR w Polsce to przede wszystkim długie procedury (proces uzyskiwania zgód i pozwoleń na budowę reaktorów), brak zasobów kadrowych i wysoki koszt inwestycji.** Ponadto nie bez znaczenia jest brak doświadczenia polskich firm w realizacji inwestycji w energetykę jądrową i możliwe opóźnienia wynikające z młodego wieku technologii i wysokiego popytu na rynku europejskim, który może przewyższyć możliwości terminowej realizacji zamówień przez producentów.
- **Za najmniej istotną barierę eksperci uznali potencjalny sprzeciw społeczny wobec budowy SMR** – aż 88 proc. ekspertów uważa, że akceptacja społeczna dla SMR będzie na podobnym lub wyższym poziomie, jak w przypadku wielkoskalowej energetyki jądrowej. Poparcie dla wykorzystania najnowszych technologii jądrowych do produkcji energii elektrycznej w badaniach opinii publicznej wynosi w Polsce 84 proc. – o 15 pkt. proc. więcej niż we Francji i Szwecji i o 23 pkt. proc. więcej niż w USA.
- **Przedstawiciele największych miast w Polsce podchodzą do technologii SMR mniej entuzjastycznie niż opinia publiczna.** Nie wykluczali wykorzystania tej technologii w przyszłości, zwłaszcza do produkcji ciepła w kogeneracji. Zaznaczali jednak, że obecnie nie rozważa się takiej możliwości, nawet w strategiach długoterminowych, z powodu braku technologii na rynku i potencjalnych wysokich kosztów instalacji. **Nawet w przypadku najbogatszych polskich miast – Warszawy czy Gdańska – istnieje oczekiwanie, że inwestycja taka byłaby w większości finansowana przez władze centralne lub największe spółki energetyczne.**

# Wprowadzenie

**Potrzeba szybkiej transformacji energetycznej wymusiła powrót do idei stosowania mniejszych jednostek wytwarzania energii. Dynamiczny wzrost odnawialnych źródeł energii – zwłaszcza fotowoltaiki i wiatraków – pokazał, że obok ogromnych inwestycji energetycznych realizowanych głównie przez państwo, potrzebne są jednostki wytwarzania energii, które ze względu na znacznie mniejszą skalę mogą być budowane w projektach finansowanych przez prywatnych inwestorów.**

Energetyka jądrowa nie cieszyła się w ostatnich dekadach dużym zainteresowaniem prywatnych inwestorów ze względu na wysoki koszt budowy wielkoskalowych elektrowni i długi czas realizacji inwestycji. Reaktory SMR mogą odwrócić ten trend. Zbiór obecnie projektowanych jednostek rozciąga się od mikroreaktorów o mocy kilku MW po reaktory o mocy kilkuset MW. Istotną zaletą będzie także modularyzacja części elementów, które mają trafiać na budowę w formie gotowych do instalacji modułów (Mignacca, Giorgio, Sainati, 2020; Lipka, 2020)<sup>1</sup>. Ma to według zapowiedzi producentów znacząco zmniejszyć także czas wykonania inwestycji.

Wiele krajów – w tym Kanada, USA, Francja i Wielka Brytania – zapowiedziało publiczne wsparcie rozwoju tej technologii. Także w Polsce widoczne jest bardzo wysokie zainteresowanie SMR – w momencie publikacji tego raportu liczba reaktorów SMR w deklaracjach wszystkich krajowych podmiotów przekracza 100<sup>2</sup>. Według zapowiedzi reaktory SMR mają być także uwzględnione w aktualizacji Polityki Energetycznej Polski do 2040 r. (www1). Można także spotkać się z mniej entuzjastycznymi opiniami ekspertów, którzy wskazują, że większość projektów jest na wczesnym etapie rozwoju. Specjaliści przypominają także, iż projekty jądrowe, zwłaszcza tzw. FOAK (First of a Kind), zwykle wiążą się z opóźnieniami w realizacji.

Obserwując potrzebę udzielenia odpowiedzi na liczne pytania dotyczące technologii SMR i jej rosnące znaczenie w debacie publicznej, zdecydowaliśmy się na zbadanie potencjału, jaki mogą mieć reaktory SMR w przyszłości transformacji energetycznej Polski. Zależało nam zwłaszcza na zebraniu i zagregowaniu opinii ekspertów w dziedzinie energetyki, które w naszej opinii nie są w tej debacie wystarczająco mocno wyeksponowane. W pierwszym rozdziale omawiamy obecny stan technologii wraz z działaniami prowadzonymi

<sup>1</sup> Należy zaznaczyć, że dotyczy to jedynie części elementów (np. układy wytwarzania pary). Proces budowy większości reaktorów SMR według zapowiedzi nadal ma trwać 2-4 lata. Warto dodać, że modularyzację stosowano w branży jądrowej już od lat 60 XX wieku i miała ona stosunkowo duże znaczenie np. przy budowie reaktorów AP1000 w Sanman.

<sup>2</sup> Łączna liczba reaktorów według zapowiedzi m.in. Orlen Synthos Green Energy, KGHM, Respect Energy, Last Energy.

w wybranych krajach Unii Europejskiej. W drugim – wskazujemy zalety i wady reaktorów SMR i dokonujemy przeglądu możliwych ich zastosowań na czele z produkcją energii dla przemysłu, wytwarzania ciepła systemowego i produkcji wodoru. W trzecim omawiamy wyniki badania ankietowego, w którym opinię na temat przyszłości reaktorów SMR w Polsce wyraziła grupa blisko 50 ekspertów. Raport kończymy podsumowaniem.

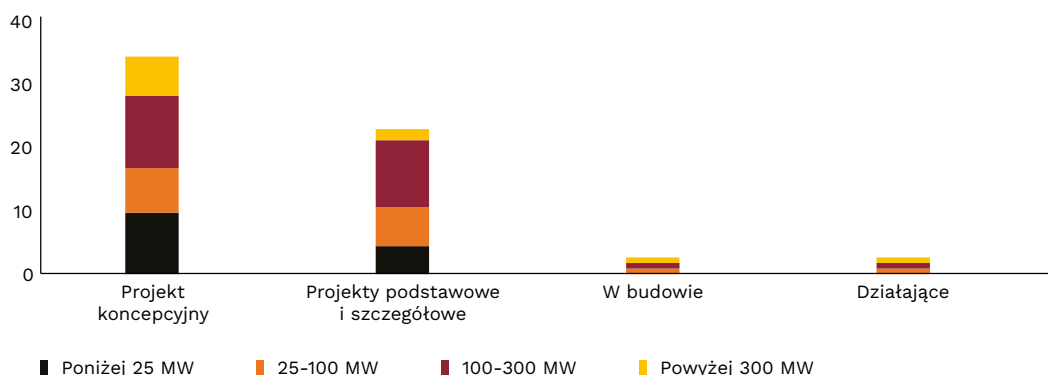


# 1. Obecny stan rozwoju technologii

Małe modułowe reaktory jądrowe (*Small Modular Reactors, SMR*) określane są przez Światowe Stowarzyszenie Energetyki Jądrowej (*World Nuclear Association, WNA*) jako reaktory o mocy elektrycznej 300 MW lub mniejszej, zaprojektowane w technologii modułowej, co ma umożliwiać seryjną produkcję i krótki czas budowy (www2). Podobnie małe modułowe reaktory jądrowe definiują Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (*International Atomic Energy Agency, IAEA, www3*) i Instytut Energii Jądrowej USA (*US Nuclear Energy Institute, NEI, www4*). Granice klasyfikacyjne pozostają jednak płynne i często do tej kategorii zaliczany jest np. reaktor Rolls-Royce SMR, który posiada moc elektryczną bloku 470 MW.

Pod koniec 2022 r. w bazie danych ARIS (*Advanced Reactors Information System*) Międzynarodowej Agencji Energetyki Jądrowej widniało ponad 40 projektów jednostek określanych jako Małe Modułowe Reaktory Jądrowe<sup>3</sup>. Są to projekty jednostek o mocy elektrycznej od 3,5 MW do 630 MW (w praktyce więc w tej kategorii znajdują się także reaktory średniej wielkości spełniające kryterium modułowości). Najwięcej projektów rozwijanych jest w USA (13) i Rosji (7). Jeśli wziąć pod uwagę nie tylko projekty na wysokim poziomie rozwoju, ale także te w początkowych fazach rozwoju, liczba ta rośnie do ok. 70 (www5).

Wykres 1. Liczba projektów SMR w podziale na poziom rozwoju projektu i wielkość reaktora (w MWe)



Źródło: opracowanie własne PIE na podstawie danych MAE.

<sup>3</sup> Według IAEA obecnie w różnych stadiach rozwoju (także początkowych) jest ponad 80 różnych koncepcji reaktorów SMR.

Projekty SMR można kwalifikować na wiele sposobów. Obecnie rozwijane projekty reaktorów różnią się pod kątem używanych chłodziw i form paliwa, a także poziomu gotowości technologicznej czy postępów w procesie licencyjnym. Większość projektów SMR można jednak zaszeregować do jednej z pięciu kategorii (OECD, 2021):

- **Jednomodułowe** (*single unit*) reaktory lekkowodne (*Light Water Reactor*, LWR), które mogą zastąpić małe jednostki na paliwa kopalne lub zostać rozmieszczone jako źródła generacji rozproszonej. Do reaktorów tego typu należą m.in. CAREM, SMART, ACP100, UK SMR (nazywany także potocznie Rolls Royce SMR) i BWRX-300.
- **Wielomodułowe** (*multi-module*) reaktory lekkowodne (LWR), które mogą być wykorzystywane jako zamiennik dla średnich mocy podstawowych (*baseload*) lub w sieci rozproszonej. Do tej kategorii należą reaktory NuScale, RITM-200 i Nuward.
- **Jednostki mobilne** (także wykorzystujące obecnie technologię LWR), które są zaprojektowane tak, by można było je przemieszczać w zależności od zapotrzebowania. Do tej kategorii należą reaktory pływające (*floating reactors*) ACPR50S i KLT-40S używany w funkcjonującej już rosyjskiej pływającej elektrowni jądrowej Akademik Łomonosow.
- **Reaktory SMR generacji IV**. Bazują na technologiach innych niż LWR i wdrażają w praktyce wiele koncepcji, które badano w ramach prac nad wielkoskalowymi reaktorami IV generacji podczas Generation IV International Forum. Większość tych projektów znajduje się jeszcze na wczesnych etapach prac koncepcyjnych. Przykładami mogą być Xe100, ARC-100, KPR, Natrium czy Westinghouse Lead Fast Reactor.
- **Mikroreaktory modułowe** (*Micro Modular Reactors*, MMR). Projekty o mocy bloku mniejszej niż 10 MWe, często wyposażone w funkcję półautomatycznej pracy. Ze względu na rozmiary charakteryzujące się lepszą mobilnością niż większe jednostki SMR. Mikroreaktory nie są zazwyczaj oparte na technologii LWR i charakteryzują się szerokim zakresem podejść technologicznych, w tym technologiami IV generacji. MMR mają być głównie przeznaczone do pracy poza siecią, w gorzej dostępnych lokalizacjach. Te reaktory także są w większości na wczesnych etapach projektowania (wyjątek stanowi mikroreaktor amerykański Aurora o mocy 2 MWe, który przechodzi proces licencyjny).

Śród projektów SMR, nad którymi prowadzone są prace, warto wymienić reaktory:

- **NuScale** – jeden z najbardziej znanych małych reaktorów jądrowych. Firma uzyskała zatwierdzenie koncepcji od Urzędu Dozoru Jądrowego USA (Nuclear Regulatory Commission) i złożyła wnioski o certyfikację w USA i Kanadzie<sup>4</sup>. Reaktory NuScale

<sup>4</sup> W 2023 r. NuScale otrzymało częściową homologację od Komisji Dozoru Jądrowego w USA, jednak dotyczy ona projektu reaktora o mocy bloku 50 MW, którego budowy spółka nie planuje. Reaktor o mocy 77 MW musi przejść oddzielny proces licencyjny (www6).

mają 77 MW mocy elektrycznej i w zamierzeniu będą oferowane w pakietach elektrowni VOYGR 4-, 6- lub 12-reaktorowej (łączna moc od 308 do 924 MWe). Jeden moduł ma ważyć ok. 700 ton i móc być transportowany w 3 częściach z fabryki na miejsce docelowe. Cykl paliwowy to 24 miesiące (www7). Pierwsza elektrownia oparta na technologii NuScale ma stanąć w USA w 2029 r.

- **Rolls Royce SMR** – znany także pod nazwą UK SMR to reaktor o mocy 470 MWe, nad którym prace rozpoczęto w 2015 r. Według zapowiedzi producenta ma powstawać w 4 lata i działać 60 lat (IAEA, 2019), a pierwszy reaktor ma zostać zbudowany we wczesnych latach 30. Projekt wyróżnia się wysokim wsparciem publicznym rządu Wielkiej Brytanii – w 2021 r. przeznaczono na niego 240 mln EUR rządowych dotacji (www8). W kwietniu 2022 r. projekt został zgłoszony do oceny do Office for Nuclear Regulation UK (ONR) (www9).
- **BWRX-300** – mały modułowy reaktor wodny wrzący (typu BWR) o mocy elektrycznej 300 MW z naturalnym obiegiem chłodzenia (www10). Pierwszy reaktor ma zostać wybudowany w elektrowni Darlington, gdzie znajduje się już funkcjonująca wielkoskalowa elektrownia jądrowa co ułatwiło uzyskanie decyzji środowiskowej i lokalizacyjnej. To według zapowiedzi GE Hitachi Nuclear Energy pozwoli na ukończenie budowy reaktora w 2028 r. i jego komercyjne uruchomienie w 2029 r. (www11).
- **CAREM-25** (Central ARgentina de Elementos Modulares) – mały reaktor jądrowy typu PWR (*Pressurised Water reactor*) o mocy bloku 32 MWe (CNEA, 2017). Oprócz zastosowania pasywnych systemów bezpieczeństwa, cały podstawowy system chłodzenia CAREM znajduje się w pojedynczym zbiorniku ciśnieniowym i wykorzystuje swobodną konwekcję do cyrkulacji chłodziwa. Eliminuje to zapotrzebowanie na pompy w obwodzie pierwotnym i zmniejsza zakres oraz złożoność wymaganego systemu rurociągów, a także ryzyko wypadków związanych z utratą chłodziwa. Prace nad projektem rozpoczęto w 2011 r., a w 2014 – budowę prototypu na terenie przylegającym do elektrowni Jądrowej Atucha (www12). Budowa reaktora została wstrzymana w 2019 r. przez wykonawcę projektu Techint Engineering & Construction z powodu opóźnień płatności ze strony rządu i zmian w projekcie (www13). Budowę wznowiono w 2020 r. i według zapowiedzi ma być zakończona w 2024 r.
- **KLT-40S** – reaktor funkcjonujący na pływającej jednostce Akademik Łomonosov (oddana do użytku w 2019 r., budowa rozpoczęta w 2007 r.). Łączna moc elektrowni to 70 MWe (2 reaktory po 35 MWe). Następcą tego projektu jest rozwijany w Rosji projekt reaktora RITM-200N. (OECD, 2016).

- **ACP100** – chiński reaktor PWR o mocy 126 MWe (385 MWt) mający według producentów wiele możliwych zastosowań (produkcja ciepła, produkcja energii elektrycznej, odsalanie wody morskiej). Badania nad nim rozpoczęto w 2010 r., a w 2016 r. projekt reaktora został pozytywnie zaopiniowany pod kątem bezpieczeństwa przez Międzynarodową Agencję Energetyki Jądrowej. Obecnie pierwszy reaktor tego typu jest w fazie instalacji na wyspie Changjiang. Budowę rozpoczęto w 2019 r. i według zapowiedzi producenta całość procesu powinna trwać nie dłużej niż 58 miesięcy (www14).
- **Nuward** – zapowiadany jako pierwszy reaktor zaprojektowany w Unii Europejskiej ma powstać we współpracy francuskiego EDF (Electricite de France) z French Alternative Energies, Atomic Energy Commission (CEA), Naval Grup i TechnicAtome. Są to reaktory PWR o mocy 170 MWe mające tworzyć elektrownie po 2 jednostki – łącznie 340 MWe (www15). Faza projektowa według zapowiedzi EDF ma zakończyć się najpóźniej do 2030 r., wliczając w to uzyskanie pełnej certyfikacji. Budowa pierwszego, demonstracyjnego reaktora Nuward ma rozpocząć się w 2030 r. i trwać 3 lata (www16).

Wartość rynku małych reaktorów jądrowych w 2020 r. wyceniana była na ok. 3,5 mld USD. Według prognoz rynku Allied Market Research do 2030 r. rynek ten wyceniany będzie już na blisko 19 mld USD. Szybkość rozwoju reaktorów SMR i zainteresowanie rynkowe, a co za tym idzie moc zainstalowana pozostają dużą niewiadomą. Według prognoz NEA w 2035 r. projekty SMR przekroczą 20 GW mocy zainstalowanej<sup>5</sup>, a w scenariuszu szybkiego rozwoju tej technologii do 2050 r. mogłoby ich powstać nawet 375 GW, co przekładałoby się na skumulowaną oszczędność 15 Gt emisji CO<sub>2</sub> (NEA,2021). Brytyjskie Narodowe Laboratorium Jądrowe (National Nuclear Laboratory) prognozuje że w 2035 r. na świecie zainstalowana moc reaktorów SMR może mieścić się w przedziale 65–85 GW (z czego 7 GW w Wielkiej Brytanii) a wartość rynku wyniesie od 285 do 456 mld EUR (www17). Instytut Energetyki Jądrowej (Nuclear Energy Institute) z USA ocenia, że moc zainstalowana SMR niezbędna do realizacji celów klimatycznych instytucji i firm z nim stowarzyszonych wyniesie 90 GW w 2050 r. (Derr, 2022).

