

Globalny popyt na srebro a rozwój fotowoltaiki w dobie zmian klimatycznych

Natalia Iwaszczuk, Jarosław Baran



Kraków 2022

Natalia Iwaszczuk, Jarosław Baran

**Globalny popyt na srebro a rozwój
fotowoltaiki w dobie zmian
klimatycznych**

Wydawnictwo IGSMiE PAN
Kraków 2022

RECENZENCI

prof. dr hab. inż. Agnieszka Generowicz
dr hab. inż. Piotr Łebkowski, prof. AGH

Wydanie publikacji finansowane przez
Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie
(subwencja na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego)

dr hab. inż. Natalia IWASZCZUK, prof. AGH
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania

mgr Jarosław BARAN
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Szkoła Doktorska

ADRES REDAKCJI

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk
ul. J. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków
tel.: +48 12 632 33 00; fax: +48 12 632 35 24

Redaktor Wydawnictwa: Emilia Rydzewska-Smaza
Redaktor techniczny: Barbara Sudoł, Beata Stankiewicz
Projekt okładki: dr Aleksander Iwaszczuk

© Copyright by Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN

Kraków 2022

Printed in Poland

ISBN 978-83-964234-6-7

eISBN 978-83-964234-7-4

Spis treści

Wprowadzenie	
Część I. Fotowoltaika częścią nowej polityki energetycznej	
1. Zmiany klimatyczne wynikiem działalności gospodarczej	9
1.1. Czynniki wpływu na klimat	9
1.2. Globalne ocieplenie – wpływ na środowisko	13
1.3. Wpływ zmian klimatycznych na ludzkość	13
2. Nasilające się skutki zmian klimatycznych w ostatnich latach	16
2.1. Ekonomiczne straty z powodu globalnego ocieplenia	18
2.2. Katastrofy naturalne w 2018 roku	18
2.3. Katastrofy naturalne w 2019 roku	20
2.4. Katastrofy naturalne w 2020 roku	21
2.5. Katastrofy naturalne w 2021 roku	22
3. Nowa polityka energetyczna sposobem na ograniczenie zmian klimatycznych	24
3.1. Opracowanie i wdrażanie nowej polityki energetycznej	24
3.2. Wdrażanie fotowoltaiki a zapotrzebowanie na surowce	34
Część II. Czynniki wpływu na rynek srebra z uwzględnieniem rozwoju rynku paneli PV	
4. Analiza globalnego rynku srebra	37
4.1. Historia srebra	37
4.2. Popyt i podaż na rynku srebra	44
4.3. Cena srebra wynikiem wpływu czynników zewnętrznych	47
5. Wykorzystanie srebra w fotowoltaice	51
6. Rozwój fotowoltaiki a zużycie srebra	53
6.1. Zużycie srebra w fotowoltaice	53
6.2. Zastąpienie srebra w panelach PV	56
6.3. Efektywność ogniw PV	57
7. Recykling paneli PV źródłem srebra wtórnego	59
8. Czynniki wpływu na rynek srebra	62
Część III. Prognoza globalnego popytu na srebro na podstawie scenariuszy energetycznych	
9. Scenariusze energetyczne oraz założenia dotyczące udziału fotowoltaiki	67
9.1. Scenariusze i ich aktualizacja	67
9.2. Czynniki uwzględniane w scenariuszach energetycznych	69
9.3. Koszty instalacji źródeł energii wyznacznikiem ich wdrażania	73
9.4. Prognozowanie a dostępność danych	75
9.5. Mnogość rodzajów scenariuszy energetycznych	77
9.6. Wpływ czynników zewnętrznych na scenariusze energetyczne	85
10. Prognozy popytu na srebro dla fotowoltaiki a zmiany w otoczeniu rynkowym	86
11. Analiza wybranych scenariuszy energetycznych	89
11.1. Scenariusz odniesienia, Reference scenario (REF)	91
11.2. Scenariusz energetycznej m.in. ewolucji, Energy [R]evolution scenario (E[R])	92
11.3. Scenariusz zaawansowanej m.in. ewolucji energetycznej, Advanced Energy [R]evolution scenario (ADV E[R])	92

11.4. Scenariusz od International Energy Agency (IEA) – Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