Wiele krajów UE wyraża zainteresowanie technologią SMR. Wśród nich znajdują się:

- Belgia – w maju 2022 r. tamtejsze centrum badań jądrowych otrzymało od rządu dotację na badanie technologii SMR w wysokości 100 mln EUR (Nucleareurope, 2022),
- Bułgaria – w listopadzie 2021 r. państwowa spółka energetyczna Bulgarian Energy Holding podpisała memorandum z Fluor Corporation (związaną z NuScale) w sprawie rozwoju SMR (Nucleareurope, 2022),

<sup>5</sup> Wyniki scenariusza pozytywnego, w negatywnym w 2035 r. będziemy świadkami dalszych opóźnień w rozwoju reaktorów. W takim przypadku SMR pozostaną na etapie projektów badawczych i pilotażowych.

- Czechy – podpisane memorandum o współpracy z NuScale, GE-Hitachi, Rolls-Royce SMR, EDF, Korea Hydro and Nuclear Power i Holtec; pierwsze reaktory SMR mają stanąć na terenie elektrowni jądrowej Temelin (Nucleareurope, 2022),
- Dania – w kwietniu 2022 r. między Samsung Heavy Industries a duńską firmą Seaborg podpisano memorandum w sprawie rozwoju pływających reaktorów jądrowych (Nucleareurope, 2022),
- Estonia – projekty związane z technologią SMR są tam rozwijane od 2019 r.; Fermi Energia w lutym 2023 r. oznajmiła, że elektrownia SMR w Estonii powstanie na bazie reaktorów BWRX – 300 (www18),
- Francja – rozpoczęto prace nad reaktorem Nuward, który według zapowiedzi ma być gotowy w wersji pilotażowej w pierwszej połowie lat 30. Rząd Francji ogłosił przeznaczenie 1 mld EUR na rozwój technologii SMR 1 mld EUR do 2030 r., z czego 500 mln EUR na rozwój reaktora Nuward (Nucleareurope, 2022),
- Rumunia – pod koniec grudnia 2022 r. RoPower podpisało umowę z NuScale na początkowe założenia projektowe i inżynierskie (tzw. Front End Engineering Design, FEED). Umowa dotyczy budowy 6-modułowej jednostki VOYGR, która ma powstać w miejsce elektrowni węglowej w Doicești (www19),
- Szwecja – w lutym 2022 r. Szwedzka Agencja Energii przekazała ok. 9,4 mln EUR firmie Swedish Modular Reactors AB na wsparcie budowy demonstracyjnego modelu chłodzonego ołowiem reaktora SEALER (Swedish Advanced Lead Reactor) (www20); ponadto szwedzka firma Kärnfull Next podpisała w marcu 2022 r. porozumienie z GE Hitachi w celu dystrybucji reaktorów BWRX300, rozważana jest także budowa reaktorów SMR przy istniejącej elektrowni jądrowej Ringhals.

W Polsce reaktory SMR także cieszą się dużym zainteresowaniem. W 2022 r. PKN Orlen i Synthos S.A. założyły wspólną spółkę celową Orlen Synthos Green Energy S.A. (OSGE) mającą odpowiadać za przygotowanie i komercjalizację SMR w Polsce. Spółka podpisała porozumienie technologiczne z GE Hitachi Nuclear Energy (reaktory BWRX-300) i porozumienia ze spółkami będącymi dostawcami komponentów elektrowni. Według zapowiedzi OSGE około 50 proc. wydatków związanych z budową elektrowni opartych na reaktorach BWRX-300 może zostać zakontraktowane przez ponad 300 polskich przedsiębiorstw (www21). Według zapowiedzi OSGE chce wybudować aż 76 reaktorów w 26 lokalizacjach, z czego pierwszy ma powstać w latach 2028-2029 (www22; www23). W lipcu 2022 r. złożono wniosek o ocenę technologii do Państwowej Agencji Atomistyki (www24).

Także koncern KGHM zapowiada inwestycję w reaktory SMR. W przeciwieństwie do OSGE, jest to inwestycja mająca zaspokoić wyłącznie zapotrzebowanie własne KGHM na energię elektryczną, który zużywa rocznie ok. 3 TWh (Pieńkowski, 2022). KGHM planuje budowę 6- lub 12-modułowych elektrowni VOYGR opartych na reaktorach NuScale o mocy 77 MWe każdy. Zgodnie z zapowiedziami pierwszy z bloków ma działać już w 2029 r. W lipcu 2022 r.

KGHM złożył wniosek o ocenę technologii do Państwowej Agencji Atomistyki, a we wrześniu 2022 r. podpisał porozumienie o współpracy w sprawie rozwoju reaktorów NuScale z rumuńskim operatorem elektrowni jądrowych SN Nuclearelectrica. Współpraca, mająca potrwać 36 miesięcy, ma na celu wymianę doświadczeń i wiedzy w zakresie technicznym, ekonomicznym, prawnym, finansowym i organizacyjnym (www25).

W Polsce zainteresowanie reaktorami SMR jest wyrażane także przez inne firmy, np. Ciech (www26), UNIMOT (www27) czy Respect Energy, który podpisał umowę o współpracy z francuskim EDF dotyczącą rozwoju reaktorów Nuward (www28). W ostatnim roku kilka polskich podmiotów (Enea, Katowickie i Legnickie Specjalne Strefy Ekonomiczne) podpisało także porozumienia z amerykańską firmą Last Energy o budowie reaktorów PWR-20 (www29).

# 2. Zalety i wady SMR.

## Możliwości zastosowania w przyszłości

Wśród zarzutów podnoszonych przeciwko rozwijaniu wielkoskalowej energetyki jądrowej jest wysoki koszt i długi czas realizacji. Dwureaktorowa elektrownia jądrowa, bazująca na dostępnych obecnie technologiach, ma moc od 2,2 do 3,3 GW i produkuje rocznie 17-26 TWh, kosztując ok. 20 mld PLN za 1 GW<sup>6</sup>. W praktyce tak duża inwestycja jest niezwykle trudna do zrealizowania dla każdego inwestora, poza państwem.

Małe reaktory jądrowe mają odpowiadać na te wyzwania, dzięki zaletom, do których mają według zapowiedzi producentów należeć:

- **Wysoka elastyczność inwestycji.** Duża liczba projektów – od bardzo małych reaktorów do średnich – daje duże możliwości dopasowania projektu do potrzeb inwestora. Jednocześnie reaktory SMR mogą być wybudowane w większej liczbie potencjalnych lokalizacji niż wielkoskalowa energetyka jądrowa (OECD, 2021).
- **Wysokie bezpieczeństwo.** Mniejsze moce reaktorów umożliwiają uproszczenie układów bezpieczeństwa i mogą skutkować nieco mniejszymi strefami planowania awaryjnego i obszarami ograniczonego użytkowania wokół tych obiektów jądrowych. Według zapowiedzi ma też zmniejszyć się częstotliwość uzupełniania paliwa. Obecne wielkoskalowe reaktory muszą mieć uzupełniane paliwo raz na 1-2 lata. W przypadku niektórych projektów SMR-ów może to być nawet raz na 3 do 7 lat (Lliou, 2021).
- **Modułowość.** Mniejsze rozmiary i waga ma pozwalać na produkcję seryjną większej liczby elementów, które mogą być dowożone i montowane na miejscu (zamiast budowania od podstaw w docelowej lokalizacji, jak w przypadku dużych reaktorów jądrowych). Modułowość samych elektrowni składających się z kilku lub kilkunastu bloków o niewielkiej mocy zmniejsza ryzyko blackoutu w przypadku tymczasowego wyłączenia jednego z modułów z eksploatacji i ułatwia planowanie modernizacji oraz wymiany paliwa.

<sup>6</sup> Obliczenia własne PIE.

- **Niższy koszt i szybszy czas budowy obiektu** zmniejszają ryzyko, na jakie narażeni są inwestorzy. To umożliwi przyciągnięcie prywatnego kapitału – zarówno inwestującego w małe reaktory na potrzeby własne (przemysł), jak i inwestorów mających na celu odsprzedaż energii (np. fundusze inwestycyjne) (OECD, 2021).

Dzięki szerokim możliwościom, jakie daje model kogeneracji, modułowe reaktory jądrowe mogą być wykorzystywane jako elektrownie stabilizujące odnawialne źródła energii, służąc m.in. do produkcji wodoru i odsalania wody, gdy występuje nadmiarowa podaż energii z OZE w stosunku do zapotrzebowania (Locatelli i in., 2018). Dodatkowo część reaktorów rozmiarami i mocą będzie odpowiadać likwidowanym blokom w elektrowniach węglowych, z których ponad 90 proc. ma moc poniżej 500 MWe (Juszczak, 2022).

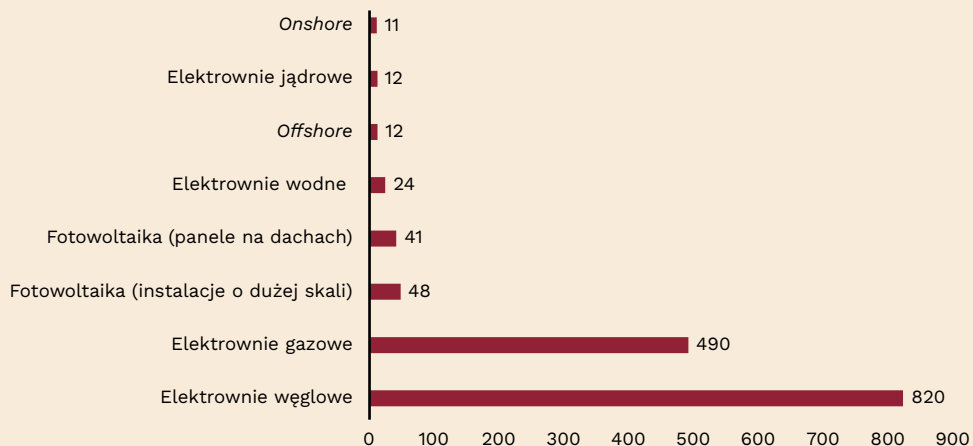
Ekspertki wskazują jednak też na wady technologii SMR. Pierwszą i najważniejszą jest wczesna faza rozwoju – obecnie zaawansowane projekty pilotażowe istnieją jedynie w Chinach i Rosji. Terminy uruchomienia pierwszych reaktorów SMR były już w przeszłości przesuwane wielokrotnie. Przykładowo według pierwotnego harmonogramu w 2021 r. miała ruszyć produkcja modułów do reaktora NuScale, a pierwsza elektrownia oparta na tym reaktorze miała być uruchomiona w 2026 r. (obecnie zapowiadana data uruchomienia pierwszego reaktora NuScale to 2029 r.). Przekłada się to na rosnący koszt mocy zainstalowanej co może powodować spadek atrakcyjności takiej inwestycji w porównaniu do innych rozwiązań (Lipka, 2020). Istotnym wyzwaniem jest też stworzenie skróconego – w stosunku do budowy klasycznych reaktorów – łańcucha dostaw, który będzie odpowiadać założeniom produkcji reaktorów z gotowych komponentów (Lipka, 2020). Takie rozwiązanie może jednak skutkować zmniejszeniem możliwości udziału krajowych przedsiębiorstw w realizacji inwestycji (local content). Należy także zaznaczyć, że choć SMR według zapowiedzi mają oferować niższy koszt budowy obiektu, niż w przypadku dużych reaktorów, nie przekłada się to jednak na niższy koszt za MW.

### **Ramka 1. Środowiskowe zalety wykorzystania energii jądrowej**

Energetyka jądrowa – zarówno wielkoskalowa, jak i według zapowiedzi mniejsze reaktory, charakteryzują się jednym z najmniejszych śladów węglowych ze wszystkich źródeł energii. W całym cyklu życia, czyli także podczas wydobycia paliwa, budowy elektrowni i jej funkcjonowania oraz rozbiórki, intensywność emisji przeciętnej elektrowni jądrowej wynosi 12 gCO<sub>2</sub> ekw/kWh. To wynik na podobnym poziomie do elektrowni wiatrowych, 3,5-4-krotnie niższy niż w przypadku fotowoltaiki i 68-krotnie niższy niż dla elektrowni węglowych (IPCC, 2014). Energetyka jądrowa odznacza się także najniższym zapotrzebowaniem na wykorzystanie przestrzeni w przeliczeniu na wyprodukowaną jednostkę energii (Brook, Bradshaw, 2015) i jednym z najniższych śladów eutroficzných (emisja w gramach fosforu ekwiwalentnego na wyprodukowaną MWh) (UNECE, 2022).



Wykres 2. Mediana intensywności emisji w cyklu życia elektrowni (gCO<sub>2</sub>ekw/kWh)



Źródło: opracowanie własne PIE na podstawie danych IPCC.

## 2.1. Wykorzystanie SMR w przemyśle

Małe modułowe reaktory jądrowe mają – według zapowiedzi producentów – odpowiadać na potrzeby własne przemysłu. Rosnące ceny energii z paliw kopalnych, wskazywane jako jedna z największych barier dla przemysłu (Jackowiak, 2022; www30), sprawiają, że konieczna jest niskoemisyjna alternatywa.

W Polsce w 2020 r. łącznie w sektorze przetwórstwa przemysłowego zużycie energii wyniosło 54 TWh, co stanowiło ok. 31 proc. polskiego zapotrzebowania na energię elektryczną. Najwięcej energii pochłania produkcja metali (8 TWh) oraz produkcja chemikaliów i wyrobów chemicznych (7,8 TWh). Na podobnym poziomie utrzymywało się zużycie energii elektrycznej w sektorze górnictwa i wydobywania (7,9 TWh)<sup>7</sup>. Łącznie grupa najbardziej energochłonnych przedsiębiorstw zużywa w Polsce ok. 20 TWh rocznie (www31). Zapotrzebowanie to jednak będzie rosnąć – sama dekarbonizacja i związana z tym elektryfikacja polskiego hutnictwa zwiększy zapotrzebowanie na energię elektryczną z obecnych 6-7 TWh nawet do 30 TWh lub więcej (www32).

<sup>7</sup> Dane GUS.

Wykorzystanie technologii SMR w przemyśle w dużym stopniu zależy od jej opłacalności. Z zapowiedzi zarówno NuScale, jak i GE Hitachi<sup>8</sup>, planowane LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) ma wynosić między 50 a 119 USD/MWh (www33; Weimar, 2021), tzn. 207-490 PLN/MWh<sup>9</sup>. Dla porównania według Dolnośląskiego Instytutu Studiów Energetycznych LCOE dla 1 MWh pochodzącej ze źródeł gazowych w 2030 r. w Polsce może wynosić od 639 do nawet powyżej 3000 PLN (w zależności od scenariusza cen gazu i uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>; DISE, 2022). LCOE poszczególnych źródeł odnawialnych (*offshore*, *onshore*, fotowoltaika) szacowany jest natomiast na ok. 295-355 PLN/MWh (DISE, 2022). Oznacza to, że w przypadku utrzymania LCOE na poziomie zapowiadanym przez producentów SMR, mogłyby one z powodzeniem konkurować nie tylko z paliwami kopalnymi, ale i stanowić alternatywę dla części źródeł odnawialnych.

Reaktory SMR mogą wydawać się rozwiązaniem dostępnym wyłącznie dla największych przedsiębiorstw. To prawda w przypadku, gdy inwestorem jest jedynie jeden podmiot. Istnieją jednakże możliwości rozłożenia ryzyka i podziału kosztów elektrowni. Jeden z możliwych modeli to funkcjonujący od 1970 r. w Finlandii model Mankala, przy użyciu którego zbudowano większość dużych fińskich elektrowni. Polega on na zebraniu przedsiębiorstw-udziałowców, którzy wspólnie finansują projekt, dzieląc się kosztami budowy i utrzymania funkcjonowania elektrowni. W zamian, adekwatnie do wielkości swoich udziałów w elektrowni, firmy te mają możliwość kupienia energii elektrycznej od elektrowni po koszcie jej wytworzenia. Odkupiona energia może być wykorzystana zarówno przez przedsiębiorcę, jak i odsprzedana dalej na warunkach rynkowych. Model Mankala obejmuje ok. 2/3 całkowitej produkcji energii elektrycznej w Finlandii (Juszczak, 2022). Podobny model może być wykorzystany na potrzeby polskich przedsiębiorstw, które byłyby zainteresowane energią z małych reaktorów jądrowych, ale samodzielnie nie są w stanie sfinansować całego projektu.

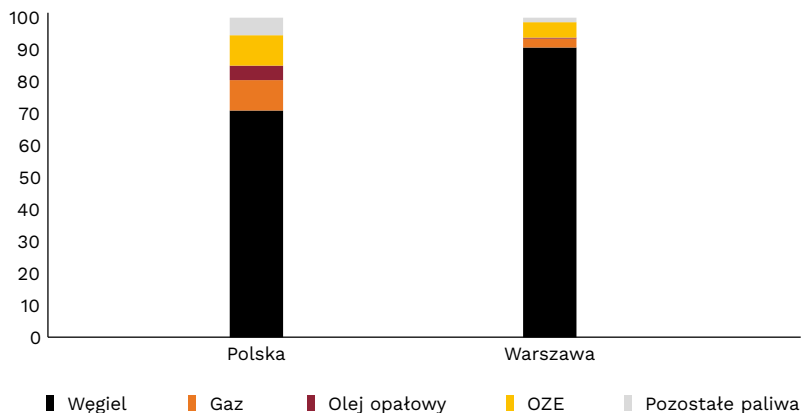
## 2.2. Wykorzystanie SMR do produkcji ciepła systemowego

Polska pozostaje jednym z krajów UE o najbardziej rozwiniętym ciepłownictwie systemowym. Do sieci ciepłowniczej przyłączonych jest ponad 40 proc. spośród 13,5 mln gospodarstw domowych. Odpowiada ona także za ok. ¼ całości wytworzonego ciepła ogółem (wliczając przemysł). W zainstalowanych 53,5 GW mocy w sieciach ciepłowniczych podstawowym paliwem pozostaje węgiel (71 proc. całości zużycia paliw, ok. 14,5 mln t rocznie) (Tomaszewski, 2020).

<sup>8</sup> W porównaniu użyto danych dla spółek, których reaktory mają jako pierwsze powstać w Polsce (podpisane umowy z OSGE i KGHM).

<sup>9</sup> Kurs USD/PLN z dnia 10.05.2023.

**Wykres 3. Struktura wytwarzania ciepła systemowego w Polsce i Warszawie w 2020 r. (w proc.)**



Źródło: opracowanie własne PIE na podstawie danych miasta Warszawa i Polityka Insight.

Jednym z miast, które mogłyby znacząco skorzystać na zastosowaniu SMR w dekarbonizacji ciepłownictwa jest Warszawa. W 2020 r. zapotrzebowanie na ciepło systemowe w stolicy Polski wyniosło 8,9 TWh, z czego aż 90,7 proc. wytworzono w ciepłowniach z użyciem węgla kamiennego (www34). W 2040 r. zapotrzebowanie Warszawy na ciepło z sieci może być wyższe i wynieść nawet 14 TWh. Według scenariuszy *think tanku* „Think atom” 3 reaktory SMR o mocy ciepłowniczej 400 MWt przeznaczone wyłącznie do celów grzewczych zaspokajałyby ok. 58 proc. rocznego zapotrzebowania na ciepło w stolicy (Think Atom, 2019).

Zapotrzebowanie na ciepło sieciowe w Polsce wykazuje jednak duże – sięgające nawet kilkuset procent – wahania sezonowe. W takim przypadku lepszym modelem niż produkcja wyłącznie ciepła, mogłoby być wykorzystanie reaktorów SMR do produkcji ciepła i energii elektrycznej w skojarzeniu. 3 reaktory o mocy ciepłowniczej ok. 900 MWt (co odpowiada ok. 300 MWe) mogłyby zaspokoić nawet 81 proc. rocznego zapotrzebowania Warszawy na ciepło w 2040 r. jednocześnie zwiększając produkcję energii elektrycznej do sieci w okresie od maja do września (na poziomie ok. 400-500 MWe), gdy zapotrzebowanie na ciepło maleje, a rośnie zużycie energii elektrycznej na klimatyzację (Think Atom, 2019).

Podobnie sytuacja przedstawia się dla mniejszych miast – w przypadku zapotrzebowania na poziomie 2,5 TWh rocznie jednostki SMR nastawione wyłącznie na produkcję ciepła o łącznej mocy 200-300 MWt mogłyby zaspokoić 50-70 proc. zapotrzebowania. W modelu kogeneracji (4 reaktory o mocy 200 MWt, co odpowiada ok. 70 MWe) udział ten rośnie do 97 proc. (przy jednoczesnym udostępnieniu mocy do produkcji energii elektrycznej na poziomie 130-200 MWe w miesiącach letnich) (Think Atom, 2019).

## 2.3. Wykorzystanie SMR do produkcji wodoru

Małe modułowe reaktory jądrowe można, tak samo jak duże reaktory, wykorzystać do produkcji wodoru – w modelu kogeneracji lub na wyłączność. Światowa produkcja wodoru wynosiła w 2020 r. 87 Mt (w większości z paliw kopalnych). Według prognoz MAE (Międzynarodowa Agencja Energetyczna) w scenariuszu dążenia do osiągnięcia neutralności klimatycznej globalne zapotrzebowanie na wodór w 2030 r. ma wynieść 212 Mt (w tym 150 Mt niskoemisyjnego), a w 2050 r. – 528 Mt (w tym 520 Mt niskoemisyjnego). 50 proc. wodoru będzie używane na potrzeby przemysłu ciężkiego i transportu. Kolejne 30 proc. będzie przetwarzane na inne paliwa, głównie amoniak na potrzeby transportu morskiego i produkcji energii elektrycznej, syntetyczną naftę na potrzeby lotnictwa i syntetyczny metan wprowadzany do sieci gazowych (IEA, 2021).

Według scenariusza MAE 60 proc. niskoemisyjnego wodoru (312 Mt) może być w 2050 r. pozyskiwane w procesie elektrolizy, w której energia elektryczna używana do produkcji wodoru będzie w 95 proc. pochodzić z OZE i jedynie w 3 proc. z elektrowni jądrowych. W takim scenariuszu roczna produkcja purpurowego wodoru<sup>10</sup> wyniosłaby ok. 9 Mt rocznie, zużywając 351-435 TWh (44,5-55 GW mocy zainstalowanej w elektrowniach jądrowych)<sup>11</sup>. Zaspokojenie tych potrzeb za pomocą małych reaktorów jądrowych wymagałoby budowy od 148 do 184 bloków o mocy 300 MW<sup>12</sup>.

Zgodnie z prognozami MAE 40 proc. niskoemisyjnego wodoru w 2050 r. ma być produkowane bezpośrednio z gazu ziemnego z użyciem technologii wychwytu, transportu, utylizacji i składowania CO<sub>2</sub> (*Carbon capture, utilisation and storage*, CCUS). Ponadto 2 proc. wodoru powstającego w procesie elektrolizy ma być wytwarzane przy użyciu energii elektrycznej powstałej z paliw kopalnych z wykorzystaniem CCUS. Łącznie z 8 Mt wysokoemisyjnego wodoru, jaki ciągle ma być w użyciu, przekłada się to na 222 Mt wodoru produkowanego z użyciem paliw kopalnych (w tym 925 mld m<sup>3</sup> gazu ziemnego, co ma stanowić 50 proc. całości światowego zapotrzebowania na to paliwo).

Zwiększenie produkcji purpurowego wodoru z 9,3 do 23,6 Mt pozwoliłoby całkowicie wyeliminować wodór wysokoemisyjny i wykorzystanie energii elektrycznej z paliw kopalnych w procesie elektrolizy (scenariusz „elektroliza bez CCUS”). Wymagałoby to budowy dodatkowych 68-84 GW mocy zainstalowanej energetyki jądrowej w porównaniu do bazowego scenariusza MAE (227-280 bloków SMR o mocy 300 MW)<sup>13</sup>.

Znacznie trudniejszy może okazać się natomiast proces eliminacji wodoru pozyskiwanego bezpośrednio z gazu ziemnego z wykorzystaniem procesu

<sup>10</sup> Wodór pozyskiwany w procesie elektrolizy z wykorzystaniem energii elektrycznej wytwarzanej w elektrowniach jądrowych jest nazywany także różowym, fioletowym lub czerwonym wodorem.

<sup>11</sup> Średnio zwiększenie produkcji purpurowego wodoru o 1 Mt rocznie wymagałoby budowy 4,8-5,9 GW mocy.

<sup>12</sup> Obliczenia własne PIE.

<sup>13</sup> Obliczenia własne PIE.

CCUS – obniżenie prognozowanego udziału w globalnej produkcji wodoru z 40 do 35 proc. w 2050 r. wymagałoby w takim przypadku zwiększenia mocy zainstalowanej energetyki jądrowej ponad dwukrotnie w porównaniu do scenariusza „elektroliza bez CCUS” i ponad 5-krotnie w porównaniu do bazowego scenariusza MAE<sup>14</sup>.

**Tabela 1. Scenariusze globalnej produkcji wodoru w 2050 r. z wyszczególnieniem udziału purpurowego wodoru**

Scenariusz	Sposób produkcji wodoru				Energia elektryczna wymagana do produkcji purpurowego wodoru (TWh)	Dodatkowa moc zainstalowana elektrowni jądrowych (GW)	Liczba bloków SMR o mocy 300 MW
	Paliwa kopalne bez CCUS (Mt)	OZE (Mt)	Gaz ziemny CCUS (Mt)	Energia jądrowa (Mt)			
MAE	8	296,4	214,24	9,36	351-435	45-55	148-184
„Czysty wódór”	0	296,4	214,24	17,36	651-807	83-102	275-341
„Czysty prąd”	0	296,4	208	23,6	885-1097	112-139	374-463
„35 proc. CCUS”	0	296,4	182	49,6	1860-2306	236-293	786-975

Uwaga: według MAE produkcja 312 Mt wodoru w 2050 będzie wymagać 14,5 tys. TWh, co przekłada się na efektywność w postaci 46,5 kWh/kg. Wartości te jednak różnią się w zależności od procesu elektrolizy. Wykorzystanie elektrolizerów statotlenkowych ma wymagać mniejszej ilości energii niż elektrolizery PEM i elektrolizery alkaliczne – od 37,5 do 39 kWh/kg (Milewski i in., 2021). W analizie jako wartości graniczne przyjęliśmy 37,5 kWh/kg i 46,5 kWh/kg. Współczynnik wykorzystania mocy elektrowni jądrowych założyliśmy na poziomie 90 proc. Scenariusz MAE oparty na założeniach Międzynarodowej Agencji Energetycznej, pozostałe scenariusze autorstwa PIE.

Źródło: opracowanie własne PIE.

Według prognoz DISE zapotrzebowanie na wódór w Polsce może przekraczać 130 TWh (3,94 Mt<sup>15</sup>) w 2050 r. (DISE, 2021). Do wyprodukowania takiej ilości niskoemisyjnego wodoru w procesie elektrolizy niezbędne będzie zużycie 148-183 TWh (obecne roczne zużycie energii elektrycznej w Polsce wynosi ok. 174 TWh). Wytworzenie takiej ilości energii w reaktorach jądrowych wymagałoby od blisko 19 do nawet 23 GW mocy<sup>16</sup>.

<sup>14</sup> Obliczenia własne PIE. Scenariusze własne opracowane na podstawie danych MAE.

<sup>15</sup> Przy założeniu, że 1 kg wodoru pozwala na produkcję 33 kWh energii elektrycznej.

<sup>16</sup> Obliczenia własne PIE, założenie współczynnika wykorzystania mocy na poziomie 90 proc.

## Ramka 2. Inne sposoby wykorzystania SMR w przyszłości

Jedną z najciekawszych możliwości zastosowania małych reaktorów jądrowych pozostaje budowa pływających reaktorów jądrowych. Pierwszy z nich – rosyjski akademik Łomonosow – funkcjonuje od 2019 r. przy wykorzystaniu 2 reaktorów KLT-40S o mocy 150 MWt (35 MWe) każdy (www35). Umieszczenie elektrowni jądrowych na wodzie ma liczne zalety, wśród których jedną z najważniejszych jest ułatwienie procesu chłodzenia i mobilność, co ma znaczenie zwłaszcza dla krajów o rozbudowanej ogólnokrajowej sieci elektroenergetycznej. Umieszczenie takich jednostek na wodzie może także rozwiązać część obaw związanych z akceptacją społeczną. Według raportu Think Atom jednostki takie mogą być produkowane w przyszłości m.in. w Finlandii (Think Atom, 2022).

Reaktory SMR mogłyby też stanowić zapasowe źródło energii dla wiatraków i paneli fotowoltaicznych. W okresach, gdy źródła te produkują mniej energii, reaktory SMR uzupełniałyby braki. W okresach, gdy jednostki odnawialne miałyby w całości zaspokajać zapotrzebowanie na energię elektryczną w sieci, jednostki SMR wykorzystywałyby nadpodaż energii w procesie odsalania wody. Według zapowiedzi do takiego modelu mają być dostosowane reaktory NuScale (Think Atom, 2022).

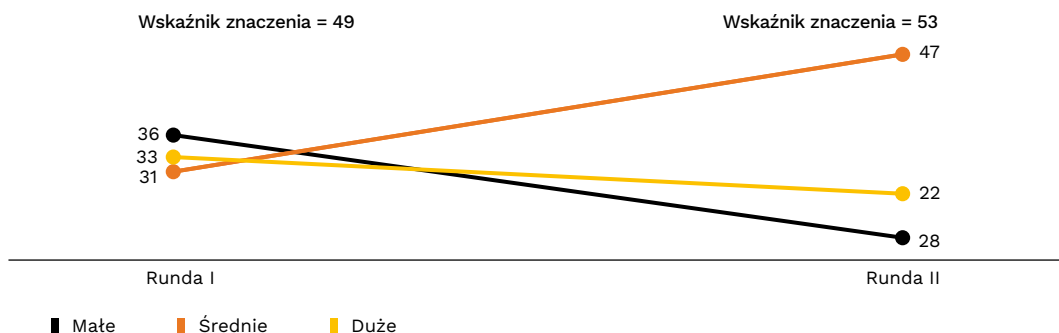
# 3. Małe reaktory jądrowe w oczach ekspertów – wyniki badania ankietowego

## 3.1. Tezy delfickie (I część badania)

### Teza 1. W Polsce zostanie uruchomiony pierwszy reaktor SMR

Blisko połowa ankietyowanych ekspertów (47 proc.) uznała, że budowa pierwszego reaktora SMR będzie mieć średnie znaczenie dla transformacji energetycznej w Polsce (wskaźnik znaczenia tezy równy 53 pkt. na 100 możliwych). Jest to duża różnica w stosunku do wyniku w 1 turze (31 proc.), zgodnie z którym opinie na ten temat rozkładały się między trzy warianty odpowiedzi niemalże po równo (wykres 4).

Wykres 4. Znaczenie tezy: W Polsce zostanie uruchomiony pierwszy reaktor SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.)



Źródło: opracowanie własne PIE.

Swoją opinię eksperci uzasadniali dużą niepewnością dotyczącą masowego rozwoju technologii SMR. W ich opinii pierwszy reaktor może, w zależności od rozwoju innych technologii oraz ostatecznych kosztów i problemów,

jakie napotkają projekty pilotażowe, być początkiem budowy SMR na większą skalę, jak i mało znaczącą, pojedynczą ciekawostką. Wskazywali oni także na ograniczenia lokalizacyjne i brak mechanizmów finansowania.

Przykładowe odpowiedzi ekspertów:

**Zależy od rozwoju technik magazynowania energii i technologii wodorowych do czasu, kiedy SMR będą osiągalne na większą skalę.**

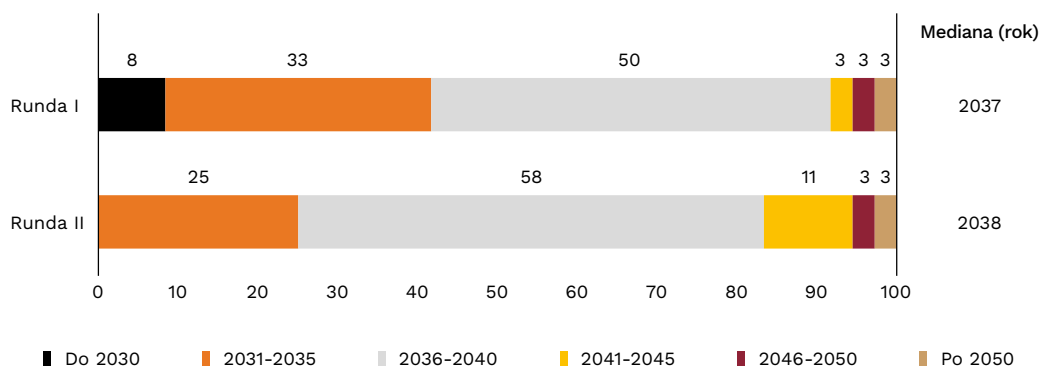
**Reaktory SMR wymagają podobnych uzgodnień lokalizacyjnych jak duże reaktory III+, ich zastosowanie w większości i wypadków jest ograniczone ich możliwościami zastosowań.**

28 proc. ekspertów uznało, że budowa pierwszego reaktora SMR będzie mieć duże znaczenie dla transformacji energetycznej, wskazując zwłaszcza na dekarbonizację odbiorców przemysłowych i ciepłownictwa. Z kolei blisko ¼ (22 proc.) ekspertów uznało, że budowa pierwszego reaktora SMR nie będzie mieć większego znaczenia dla transformacji energetycznej, wskazując na braki odpowiednich kadr i niesprawdzoną technologię:

**Nawet jeśli SMR uzyskały (uzyskują) stosowne certyfikaty, to ich praktyczne zastosowanie, niezawodność instalacji jako całości pozostają nadal nie sprawdzone w rzeczywistej, praktycznej eksploatacji. Wdrażanie tej technologii w Polsce warunkach ograniczonych kompetencji w zakresie inżynierii jądrowej będzie trudne i potencjalnie ryzykowne.**

Aż 58 proc. ankietowanych ekspertów uważa, że pierwszy reaktor SMR powstanie w Polsce dopiero między 2036 a 2040 r. Mediana odpowiedzi to 2038 r., czyli 8 lat później niż zapowiedzi producentów. Ekspersi uzasadniają swoją opinię obecnym stanem rozwoju technologii i wyzwaniem, jakim będzie budowa pierwszych reaktorów SMR – brak odpowiedniej legislacji, konieczność ustanowienia stabilnego łańcucha dostaw i zarządzania produkcją komponentów, niewystarczająca liczba wykwalifikowanych kadr.

**Wykres 5. Czas realizacji tezy: W Polsce zostanie uruchomiony pierwszy reaktor SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach)**



Źródło: opracowanie własne PIE.



Przykładowe odpowiedzi ekspertów:

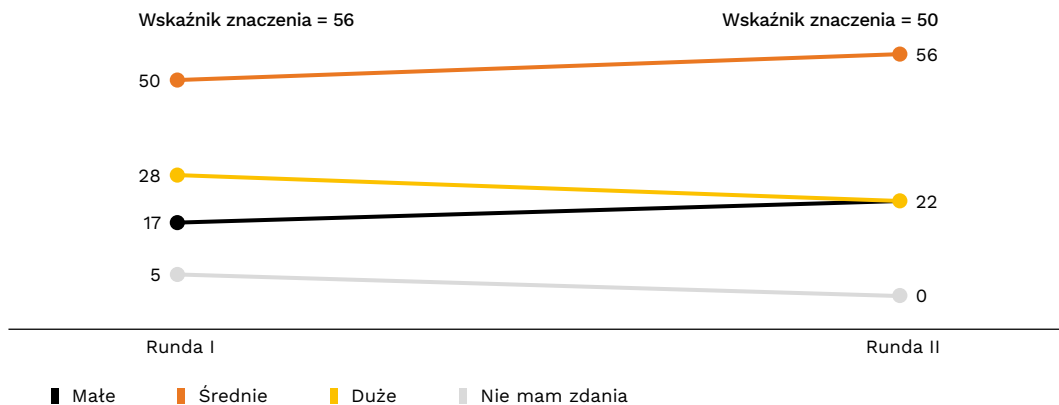
(...) z uwagi na obecny stan rozwoju tej technologii oraz wyzwania związane z jej wdrożeniem na szeroką skalę, najbardziej prawdopodobny scenariusz to rozpowszechnienie tej technologii w późnych latach '30 XXI wieku.

Biorąc pod uwagę, że większość aspektów związanych z SMR i ich cywilnym wykorzystaniem jest dopiero rozwijanych (legislacja, produkcja, sposób zarządzania mulit modułowymi jednostkami produkcyjnymi, etc.) można spodziewać się, iż 10-15 lat to minimum, jakie jest niezbędne by poradzić sobie z potencjalnymi przeciwnościami i zakończyć budowy. Problemy takie jak, braki kadry (inżynieryjnej i naukowej) oraz brak jednolitego i stabilnego rozwoju polskiej energetyki jądrowej dodatkowo zwiększa inercję całego przedsięwzięcia.

## Teza 2. Moc zainstalowanych w Polsce bloków SMR przekroczy 5 GWe

Ponad połowa ankietowanych ekspertów (56 proc.) uznała, że rozwój mocy zainstalowanej bloków SMR powyżej 5 GWe będzie mieć średnie znaczenie dla transformacji energetycznej Polski (wskaźnik znaczenia równy 50 pkt., wykres 6).

Wykres 6. Znaczenie tezy: Moc zainstalowanych w Polsce bloków SMR przekroczy 5 GWe – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.)



Źródło: opracowanie własne PIE.

Ekspert wskazywali, że choć 5 GWe będzie mieć niepomijalny udział w polskiej strukturze wytwarzania energii, to jednak za mało, by uznać to za bardzo istotny wkład w transformację energetyczną. Ponadto zauważali oni istotne przeszkody w osiągnięciu tego celu wskazując na niepewność

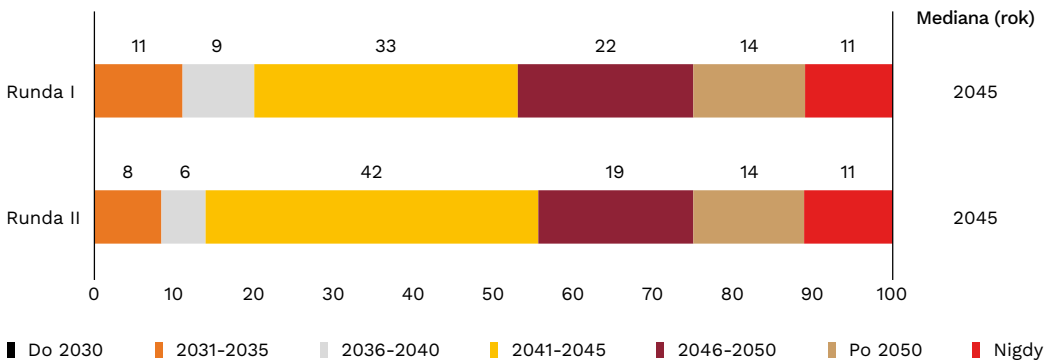
dynamiki rozwoju sektora, jak i (w przypadku sukcesu pierwszych projektów) wysoki popyt w wielu krajach UE, co może rzutować na możliwości terminowej realizacji projektów:

**Moc 5 GWe w jakiegokolwiek technologii, w warunkach zdekarbonizowanych już sektorów elektroenergetyki, transportu i ciepłownictwa będzie miało średnie (choć rozpoznawalne) znaczenie w ogólnym krajowym bilansie pozyskiwana energii.**

**Docelowo moc reaktorów SMR może przekroczyć 5 GW, jednak cel ten będzie trudny do osiągnięcia w krótkim terminie czasowym, m.in. z uwagi na obecny status rozwoju technologii, jak również oczekiwany wysoki popyt na te rozwiązania technologiczne w całej Unii Europejskiej, co będzie rzutowało na podaż.**

Za najbardziej prawdopodobny przedział czasowy, w którym teza może zostać zrealizowana, eksperci uznali okres 2041-2045 (mediana wyników 2045 r.), argumentując, że podobnie jak w przypadku budowy wielkoskalowych elektrowni jądrowych w innych krajach, także w przypadku SMR należy spodziewać się opóźnień realizacji inwestycji. Wskazywali oni także na braki kadrowe i brak silnej struktury badawczej w dziedzinie energetyki jądrowej w Polsce.

**Wykres 7. Czas realizacji tezy: Moc zainstalowanych w Polsce bloków SMR przekroczy 5 GWe – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach)**



Źródło: opracowanie własne PIE.

Przykładowe wypowiedzi ekspertów:

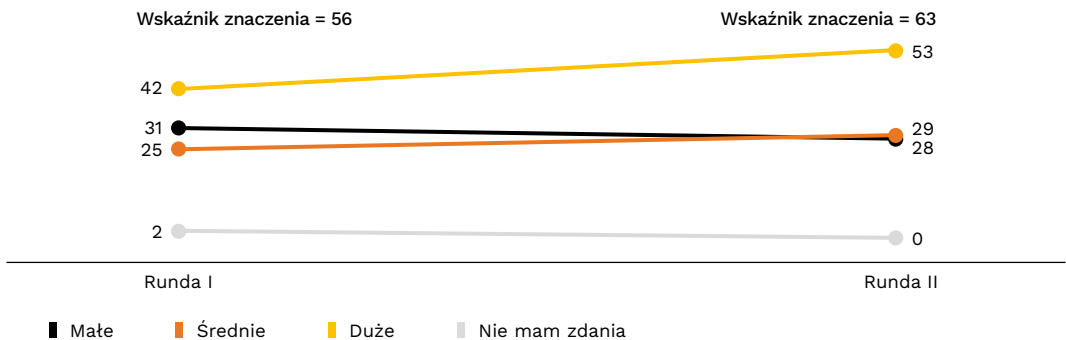
**Osiągnięcie 5 GW mocy zainstalowanej z SMR w Polsce możliwe w okolicach 2040 r., uwarunkowane jednak spełnieniem założeń dotyczących kosztów inwestycji, kosztów wytwarzanej energii i dostępnością zdolności do budowy SMR (przede wszystkim prac budowlanych) ze względu na równoległą budowę wielkoskalowych EJ w ramach PPEJ.**

Chociaż osiągnięcie mocy zainstalowanej reaktorów SMR na poziomie 5 GW miałyby duże znaczenie dla osiągnięcia przez Polskę celów klimatycznych spójnych z polityką UE, cel ten uznaje za trudny do zrealizowania, m.in. ze względu na fakt, że wiele państw członkowskich UE planuje realizację inwestycji SMR w tej samej perspektywie czasowej, co w oczywisty sposób przełoży się na utrudnienia i wyzwania dotyczące możliwości dostarczenia wymaganej liczby reaktorów SMR w tej perspektywie czasowej (łańcuchy dostaw, moce produkcyjne itp.).

### Teza 3. Bloki SMR zaczną być wykorzystywane do produkcji ciepła systemowego w Polsce

Ponad połowa ekspertów (53 proc.) uznała, że wykorzystanie reaktorów SMR do produkcji ciepła systemowego w Polsce będzie mieć duże znaczenie dla transformacji energetycznej. Wskaźnik znaczenia tezy był wyższy niż w przypadku poprzednich tez i wyniósł 63 pkt.

Wykres 8. Znaczenie tezy: Bloki SMR zaczną być wykorzystywane do produkcji ciepła systemowego w Polsce – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.)



Źródło: opracowanie własne PIE.

Eksperci, którzy wskazywali na wysokie znaczenie tezy dla transformacji energetycznej Polski, uzasadniali swoją odpowiedź wysoką potrzebą dekarbonizacji ciepłownictwa, które w ogromnej większości jest dziś oparte na spalaniu węgla. Jednocześnie według respondentów jest tu mniejsza konkurencja w postaci alternatywnych technologii niż w przypadku produkcji energii elektrycznej, co powoduje, że wykorzystanie małych reaktorów jądrowych do produkcji ciepła (zarówno na potrzeby komunalne, jak i przemysłowe) staje się jednym z najważniejszych potencjalnych zastosowań małych reaktorów jądrowych. Przykładowe komentarze ekspertów:

**Ciepło z elektrowni jądrowej powinno być wykorzystywane w jak największym stopniu. Ogrzewanie domów i wody użytkowej to jeden z bardziej oczywistych sposobów jego wykorzystania, a w Polsce infrastruktura**

w wielu miejscach może być do tego relatywnie łatwo zaadaptowana. Tak więc jest to wykonalne, niemniej jednak wymaga dużego nakładu pracy i wiedzy eksperckiej, na etapie planowania nie tylko w aspektach technicznych, ale i społecznych.

To jedno z najbardziej logicznych zastosowań SMR. Trudnością może być ich umiejscowienie w sąsiedztwie aglomeracji miejskich (SMR pozostaje elektrownią jądrową, z większością ograniczeń z tym związanych).

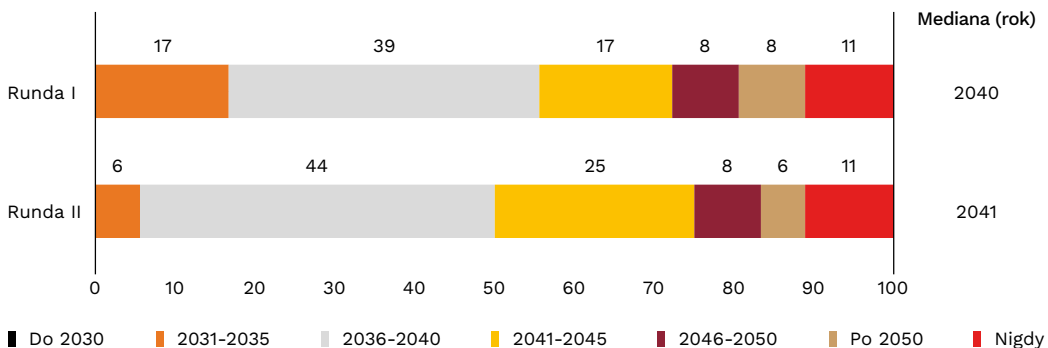
Obecnie działające reaktory jądrowe są już w kilku przypadkach wykorzystywane do produkcji ciepła. W kontekście SMR-ów, ta funkcja jest m.in. analizowana w Finlandii (projekt dt. miasta Helsinki). W oczywisty sposób, ze względu na zalety reaktorów SMR, w tym możliwość ich lokalizacji, stosowanie ich do produkcji ciepła (szczególnie w kontekście potrzeby zastępowania obecnie stosowanych metod produkcji ciepła) wydaje się naturalnym i wskazanym rozwiązaniem.

28 proc. ankieterowanych ekspertów było przeciwnego zdania uznając, że produkcja ciepła systemowego za pomocą reaktorów SMR ma niewielkie szanse na odgrywanie istotnej roli w polskiej transformacji energetycznej. Wskazywali oni na fakt, że obecnie także istniejąca wielkoskalowa energetyka nie jest w skali masowej używana do produkcji ciepła systemowego (choć są takie przypadki), a sama lokalizacja w pobliżu miast może być niemożliwa:

**Nie sądzę, aby SMR-y były mogły być kiedykolwiek lokalizowane w miastach - do tego czasu będą inne rozwiązania, które sprawią, że SMR-y mogą nie być potrzebne. Może dla przemysłu będą rozwiązaniem.**

Według połowy ankieterowanych ekspertów realizacja tezy nie będzie możliwa wcześniej niż w 2041 r. (wykres 9). Zdaniem 44 proc. bloki SMR zaczną być wykorzystywane do produkcji ciepła systemowego w drugiej połowie przyszłej dekady, natomiast 25 proc. ankieterowanych wskazywało na okres 2041-2045.

**Wykres 9. Czas realizacji tezy: Bloki SMR zaczną być wykorzystywane do produkcji ciepła systemowego w Polsce – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach)**



Źródło: opracowanie własne PIE.

Przykładowe odpowiedzi ekspertów:

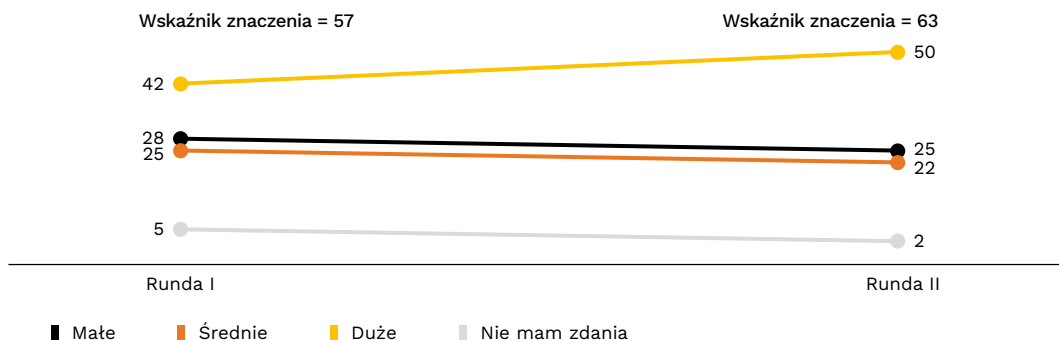
Jeśli Państwo odpowiednio wcześniej rozważy inwestycje w rozwój sieci ciepłowniczej i przystosowanie jej do standardów Energetyki Jądrowej, teza ta może mieć znaczący wpływ na dekarbonizację oraz jest wykonalna w czasie 15-20 lat.

Jeśli ciepło systemowe to ciepło komunalne to 2031-2035, jeśli ciepło przemysłowe to 2036-2040.

#### Teza 4. Ciepło systemowe w 10 największych polskich aglomeracjach<sup>17</sup> przynajmniej w 20 proc. będzie pochodzić z SMR

Połowa ankietowanych ekspertów (50 proc.) uznała, że gdyby przynajmniej 20 proc. ciepła systemowego w 10 największych polskich aglomeracjach było produkowane w SMR, miałyby to duże znaczenie dla transformacji energetycznej (wskaźnik znaczenia tezy 63 pkt., wykres 10).

Wykres 10. Znaczenie tezy: Ciepło systemowe w 10 największych polskich aglomeracjach przynajmniej w 20 proc. będzie pochodzić z SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.)



Źródło: opracowanie własne PIE.

Eksperti zaznaczali, że choć realizacja tezy jest możliwa i znacząco przyczyni się do dekarbonizacji, to jest uwarunkowana wieloma czynnikami, które dziś są nieznanymi, są to m.in. możliwości lokalizacyjne w pobliżach miast, koszt energii z instalacji SMR czy popyt na reaktory SMR ze strony przemysłu. Przykładowe wypowiedzi ekspertów:

Pokrycie tak szerokiego obszaru wymagałoby znacznego rozproszenia bloków, co zwiększa złożoność inwestycji i zdecydowanie ją wydłuża. Energetyka jądrowa powinna być maksymalnie, ale i racjonalnie wykorzystana.

<sup>17</sup> Górnośląska, warszawska, krakowska, łódzka, trójmiejska, poznańska, wrocławska, bydgosko-toruńska, rybnicka, szczecińska.

Aspekty jak dostępność chłodziwa, aktywność górnicza np. Muszą być brane pod uwagę by zoptymalizować potencjalne inwestycje, a nie robić ‘na siłę’ w danym miejscu by nie przeinwestować. 20% wydaje się być wykonalne.

O ile realizacja tej tezy przyczyniłaby się w dużym stopniu do dekarbonizacji Polski, w mojej opinii proponowany cel będzie trudny do realizacji w takim stopniu. Produkcja ciepła systemowego oczywiście jest atrybutem SMR, natomiast w pierwszej kolejności widzę zapotrzebowanie na wykorzystanie reaktorów SMR w kontekście dekarbonizacji przemysłu (zastąpienie np. gazu w produkcji w tzw. *Hard-to-abate sectors*).

Teza możliwa do realizacji, uwarunkowana zdolnością do implementacji SMR w sąsiedztwie aglomeracji i czynnikami kosztowymi (koszt energii / ciepła wytwarzanych przez SMR nie jest na dziś znany).

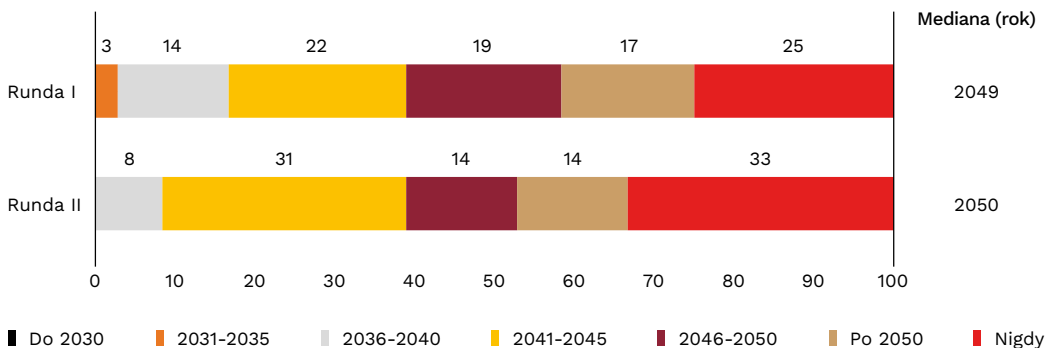
Jednak co czwarty z ankietowanych ekspertów był znacznie bardziej sceptyczny wobec tak postawionej tezy, zwracając uwagę na prawdopodobny opór społeczny w stosunku do większej liczby SMR zlokalizowanych w pobliżach miast i dominację alternatywnych form produkcji zeroemisyjnego ciepła:

Reaktory jądrowe nie są obecnie (i nie będą w przyszłości) wykorzystywane do produkcji ciepła systemowego. W przyszłości (UE) ciepło systemowe będzie pochodzić z elektryfikacji (pompy ciepła, ogrzewanie elektryczne).

Rozwiązanie bardzo mało prawdopodobne, chociażby ze względu na opór społeczny.

Połowa ekspertów uważa, że realizacja tezy nie będzie możliwa przed 2050 r. Opinie poszczególnych ankietowanych są tu bardzo zróżnicowane. Aż 39 proc. ekspertów uważa, że produkcja 20 proc. ciepła systemowego za pomocą SMR w największych polskich aglomeracjach jest możliwa do 2045 r. Z kolei 33 proc. ankietowanych jest zdania, że tak wysoka produkcja ciepła sieciowego z SMR nigdy nie nastąpi (wykres 11).

**Wykres 11. Czas realizacji tezy: Ciepło systemowe w 10 największych polskich aglomeracjach przynajmniej w 20 proc. będzie pochodzić z SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach)**

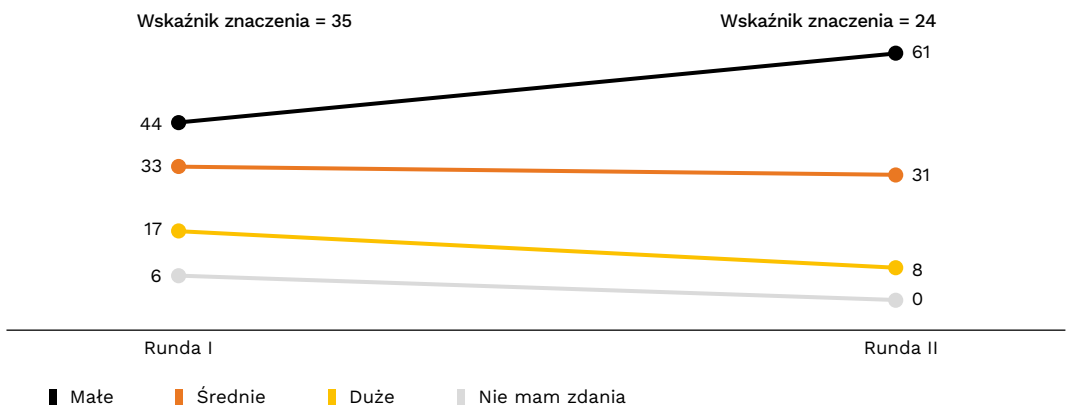


Źródło: opracowanie własne PIE.

## Teza 5. 10 proc. produkcji wodoru w Polsce ze źródeł niskoemisyjnych (zielony i różowy wodór) będzie pochodzić z instalacji SMR

Większość ekspertów (61 proc.) jest zdania, że teza o produkcji 10 proc. niskoemisyjnego wodoru z SMR ma niewielkie znaczenie dla polskiej transformacji energetycznej. Jedynie 8 proc. ekspertów uznało, że teza ta ma duże znaczenie. Przekłada się to na najniższy wskaźnik znaczenia (24 pkt.) ze wszystkich tez, jakie oceniali ankietowani (wykres 12).

Wykres 12. 10 proc. produkcji wodoru w Polsce ze źródeł niskoemisyjnych (zielony i różowy wodór) będzie pochodzić z instalacji SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.)



Źródło: opracowanie własne PIE.

Ekspertów uzasadniając swoją odpowiedź wskazywali, że reaktory jądrowe – także SMR – będą przeznaczone głównie do pracy w podstawie systemu elektroenergetycznego, a do produkcji wodoru wykorzystywane będą głównie nadwyżki z instalacji OZE:

**Energetyka jądrowa z założenia powinna pracować stabilnie, w podstawie. Nowoczesne reaktory, w tym SMR-y, są przystosowane do dynamicznej zmiany mocy niemniej jednak najbardziej optymalnie pracują pod wysokim i stałym obciążeniem. Wodór, produkowany z nadwyżek energetycznych z OZE oraz z dedykowanych instalacji jądrowych może być wytwarzany i to czy 10% zostanie osiągnięte zależy tylko i wyłącznie od wcześniejszego zaplanowania inwestycji bazując na obecnej wiedzy i ograniczeniach technicznych.**

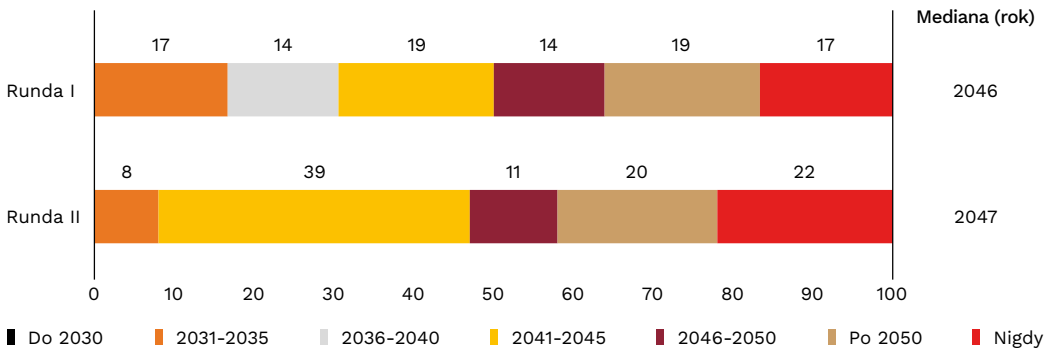
**W zastosowaniu SMR to raczej ciepło systemowe i zasilanie zakładów przemysłowych i niewielkich aglomeracji. Do produkcji czystego wodoru lepiej będzie używać okresowego nadmiaru energii z OZE.**

Z kolei eksperci, którzy uznawali średnie lub duże znaczenie tezy wskazywali na fakt, że SMR mogą w przyszłości mieć podobny lub niższy koszt wytwarzania wodoru niż OZE. Zaznaczali jednak, że dużo zależy nie tylko od ostatecznych kosztów energii z SMR, ale także od obowiązującej wersji przepisów unijnych dotyczących niskoemisyjnego wodoru:

**Prawdopodobieństwo realizacji tego scenariusza w dużym stopniu uzależnione jest od toczących się obecnie na poziomie unijnym prac nad definicją „zielonego” wodoru oraz wyznaczaniem celów dekarbonizacyjnych do osiągnięcia dla poszczególnych państw członkowskich, natomiast moim zdaniem, energetyka jądrowa będzie miała znacząca rolę do odegrania w kontekście wykorzystania reaktorów SMR do produkcji zeroemisyjnego wodoru.**

Połowa ankietyowanych ekspertów uznała, że realizacja tezy nie będzie możliwa przed 2047 r. Tak jak w przypadku tezy 4, ponownie widać duże rozpiętości między najczęściej wybieranymi odpowiedziami – 39 proc. ekspertów uznało, że produkcja 10 proc. niskoemisyjnego wodoru za pomocą reaktorów SMR jest możliwa między 2041 a 2045 r., 22 proc. ekspertów uważa z kolei, że nigdy nie dojdzie do realizacji tezy (wykres 13).

**Wykres 13. Czas realizacji tezy: 10 proc. produkcji wodoru w Polsce ze źródeł niskoemisyjnych (zielony i różowy wódór) będzie pochodzić z instalacji SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach)**



Źródło: opracowanie własne PIE.

## 3.2. Pozostałe pytania ankietowe (II część badania)

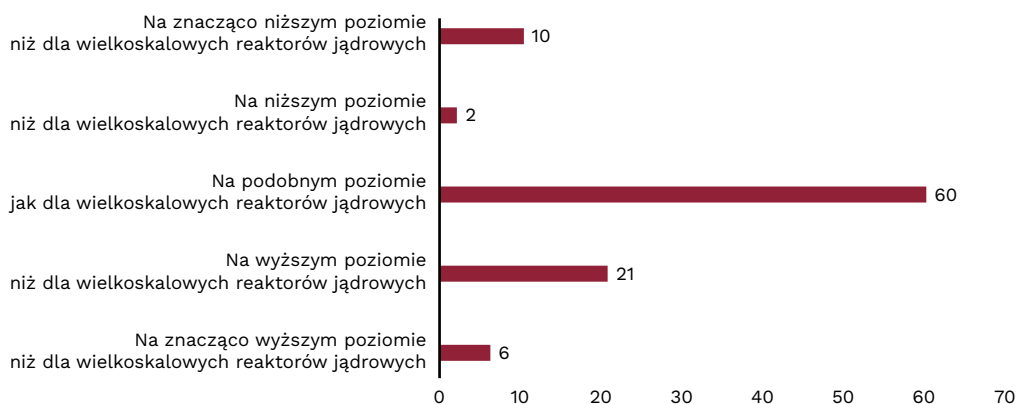
Większość ankietyowanych ekspertów (60 proc.) jest zdania, że akceptacja społeczna reaktorów SMR będzie na podobnym poziomie jak w przypadku wielkoskalowej energetyki jądrowej, argumentują to tym, że zasada działania obu technologii jest podobna (wykres 14):



Nie ma powodu, by była inna. Szczególnie większe SMR niczym istotnym się nie różnią od mniejszych "wielkoskalowych".

Technologia SMR jest technologią, która nie sprawdzona jest jeszcze w skali przemysłowej przez długi okres funkcjonowania więc obawy społeczne wobec tej "nowości" będą większe. Z drugiej strony jako instalacje komercyjne w wysoko energochłonnym przemyśle nie będą w pobliżu siedlisk ludzi, więc nie będzie oporów społecznych.

Wykres 14. Akceptacja społeczna SMR wg ekspertów (w proc.)



Źródło: opracowanie własne PIE.

Część ekspertów (27 proc.) uznała, że akceptacja reaktorów SMR będzie na wyższym lub znacząco wyższym poziomie. Dominującym argumentem w komentarzach ze strony tej części ekspertów było powszechne przekonanie opinii publicznej na temat większego bezpieczeństwa takich reaktorów z powodu mniejszej mocy:

Akceptacja zarówno dla wielkoskalowych, jak i modułowych reaktorów powinna utrzymać się na wysokim poziomie, jednak widzę również pewne atrybuty SMR-ów, które mogą pozwolić osiągnąć nawet wyższe poparcie (np. ze względu na mniejszą objętość produkowanych odpadów, możliwość tzw. recydingu, pasywne systemy bezpieczeństwa, etc).

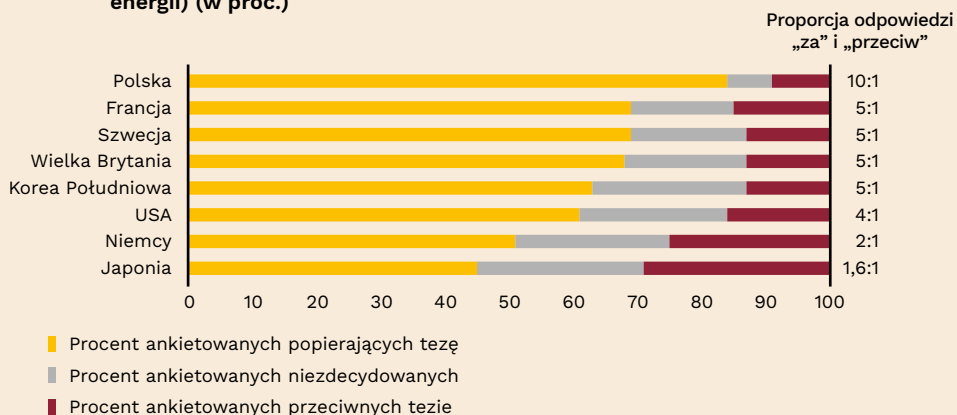
Często podnoszona w krytyce dot. atomu jest duża skala przedsięwzięcia, ogrom potrzebnego kapitału i czas potrzebny na realizację projektu. Co więcej, przeciwnicy atomu często promują decentralizowaną koncepcję systemu energetycznego. Na wszystkie te zarzuty w jakimś stopniu odpowiada SMR.

Z kolei 12 proc. ekspertów uznało, że akceptacja dla technologii SMR może być niższa niż dla wielkoskalowej energetyki jądrowej, wskazując na obawy dotyczące niesprawdzonej technologii i efekt *Not in my backyard*.

### Ramka 3. Akceptacja społeczna dla energetyki jądrowej w Polsce

Według nowego badania RePlanet poparcie społeczne dla wykorzystania najnowszych technologii jądrowych do produkcji energii elektrycznej wynosi w Polsce 84 proc., co jest najwyższym wynikiem spośród krajów biorących udział w ankiecie. To wynik wyższy o 15 pkt. proc. niż we Francji i Szwecji (69 proc. poparcia) i o 23 pkt. proc. wyższy niż w USA (RePlanet, 2023).

**Wykres 15. Odpowiedzi respondentów na tezę: Popieram wykorzystanie najnowszych technologii jądrowych do produkcji energii elektrycznej (obok innych źródeł energii) (w proc.)**



Źródło: opracowanie własne PIE na podstawie: RePlanet (2023).

Wśród zwolenników energetyki jądrowej w Polsce jest więcej mężczyzn (88 proc.) niż kobiet (79 proc.), wysokie poparcie jest niezależne od grupy wiekowej (od 82 proc. wśród osób w wieku 18-34 do 86 proc. wśród osób w wieku 55+) i popieranej partii politycznej (od 83 do 92 proc.).

Ankietowani wyrażali także poparcie dla następujących tez:

**Tabela 2. Zestawienie tez prezentowanych respondentom i odsetek odpowiedzi wyrażających poparcie**

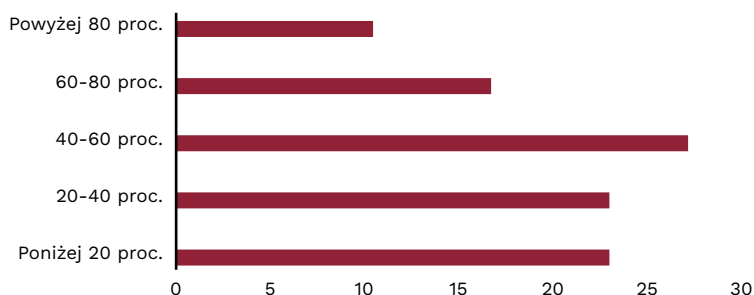
Teza	Odsetek respondentów wyrażających poparcie dla tezy
Potrzebujemy sposobów by produkować więcej energii w celu zachowania wzrostu gospodarczego	85
Obok OZE potrzebujemy także energetyki jądrowej by spełnić cele klimatyczne	78
Energetyka jądrowa może nas w przyszłości ochronić przed powtórką obecnego kryzysu energetycznego	78
Powinniśmy wykorzystać zaawansowane technologie jądrowe by ograniczyć zależność energetyczną od innych krajów	78
Energetyka jądrowa dostarcza dobrych jakościowo miejsc pracy dla społeczności lokalnej	75

Źródło: opracowanie własne PIE na podstawie: RePlanet.

Wyniki badania RePlanet są zbliżone z ostatnim badaniem Ministerstwa Klimatu i Środowiska z 2022 r. (www36), w którym 86 proc. badanych wyrażało poparcie dla budowy elektrowni jądowej w Polsce (wzrost z 62,5 proc. w 2020 r., www37).

Eksperti nie byli zgodni w ocenie, ile procent energii wytwarzanej z instalacji SMR będzie użytkowane na potrzeby własne inwestorów. Najwięcej z nich (27 proc.) wskazało na przedział 40-60 proc.

**Wykres 16. Udział energii wytwarzanej z instalacji SMR użytkowany na potrzeby własne inwestorów wg ekspertów (w proc.)**



Źródło: opracowanie własne PIE.

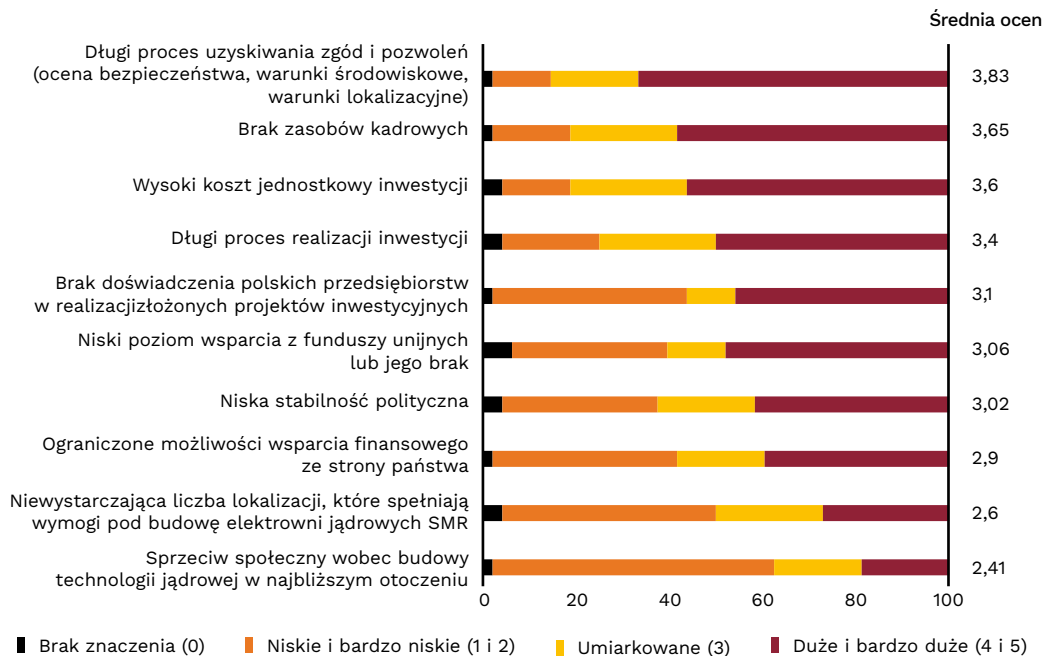
Wśród opcjonalnych komentarzy do pytania najczęściej wskazywano, że największy potencjał SMR tkwi w wykorzystaniu przemysłowym. Zaznaczano jednak, że sytuacja będzie zależeć od rozwoju technologii i mechanizmów finansowania, jakie zostaną wypracowane:

O ile wiem w tej chwili nie planuje się innego wykorzystania SMR-ów niż na potrzeby własnej produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Niewykluczone, że wraz z rozwojem wykorzystania tej technologii będzie to ulegać zmianie. Ale największy potencjał SMR-ów tkwi w wykorzystaniu przemysłowym.

W mojej opinii reaktory SMR stanowią idealne rozwiązanie dla inwestorów, chcących wykorzystać je np. do dekarbonizacji własnej produkcji gospodarczej, dlatego w tej funkcji widzę największe zastosowanie SMR-ów w Polsce.

W opinii ekspertów do największych barier rozwoju i stosowania SMR w Polsce należą długi proces uzyskiwania zgód i pozwoleń na budowę reaktorów (3,83/5), braki kadrowe (3,65/5) i wysoki koszt jednostkowy inwestycji (3,6/5). Za najmniej istotne bariery uznano sprzeciw społeczny wobec budowy SMR w najbliższym otoczeniu (2,41/5) i potencjalnie niewystarczającą liczbę lokalizacji, które spełniają wymogi pod budowę (2,6/5).

**Wykres 17. Ocena istotności barier dla przyszłości rozwoju rynku SMR w Polsce wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.)**



Uwaga: skala ocen od 0 (brak znaczenia bariery) do 5 (bardzo istotna bariera).

Źródło: opracowanie własne PIE.

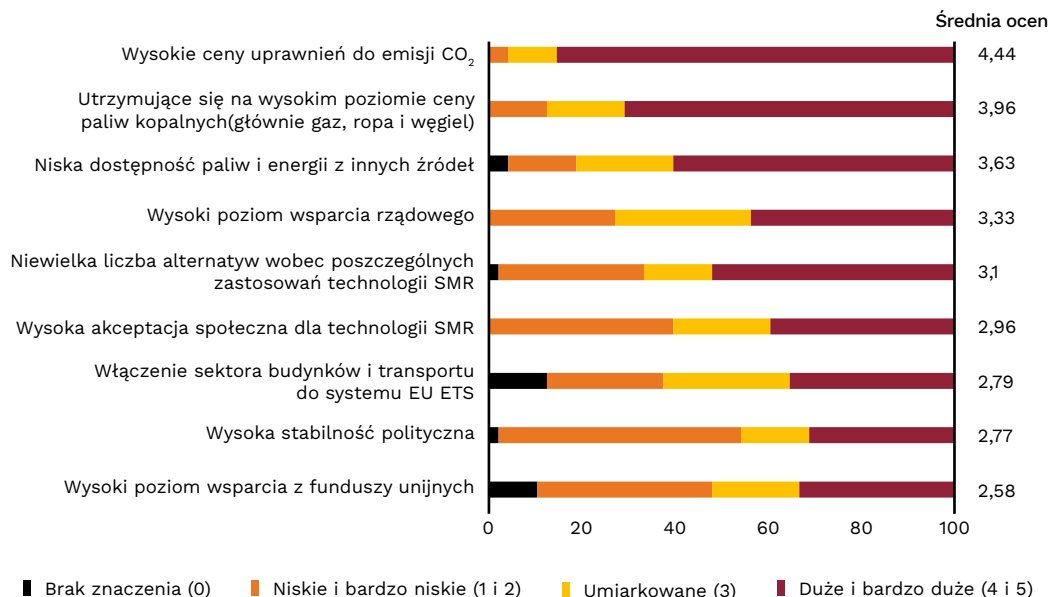
W komentarzach wskazywano także na wyzwania regulacyjne, wyższy niż zapowiadany przez producentów koszt mocy zainstalowanej i możliwe problemy z realizacją dużej liczby zamówień przez producentów:

*Poza wspomnianymi wyzwaniami, dodałbym również wyzwania regulacyjne, które będą szczególnie widoczne przy wykorzystaniu kilku różnych typów SMR w Polsce (również brak wystarczającej współpracy organów regulacyjnych na poziomie UE) oraz wyzwania związane z produkcją SMR po stronie producenta (duża liczba zamówień będzie miała kluczowy wpływ na możliwość realizacji tych inwestycji w przewidywalnym terminie).*

*Poważnym ograniczeniem wprowadzania każdej nowej technologii jest systematyczne podejście. Braki kadry przekładają się zmniejszone zaufanie społeczne a to na podatności na dezinformację, która rodzi dodatkowe pytania (często z braku wiedzy) a to może znacznie spowolnić inwestycje szczególnie tak medialne jak energetyka jądrowa.*

Za najważniejszy czynnik sprzyjający rozwojowi reaktorów SMR w Polsce uznano wysokie ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, które będą wymuszały szybką dekarbonizację (4,44/5). Jako istotne eksperci wskazali także na wysokie ceny paliw kopalnych (3,96/5) oraz możliwą niską dostępność paliw i energii z innych źródeł (3,63/5).

**Wykres 18. Ocena istotności czynników wspierających dla przyszłości rozwoju rynku SMR w Polsce wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.)**



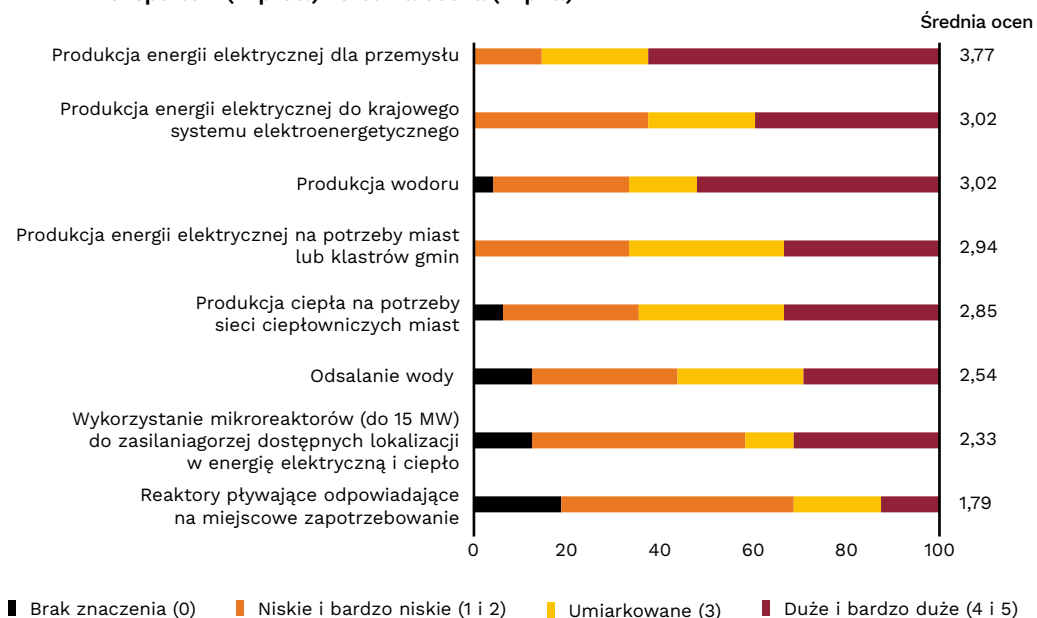
Uwaga: skala ocen od 0 (brak znaczenia czynnika) do 5 (bardzo istotny czynnik).

Źródło: opracowanie własne PIE.

Największy potencjał w zastosowaniu SMR na świecie eksperci dostrzegają w produkcji energii elektrycznej na potrzeby własne przemysłu (3,77/5). Stosunkowo wysoko oceniają także potencjał SMR do produkcji wodoru (3,02/5) i produkcję energii elektrycznej do krajowych systemów elektroenergetycznych (także 3,02/5). Najbardziej sceptyczni są natomiast w przypadku reaktorów pływających (1,77/5).

W przypadku możliwości zastosowania technologii SMR w Polsce eksperci najwyżej oceniali potencjał produkcji energii elektrycznej na potrzeby własne przemysłu (3,7/5). Większość ekspertów widzi natomiast zerowy potencjał wykorzystania w Polsce SMR do zasilania gorzej dostępnych lokalizacji w energię elektryczną (0,79/5), odsalania wody (0,6/5) i wykorzystania jednostek pływających (0,5/5).

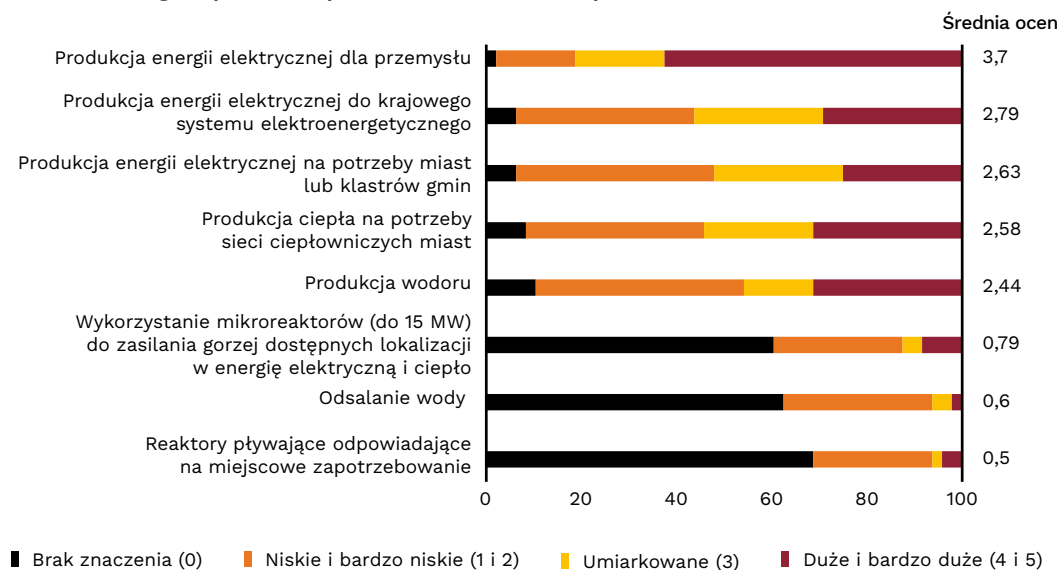
**Wykres 19. Ocena potencjału wybranych zastosowań technologii SMR w przyszłości na świecie wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.)**



Uwaga: skala ocen od 0 (brak potencjału) do 5 (bardzo wysoki potencjał).

Źródło: opracowanie własne PIE.

**Wykres 20. Ocena potencjału wybranych zastosowań technologii SMR w przyszłości w Polsce wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.)**



Uwaga: skala ocen od 0 (brak potencjału) do 5 (bardzo wysoki potencjał).

Źródło: opracowanie własne PIE.

#### **Ramka 4. Opinia na temat SMR przedstawicieli największych miast w Polsce**

W odpowiedzi na wysoką ocenę, jaką eksperci przyznali tezm o produkcji ciepła systemowego przez instalacje SMR w Polsce, zdecydowaliśmy się na przeprowadzenie wywiadów pogłębionych z przedstawicielami urzędów największych miast w Polsce. Z 25 rozestanych zapytań przedstawiciele 4 miast (Warszawa, Gdańsk, Bytom i Rybnik) wyrazili chęć udziału w badaniu.

W przeprowadzonych przez nas wywiadach pogłębionych przedstawiciele urzędów miast odpowiedzialni za obszar energii nie wykluczali wykorzystania tej technologii w przyszłości, zwłaszcza do produkcji ciepła w kogeneracji. Zwracali jednak uwagę, że obecnie nie ma planów, nawet w strategiach długoterminowych wykorzystania instalacji SMR, z powodu braku technologii na rynku i wysokiej liczby niewiadomych czynników, jak koszt czy data dostępności poszczególnych reaktorów.

Eksperti urzędów miejskich zwracali uwagę także na fakt ograniczenia możliwości wykorzystania reaktorów SMR w niektórych lokalizacjach – zwłaszcza w przypadku Śląska, gdzie część lokalizacji jest narażona na wstrząsy górnicze. Z kolei przedstawiciele miast znajdujących się poza regionem śląskim wskazywali na możliwość użycia reaktorów pływających (Gdańsk) lub umiejscowienie ich na miejscu obecnie funkcjonujących jednostek węglowych i gazowych (Warszawa). W tym drugim przypadku zaznaczano jednak konieczność zapewnienia energii cieplnej w czasie wymiany jednostki w danej lokalizacji i fakt, że część niedawno wybudowanych lub modernizowanych jednostek węglowych i gazowych będzie potrzebować minimum kilkunastu lat by zamortyzować koszt poniesionej inwestycji.

# Podsumowanie

Wysokie zainteresowanie reaktorami SMR w ostatnich dwóch latach potwierdza zapotrzebowanie na stabilne niskoemisyjne źródła energii, w które mogłyby inwestować inne podmioty niż państwo i największe spółki energetyczne. Prognozy dotyczące przyszłości reaktorów SMR obarczone są jednak dużą niepewnością wynikającą z niedojrzałości technologii. Według prognoz Agencji Energetyki Atomowej realizacja najbardziej pozytywnego scenariusza rozwoju technologii SMR globalnie przełożyłaby się na budowę 375 GWe do 2050 r. i pozwoliła uniknąć emisji 15 Gt CO<sub>2</sub>. W scenariuszu negatywnym liczne opóźnienia na etapie projektowania, licencjonowania i późniejszej budowy elektrowni w projektach pilotażowych przełożyłyby się na duży spadek zainteresowania tą technologią i w efekcie nikły udział w dekarbonizacji światowej gospodarki.

Badanie ekspertów ankietowanych przez PIE potwierdza duże rozbieżności opinii na temat przyszłości reaktorów SMR. 47 proc. respondentów określiło, że budowa pierwszego reaktora SMR będzie mieć średnie znaczenie dla transformacji energetycznej kraju. Wielu ekspertów wskazało, że technologia ta, choć może odegrać istotną rolę w procesie dekarbonizacji, nie zastąpi konieczności inwestycji w OZE i wielkoskalową energetykę jądrową. Z pewnym sceptycyzmem eksperci podchodzili też do zapowiedzi budowy pierwszych reaktorów SMR w Polsce jeszcze przed 2030 r. – 58 proc. ekspertów wskazywało, że ich zdaniem pierwsze reaktory SMR zostaną uruchomione w latach 2036-2040 (mediana wskazań 2038 r.). Większa liczba bloków SMR, których łączna moc przekroczy 5 GWe zdaniem połowy ekspertów powstanie nie wcześniej niż w 2045 r. Jako główne zastosowanie SMR badani wskazali produkcję energii elektrycznej na potrzeby własne przemysłu – obecnie grupa najbardziej energochłonnych przedsiębiorstw w Polsce zużywa 20 TWh rocznie, a cały przemysł 54 TWh, tj. 31 proc. całkowitego zapotrzebowania Polski na energię elektryczną. W przyszłości, wraz z dekarbonizacją przemysłu, zapotrzebowanie to będzie rosło – elektryfikacja samego hutnictwa może czterokrotnie podnieść zużycie energii w tym sektorze z obecnych 6-7 TWh do nawet powyżej 30 TWh.

Znacznie niżej eksperci oceniają potencjał wykorzystania SMR do produkcji wodoru. Też o 10-proc. udziale SMR w produkcji niskoemisyjnego wodoru za mało istotną dla polskiej transformacji energetycznej uznało aż 61 proc. badanych ekspertów, a jedynie 8 proc. wskazało na duże znaczenie tezy. Według respondentów energetyka jądrowa – w tym także SMR – będą potrzebne jako źródła działające w podstawie systemu, a wódór będzie produkowany przede wszystkim z nadwyżek energii z OZE (głównie *offshore*, *onshore* i fotowoltaiki)

Eksperti wskazali na wysoki potencjał SMR w produkcji ciepła systemowego. 53 proc. z nich uważa, że będzie to mieć istotny wpływ na transformację



energetyczną w Polsce. Uzasadniali swoją odpowiedź wysoką potrzebą dekarbonizacji ciepłownictwa, które w ok. 70 proc. jest dziś oparte na spalaniu węgla. Jednocześnie według ekspertów występuje tu mniejsza konkurencja alternatywnych technologii niż w przypadku produkcji energii elektrycznej, co powoduje, że wykorzystanie małych reaktorów jądrowych do produkcji ciepła (zarówno na potrzeby komunalne, jak i przemysłowe) staje się jednym z najważniejszych potencjalnych zastosowań małych reaktorów jądrowych. Zdaniem połowy ankietowanych takie zastosowanie SMR zacznie być wdrażane do 2041 r.

SMR są rozważane jako narzędzie do dekarbonizacji ciepłownictwa miast także za granicą, np. w Finlandii. Gdyby te rozwiązania przenieść do polskich miast, to w przypadku Warszawy (przy założeniu zapotrzebowania na ciepło na poziomie 14 TWh rocznie) wymagałoby to budowy bloków o łącznej mocy 900 MWe działających w modelu kogeneracyjnym, a w przypadku mniejszych miast wojewódzkich – bloków o łącznej mocy 200-300 MWe. W opinii przedstawicieli urzędów miast, z którymi PIE przeprowadzało wywiady pogłębione, na tak dużą inwestycję nie stać nawet najbogatszych samorządów. Budowa reaktorów SMR przeznaczonych do produkcji ciepła dla polskich miast musiałaby być więc w większości współfinansowana przez władze centralne i/lub największe spółki energetyczne.

Za najbardziej istotne bariery w budowie reaktorów SMR w Polsce eksperci uznali długi proces uzyskiwania zgód i pozwoleń (ocenia bezpieczeństwa, warunki środowiskowe, warunki lokalizacyjne), braki zasobów kadrowych i wysoki koszt jednostkowy produkcji. Zwracali także uwagę na przewidywane znacząco wyższe w stosunku do początkowych zapowiedzi koszty inwestycyjne. Jednocześnie według wskazań ekspertów, szybki rozwój rynku SMR w Polsce może być w istotny sposób stymulowany przez wysokie ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> i wysokie ceny paliw kopalnych, które będą skłaniać odbiorców – zwłaszcza przemysł energochłonny – do pilnego szukania stabilnych źródeł niskoemisyjnej energii.

# Rekomendacje

- **W celu zapewnienia seryjności produkcji reaktorów SMR konieczne jest wypracowanie wspólnych międzynarodowych wymogów, m.in. w dziedzinie procesu licencjonowania i oceny technologii.** Rozmowy, w których uczestniczą krajowe agencje dozoru jądrowego prowadzone są już w ramach Small Modular Reactor Regulator's Forum organizowanego przez MAEA.
- **Niezbędne jest jak najszybsze rozpoczęcie procesu wyboru lokalizacji pierwszych reaktorów i rozpoczęcie postępowania w sprawie wydania decyzji o uwarunkowaniach śródo-wiskowych, równoległe z przeprowadzaniem szerokich konsultacji społecznych.** Ze względu na podobną moc reaktorów SMR w przyszłości korzystne może być instalowanie ich w miejscu funkcjonujących lub już wycofanych bloków elektrowni węglowych. Kraje posiadające elektrownie jądrowe z kolei rozważają budowę pilotażowych projektów SMR w miejscu funkcjonowania wielkoskalowych elektrowni jądrowych, co pozwala uprościć proces uzyskiwania decyzji dotyczących lokalizacji i oceny oddziaływania środowiskowego.
- **Mimo wysokiej akceptacji dla wykorzystania technologii jądrowych w Polsce, konieczne są dalsze akcje edukacyjne, zwłaszcza wśród społeczności lokalnych w gminach, w których mają powstać reaktory SMR.** Lokalne społeczności powinny mieć możliwie największy wgląd w plany kolejnych etapów budowy i proces działania reaktora (wraz informacją na temat utylizacji odpadów radioaktywnych) oraz realny wpływ na decyzje o jego ulokowaniu w swoim sąsiedztwie.
- **Dofinansowania lub gwarancje państwowe obejmujące część kosztów reaktorów SMR wpływają na zmniejszenie ryzyka komplikacji podczas realizacji projektu.** Wielkość nakładów wymaganych do budowy reaktora SMR dalej pozostaje znacząco wyższa niż w przypadku budowy biogazowni, farmy wiatrowej czy paneli fotowoltaicznych. Wraz z niepewnością związaną z inwestycją w projekty pilotażowe może to zmniejszać zainteresowanie potencjalnych inwestorów. Udzielenie pomocy publicznej powinno jednak wiązać się z realnymi i wymiernymi korzyściami dla podatników i odbiorców energii.
- **W umowach nawiązywanych z dostawcami technologii SMR szczególnie istotny jest nacisk dotyczący terminowego dostarczenia oferowanej technologii i wyraźnie określona odpowiedzialność dostawców za brak wywiązywania się z ustalonego harmonogramu.** Eksperti biorący udział w naszym badaniu wyrażają sceptycyzm dotyczący daty budowy pierwszych reaktorów SMR w Polsce, który wynika w dużej mierze z niedostępności tej technologii na rynku. Jest to tym bardziej istotne,

że do tej pory dostawcy technologii wielokrotnie zmieniali zapowiadane terminy uzyskania certyfikacji dla technologii i w konsekwencji – budowy elektrowni pilotażowych.

- **Konieczna jest intensywna współpraca z uczelniami technicznymi w celu rozbudowy kierunków kształcących specjalistów z dziedziny energetyki jądrowej wraz z działaniami mogącymi zwiększyć zainteresowanie studentów wyborem takiej specjalizacji.** Polska, podobnie jak wiele innych krajów Unii, zmagą się z niedoborem specjalistów w dziedzinie energetyki jądrowej. Projekty związane z SMR – budowane w Polsce – będą musiały konkurować o specjalistów m.in. z trzema projektami elektrowni wielkoskalowych.

# Aneks metodologiczny

## Metodyka badań

Badanie zaprezentowane w raporcie zostało oparte na metodzie delfickiej, która jest rodzajem badania eksperckiego, w którym intuicyjne opinie ekspertów traktuje się jako prawomocny wkład w formułowanie wizji przyszłości przedmiotu badań. Metodę tę stosuje się do przewidywania rozwoju długoterminowych zjawisk w sytuacji niepewności, szczególnie wówczas, gdy: (I) przewidywane zjawiska nie poddają się technikom analitycznym charakterystycznym dla prognozowania, (II) na temat antycypowanych procesów nie istnieją wiarygodne dane bądź (III) determinujący wpływ na przewidywane zjawiska mają czynniki zewnętrzne (Nazarko, 2013, s. 46). Szczegółowa metodyka badawcza składała się z siedmiu etapów (rysunek 1)<sup>18</sup>.

**Rysunek 1. Metodyka postępowania badawczego**

1. Konstrukcja tez delfickich i pytań pomocniczych – Komitet Sterujący i Zespół Klimatu i Energii
2. Opracowanie kwestionariusza delfickiego – Zespół Klimatu i Energii
3. I runda oceny tez delfickich – eksperci
4. Opracowanie wyników I rundy – Zespół Klimatu i Energii
5. II runda oceny tez delfickich – eksperci
6. Opracowanie wyników II rundy – Zespół Klimatu i Energii

Źródło: opracowanie własne PIE.

Na pierwszym etapie postępowania, analitycy PIE wraz z Komitetem Sterującym składającym się z czterech członków, opracowali 5 tez delfickich odnoszących się do przyszłości rozwoju energetyki w Polsce. Ponadto opracowano także dodatkowe pytania ankietowe, które zadano ekspertom wyłącznie w pierwszej rundzie.

<sup>18</sup> Rozdział metodologiczny na podstawie opisu badania foresightowego w: Dębkowska i in. (2021).

Przygotowane tezy poddano ostatecznej weryfikacji. Prace te pozwoliły na opracowanie kwestionariusza delfickiego (drugi etap), który był narzędziem do przeprowadzenia I rundy oceny tez delfickich wśród 48 ekspertów – w formie badania ankietowego techniką CAWI (Computer Assisted Web Interviewing). Wybrana technika ma wiele zalet, a do najważniejszych należy zaliczyć:

- automatyczne weryfikowanie poprawności logicznej wprowadzonych danych,
- automatyczne zapisywanie na serwerze wyników badań,
- możliwość realizacji badań w przypadku grup respondentów rozproszonych na dużym obszarze geograficznym.

Dobór ekspertów do badania delfickiego był realizowany za pomocą doboru celowego. Przyjęto, że grono ekspertów będą tworzyć wybitni przedstawiciele: nauki, biznesu, organizacji pozarządowych i administracji publicznej.

Blisko 150 wybranym przedstawicielom tych grup wysłano zaproszenie do badania, a zgodę na uczestnictwo udzieliło 48 osób (lista ekspertów w załączniku). Należy podkreślić, że udział w badaniu wymaga od ekspertów poświęcenia. Z pewnością te czynniki niejednokrotnie były powodem odmowy udziału w badaniu.

Czwarty etap zaprezentowanej metodyki ogniskował się wokół opracowania wyników I rundy badania delfickiego i zaprezentowania wyników grupie tych samych badanych ekspertów w rundzie II (etap piąty). Wielokrotność ankietyzacji w badaniach delfickich ma na celu uzyskanie w miarę możliwości jednoznacznych wyników. Druga runda pozwala badanym ekspertom na weryfikację swoich opinii przez zapoznanie się z rozkładami odpowiedzi z pierwszej rundy. Ostateczne rezultaty, uzyskane w rundzie drugiej badania, zostały szczegółowo przeanalizowane podczas szóstego etapu postępowania badawczego.

Na potrzeby raportu i analizy dużych zbiorów danych przedstawiliśmy niektóre zmienne z kwestionariusza w postaci wskaźników, które syntetyzują i porządkują wyniki większej liczby szczegółowych obserwacji.

Aby określić znaczenie strategiczne poszczególnych tez dla rozwoju energetyki w kraju wyznaczono wskaźniki znaczenia (WZ) według wzoru:

$$W_Z = \frac{100 \cdot n_D + 50 \cdot n_S + 0 \cdot n_M}{n - n_{TO}} \quad (1)$$

gdzie:

$n_D$  liczba odpowiedzi „duże”,

$n_S$  liczba odpowiedzi „średnie”,

$n_M$  liczba odpowiedzi „małe”,

$n_{TO}$  liczba odpowiedzi „trudno określić”,

$n$  liczba wszystkich odpowiedzi.

Wskaźnik przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 100; im wartość bliższa 100, tym większe znaczenie strategiczne badanego obszaru przypisywane danej tezie.

### Próba badawcza

W pierwszej turze badania, w której zadano jednorazowe pytania dodatkowe, wzięło udział 48 ekspertów. Grupę respondentów stanowiło 6 kobiet i 42 mężczyzn reprezentujących zróżnicowane obszary. 44 proc. (21 osób) stanowili przedstawiciele nauki, a biznes i organizacje pozarządowe reprezentowało po 23 proc. (11 osób). Najmniej liczni byli przedstawiciele mediów (2 osoby) i administracji publicznej (2 osoby).

**Tabela 3. Charakterystyka grupy ekspertów biorących udział w badaniu**

Reprezentowany obszar		Płeć	
Nauka	21	Mężczyzna	42
Biznes	11	Kobieta	6
Organizacje pozarządowe	11		
Administracja publiczna	2		
Media	2		
Inne	1		

Źródło: opracowanie własne PIE.

Z grupy 48 ekspertów, którzy wzięli udział w I turze badania delfickiego wraz z jednorazowym kwestionariuszem dodatkowym, 36 wzięło udział w II turze badania. Z tego względu do oceny tez delfickich (I część kwestionariusza) bierzemy pod uwagę jedynie ekspertów, którzy wzięli udział w obu turach.

Grupę respondentów stanowiły 3 kobiety i 33 mężczyzn reprezentujących zróżnicowane obszary. Ponad 40 proc. (15 osób) stanowili przedstawiciele nauki, a biznes i organizacje pozarządowe reprezentowało po 25 proc. (9 osób). Najmniej liczni byli przedstawiciele mediów (2 osoby) i administracji publicznej (1 osoba).

**Tabela 4. Charakterystyka grupy ekspertów biorących udział w obu turach badania delfickiego**

Reprezentowany obszar		Płeć	
Nauka	15	Mężczyzna	33
Biznes	9	Kobieta	3
Organizacje pozarządowe	9		
Media	2		
Administracja publiczna	1		
Inne	1		

Źródło: opracowanie własne PIE.

# Bibliografia

- Brook, B.W., Bradshaw, C.J.A. (2015), *Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation*, „Conservation Biology”, No. 29.
- CNEA (2017), *Lima Carem 25 Nuclear Plant 33 MW*, <https://www.globaldata.com/store/report/cnea-lima-carem-25-nuclear-plant-33-mw-buenos-aires/> [dostęp: 02.02.2023].
- Derr, E. (2022), *Energy Studies and Models Show Advanced Nuclear as the Backbone of Our Carbon-Free Future*, <https://www.nei.org/news/2022/studies-and-models-show-demand-for-adv-nuclear> [dostęp: 03.02.2023].
- Dębowska, K., Juszcak, A., Maj, M., Szymańska, A. (2021), *Foresight energetyczny Polski*, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa.
- DISE (2021), *Zielony wodór z OZE w Polsce*, <https://dise.org.pl/Raport-Zielony-Wodor-z-OZE.pdf> [dostęp: 05.03.2023].
- DISE (2022), *Gaz Zakładnikiem Geopolityki, Wykorzystanie gazu ziemnego na cele energetyczne w Unii Europejskiej w aspekcie oddziaływania czynników geopolitycznych*, Warszawa.
- IAEA (2019), *Status Report – UK SMR (Rolls-Royce and Partners)*, [https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR_2020.pdf) [dostęp: 05.03.2023].
- IEA (2021), *Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector*, [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf) [dostęp: 05.03.2023].
- IPCC (2014), *Aneks III: Technology-specific Cost and Performance Parameters*, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf) [dostęp: 09.05.2023].
- Jackowiak, J. (2022), *Wysokie koszty energii i pracy doskwierają firmom*, <https://grantthornton.pl/publikacja/wysokie-koszty-energii-i-pracy-doskwieraja-firmom/> [dostęp: 05.03.2023].
- Juszcak, A. (2022), *Ekonomiczne aspekty inwestycji jądrowych w Polsce – wpływ na biznes, rynek pracy i społeczności lokalne*, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa.
- Lliou, J. (2021), *What are Small Modular Reactors (SMRs)?*, <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> [Dostęp: 10.02.2023].
- Lipka, M. (2020), *Program Polskiej Energetyki Jądrowej, a małe reaktory modułowe*, „PTJ” nr 63.
- Locatelli, G. i in. (2018), *Load following of Small Modular Reactors (SMR) by cogeneration of hydrogen: A techno-economic analysis*, „Energy”, No. 148.
- Mignacca, B., Giorgio L., Sainati, T. (2020), *Deeds not words: Barriers and remedies for Small Modular nuclear Reactors*, „Energy” No. 206.



- Milewski, J. i in. (2021), *Hydrogen production in solid oxide electrolyzers coupled with nuclear reactors*, „International Journal of Hydrogen Energy”, No. 46.
- Nazarko, J. (2013), *Regionalny foresight gospodarczy. Metodologia i instrumentarium badawcze*, Związek Pracodawców Warszawy i Mazowska, Warszawa, <https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/7507/Regionalny%20foresight%20gospodarczy.%20Metodologia%20i%20instrumentarium%20badawcze.pdf;sequence=1> [dostęp: 21.03.2023].
- NEA (2021), *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*, [https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560\\_smr\\_report.pdf](https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf) [dostęp: 29.01.2023].
- Nucleareurope (2022), *New nuclear solutions: small modular reactors*, <https://www.nucleareurope.eu/press-release/small-modular-reactors/> [dostęp: 29.01.2023].
- OECD (2016), *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*.
- OECD (2021), *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*, NEA No. 7560.
- Pieńkowski, L. (2022), *Wyzwania energetyki jądrowej w KGHM Polska Miedź*, <https://www.forum-ekonomiczne.pl/wyzwania-energetyki-jadrowej-w-kghm-polska-miedz/> [dostęp: 23.01.2023].
- RePlanet (2023), *The Worlds wants new nuclear, Findings from a comprehensive evaluation of the world's understanding and support for advanced nuclear*, <https://www.replanet.ngo/post/world-wants-new-nuclear> [dostęp: 12.05.2023].
- Think Atom (2019), *Nuclear District Heating in Finland, The Demand, Supply and Emissions Reduction Potential of Heating Finland with Small Nuclear Reactors*, [https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2019/04/nuclear-district-heating-in-finland\\_1-2\\_web.pdf](https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2019/04/nuclear-district-heating-in-finland_1-2_web.pdf) [dostęp: 05.03.2023].
- Think Atom (2022), *Shipyard Nuclear in Finland*, [https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2022/06/shipyard\\_report\\_web.pdf](https://thinkatomnet.files.wordpress.com/2022/06/shipyard_report_web.pdf) [dostęp: 05.03.2023].
- Tomaszewski, R. (2020), *Ciepło do zmiany, Jak zmodernizować sektor ciepłownictwa systemowego w Polsce*, [http://zasoby.politykainsight.pl/pi2/pdf/Polityka\\_Insight\\_-\\_Cieplo\\_do\\_zmiany.pdf](http://zasoby.politykainsight.pl/pi2/pdf/Polityka_Insight_-_Cieplo_do_zmiany.pdf) [dostęp: 05.03.2023].
- UNECE (2022), *Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources*, [https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA\\_3\\_FINAL%20March%202022.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf) [dostęp: 05.03.2023].
- Weimar, M.R. i in. (2021), *Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest*, Pacific Northwest National Laboratory, Waszyngton.
- (www1) <https://wysokienapiecie.pl/krotkie-spiecie/rz-d-przyj-za-oenia-do-aktualizacji-polityki-energetycznej-polski-do-2040-r/> [dostęp: 05.03.2023].

- (www2) <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> [dostęp: 15.03.2023].
- (www3) <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> [dostęp: 08.03.2023].
- (www4) <https://www.nei.org/advocacy/build-new-reactors/small-modular-reactors> [dostęp: 15.03.2023].
- (www5) <https://aris.iaea.org/sites/overview.html> [dostęp: 05.03.2023].
- (www6) [https://www.linkedin.com/posts/maciej-lipka-atom\\_w-dzienniku-urz%C4%99dowym-usa-ukaza%C5%82-si%C4%99-zatwierdzony-activity-7024505824924295168-rH1k?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop](https://www.linkedin.com/posts/maciej-lipka-atom_w-dzienniku-urz%C4%99dowym-usa-ukaza%C5%82-si%C4%99-zatwierdzony-activity-7024505824924295168-rH1k?utm_source=share&utm_medium=member_desktop) [dostęp: 23.02.2023].
- (www7) <https://www.nuscalepower.com/en/Products/VOYGR-SMR-Plants> [dostęp: 23.02.2023].
- (www8) <https://www.bbc.com/news/business-59212983> [dostęp: 13.02.2023].
- (www9) <https://www.neimagazine.com/news/newsrolls-royce-smr-begins-uk-generic-design-assessment-9598877> [dostęp: 13.02.2023].
- (www10) <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwr-300> [dostęp: 02.02.2023].
- (www11) <https://www.opg.com/story/opg-darlington-small-modular-reactor-project-passes-significant-milestones/> [dostęp: 01.02.2023].
- (www12) <https://nuclear.pl/wiadomosci,news,21070802,0,0.html> [dostęp: 03.02.2023].
- (www13) <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Construction-of-Argentinas-small-CAREM-25-unit-to> [dostęp: 15.02.2023].
- (www14) <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-SMR-project-enters-installation-phase> [dostęp: 15.02.2023].
- (www15) <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/producing-a-climate-friendly-energy/nuclear-energy/shaping-the-future-of-nuclear/the-nuwardtm-smr-solution/the-solution> [dostęp: 16.02.2023].
- (www16) <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/European-regulators-to-cooperate-on-Nuward-licens> [dostęp: 16.02.2023].
- (www17) <https://www.nnl.co.uk/2014/12/nnl-publishes-report-on-small-modular-reactor-technology/> [dostęp: 18.02.2023].
- (www18) <https://fermi.ee/en/fermi-energia-chooses-ge-hitachis-bwr-300-as-the-technology-for-planned-smr-nuclear-power-plant-in-estonia/> [dostęp: 17.02.2023].
- (www19) <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/NuScale-marks-SMR-progress-in-USA,-Romania> [dostęp: 14.02.2023].
- (www20) <https://world-nuclear-news.org/Articles/Funding-for-demonstration-Swedish-SMR> [dostęp: 13.02.2023].
- (www21) <https://biznesalert.pl/synthos-zamowi-dziesiec-reaktorow-pierwszy-w-2029-roku-potem-caly-lancuch-dostaw/> [dostęp: 20.02.2023].
- (www22) <https://www.money.pl/gospodarka/pierwszy-reaktor-jadrowy-bwr-300-moze-trafic-do-polski-w-2029-r-6799193963879392a.html> [dostęp: 15.02.2023].

- (www23) <https://www.wnp.pl/energetyka/obajtek-orlen-ma-bardzo-ambitne-plany-zwiazane-z-reaktorami-smr,672287.html> [dostęp: 20.02.2023].
- (www24) <https://forsal.pl/biznes/energetyka/artykuly/8632453, male-reaktory-atomowe-dla-kghm-i-orlen-panstwowa-agencja-atomistyki-analizuje-wnioski.html> [dostęp: 20.02.2023].
- (www25) <https://media.kghm.com/pl/informacje-prasowe/kghm-polska-miedz-sa-i-sn-nuclearelectrica-sa-podpisaly-memorandum-o-wspolpracy-przy-rozwoju-smr> [dostęp: 20.02.2023].
- (www26) <https://businessinsider.com.pl/firmy/atomowe-plany-spolki-sebastiana-kulczyka-ciech-oprocz-smr-analizuje-tez-magazyny/5m5jse2> [dostęp: 20.02.2023].
- (www27) <https://www.unimot.pl/aktualnosci/nuscale-power-podpisuje-porozumienie-o-wspolpracy-mou-z-getka-i-unimot-w-celu-rozpoznania-mozliwosci-wdrozenia-technologie-smr-w-polsce/> [dostęp: 20.02.2023].
- (www28) <https://respect.energy/respect-energy-i-edf-podpisaly-porozumienie-o-rozwijaniu-projektow-energetyki-jadrowej-w-polsce/> [dostęp: 20.02.2023].
- (www29) <https://www.neimagazine.com/news/newslast-energy-secures-power-purchase-deals-for-34-smrs-in-poland-and-the-uk-10708386> [dostęp: 20.02.2023].
- (www30) <https://zpp.net.pl/stanowisko-zpp-ws-ochrony-polskiego-przemyslu-przed-wzrostami-kosztow-energii-elektrycznej-i-gazu/> [dostęp: 20.03.2023].
- (www31) <https://www.gov.pl/web/rozwoj-technologie/5-mld-zl-rekompensat-za-2022-r-dla-firm-energochlonnych> [dostęp: 22.03.2023].
- (www32) <https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/elektryfikacja-hutnictwa-zwiekszy-pieciokrotnie-zapotrzebowanie-tego-sektora-na-energie-elektryczna-> [dostęp: 20.03.2023].
- (www33) <https://www.reuters.com/business/energy/us-approves-design-nuscale-small-modular-nuclear-reactor-2023-01-20/> [dostęp: 21.03.2023].
- (www34) [https://ppte2050.pl/platforman/bzpppte/static/uploads/04.%20m.st.%20Warszawa\\_Model%20energetyczny%20Warszawy%202050\\_L.Drogosz.pdf](https://ppte2050.pl/platforman/bzpppte/static/uploads/04.%20m.st.%20Warszawa_Model%20energetyczny%20Warszawy%202050_L.Drogosz.pdf) [dostęp: 23.03.2023].
- (www35) <https://www.power-technology.com/projects/akademik-lomonosov-nuclear-co-generation-russia/> [dostęp: 19.03.2023].
- (www36) <https://www.gov.pl/web/klimat/rekordowe-poparcie--86-polakow-za-budowa-elektrowni-jadrowych-w-polsce> [dostęp: 12.03.2023].
- (www37) <https://www.gov.pl/web/klimat/poparcie-spoeczne-dla-budowy-elektrowni-jadrowej-w-polsce---badania-z-listopada-2020-r> [dostęp: 12.05.2023].

# Spis ramek, rysunków, tabel i wykresów

## SPIS RAMEK

Ramka 1. Środowiskowe zalety wykorzystania energii jądrowej. . . . .	16
Ramka 2. Inne sposoby wykorzystania SMR w przyszłości . . . . .	22
Ramka 3. Akceptacja społeczna dla energetyki jądrowej w Polsce . . . . .	34
Ramka 4. Opinia na temat SMR przedstawicieli największych miast w Polsce . . . . .	39

## SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Metodyka postępowania badawczego . . . . .	44
---	----

## SPIS TABEL

Tabela 1. Scenariusze globalnej produkcji wodoru w 2050 r. z wyszczególnieniem udziału purpurowego wodoru . . . . .	21
Tabela 2. Zestawienie tez prezentowanych respondentom i odsetek odpowiedzi wyrażających poparcie. . . . .	34
Tabela 3. Charakterystyka grupy ekspertów biorących udział w badaniu . . . . .	46
Tabela 4. Charakterystyka grupy ekspertów biorących udział w obu turach badania delfickiego. . . . .	47

## SPIS WYKRESÓW

Wykres 1. Liczba projektów SMR w podziale na poziom rozwoju projektu i wielkość reaktora (w MWe) . . . . .	9
Wykres 2. Mediana intensywności emisji w cyklu życia elektrowni (gCO <sub>2</sub> ekw/kWh). . . . .	17
Wykres 3. Struktura wytwarzania ciepła systemowego w Polsce i Warszawie w 2020 r. (w proc.) . . . . .	19
Wykres 4. Znaczenie tezy: W Polsce zostanie uruchomiony pierwszy reaktor SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) . . . . .	23
Wykres 5. Czas realizacji tezy: W Polsce zostanie uruchomiony pierwszy reaktor SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach) . . . . .	24
Wykres 6. Znaczenie tezy: W Polsce zostanie uruchomiony pierwszy reaktor SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) . . . . .	25

Wykres 7. Czas realizacji tezy: Moc zainstalowanych w Polsce bloków SMR przekroczy 5 GWe – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach). . . . .	26
Wykres 8. Znaczenie tezy: Bloki SMR zaczną być wykorzystywane do produkcji ciepła systemowego w Polsce – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) . . . . .	27
Wykres 9. Czas realizacji tezy: Bloki SMR zaczną być wykorzystywane do produkcji ciepła systemowego w Polsce – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach). . . . .	28
Wykres 10. Znaczenie tezy: Ciepło systemowe w 10 największych polskich aglomeracjach przynajmniej w 20 proc. będzie pochodzić z SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) . . . .	29
Wykres 11. Czas realizacji tezy: Ciepło systemowe w 10 największych polskich aglomeracjach przynajmniej w 20 proc. będzie pochodzić z SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach). . . . .	30
Wykres 12. 10 proc. produkcji wodoru w Polsce ze źródeł niskoemisyjnych (zielony i różowy wodór) będzie pochodzić z instalacji SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.). . . . .	31
Wykres 13. Czas realizacji tezy: 10 proc. produkcji wodoru w Polsce ze źródeł niskoemisyjnych (zielony i różowy wodór) będzie pochodzić z instalacji SMR – porównanie dwóch rund badania delfickiego (w proc.) i mediana czasu realizacji (w latach) . . . . .	32
Wykres 14. Akceptacja społeczna SMR wg ekspertów (w proc.) . . . . .	33
Wykres 15. Odpowiedzi respondentów na tezę: Popieram wykorzystanie najnowszych technologii jądrowych do produkcji energii elektrycznej (obok innych źródeł energii) (w proc.). . . . .	34
Wykres 16. Udział energii wytwarzanej z instalacji SMR użytkowany na potrzeby własne inwestorów wg ekspertów (w proc.). . . . .	35
Wykres 17. Ocena istotności barier dla przyszłości rozwoju rynku SMR w Polsce wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.). . . . .	36
Wykres 18. Ocena istotności czynników wspierających dla przyszłości rozwoju rynku SMR w Polsce wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.) . . . . .	37
Wykres 19. Ocena potencjału wybranych zastosowań technologii SMR w przyszłości na świecie wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.) . . . . .	39
Wykres 20. Ocena potencjału wybranych zastosowań technologii SMR w przyszłości w Polsce wg ekspertów (w proc.) i średnia ocena (w pkt.) . . . . .	38

# Lista ekspertów

prof. dr hab. Józef Andrzejewski, profesor, Katedra Fizyki Jądrowej i Bezpieczeństwa Radiacyjnego, Uniwersytet Łódzki

dr hab. inż. Łukasz Bartela, profesor uczelni, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska

Dominik Bieczyński, założyciel portalu Zielony Atom

Adam Błażowski, wiceprezes, FOTA4Climate

prof. dr hab. inż. Andrzej Grzegorz Chmielewski, dyrektor naczelny, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Thierry Deschaux, dyrektor generalny, EDF Przedstawicielstwo w Polsce

Adam Dominiak, członek zarządu, Enervigo

Katarzyna Gotowicka, Project Manager Associate, Orlen Synthos Green Energy

dr. Izabela Gutowska, assistant professor, Oregon State University

prof. dr hab. inż. Wacław Gudowski, Royal Institute of Technology – KTH, Narodowe Centrum Badań Jądrowych – NCBJ, doradca OSGE i członek komisji bezpieczeństwa jądrowego NCBJ

dr Bożena Horbaczewska, adiunkt, Katedra Ekonomii II, Szkoła Główna Handlowa

Ziemowit Iwański, Vice President Commercial and Business Development CEE, Ultra Safe Nuclear

Tomasz Jankowiak, Nuclear Business Development, EDF Przedstawicielstwo w Polsce

dr inż. Filip Jędrzejek, adiunkt, Wydział Energetyki i Paliw, Akademia Górniczo-Hutnicza

dr hab. inż. Daniel Kikoła, profesor uczelni, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

prof. dr hab. Szymon P. Malinowski, wydział fizyki, Uniwersytet Warszawski

Krzysztof Mech, zastępca dyrektora departamentu gospodarki niskoemisyjnej, Ministerstwo Rozwoju i Technologii

Mike Modro, NINE Nuclear and Industrial Engineering,

Monika Morawiecka, starszy doradca, Regulatory Assistance Project

dr Tomasz Nowacki, członek zarządu, PGE PAK Energia Jądrowa

Filip Piasecki, Market Lead - Poland, Aurora Energy Research

Dawid Piekarz, ekspert ds. transformacji energetycznej Orlen Synthos Green Energy

dr hab. inż. Tomasz Piotrowski, adiunkt, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

dr hab. Mariusz Plich, profesor uczelni, Instytut Ekonometrii, Uniwersytet Łódzki

prof. Michał Podowski, professor emeritus, były dyrektor Centrum Badań Wielofazowych i profesor inżynierii jądrowej, Rensselaer Polytechnic Institute

Mateusz Sienkan, FOTA4Climate

Łukasz Skrzyński, doradca, Izba Gospodarcza Energetyki i Ochrony Środowiska

doc. dr inż. Paweł Skowroński, docent, Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska

Michał Smoleń, kierownik programu Energia&Klimat, Instrat

dr Józef Sobolewski, pełnomocnik dyrektora ds. rozwoju reaktorów wysokotemperaturowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych

dr hab. Piotr Stankiewicz, profesor UMK, Instytut Socjologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Witold Strzelecki, dyrektor, Kreab Brussels

Aleksander Śniegocki, prezes, Instytut Reform

prof. dr hab. inż. Konrad Świrski, profesor, Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska

Dominika Taranko, dyrektorka Forum Energii i Klimatu, Związek Pracodawców i Przedsiębiorców

Robert Tomaszewski, szef działu energetycznego, Polityka Insight

Eryk Turski, Licensing Senior Specialist, Orlen Synthos Green Energy

Jakub Wiech, redaktor naczelny, Energetyka24

Michał Wojtyła, wicedyrektor Centrum Analiz, Klub Jagielloński

Paweł Żbikowski, prezes zarządu, Fundacja nuclear.pl

Przemysław Żydak, ekspert i współwłaściciel, Sotis Advisors

7 ekspertów biorących udział w badaniu poprosiło o zachowanie anonimowości

# Polski Instytut Ekonomiczny

Polski Instytut Ekonomiczny to publiczny *think tank* ekonomiczny z historią sięgającą 1928 roku. Jego obszary badawcze to przede wszystkim makroekonomia, energetyka i klimat, handel zagraniczny, foresight gospodarczy, gospodarka cyfrowa i ekonomia behawioralna. Instytut przygotowuje raporty, analizy i rekomendacje dotyczące kluczowych obszarów gospodarki oraz życia społecznego w Polsce, z uwzględnieniem sytuacji międzynarodowej.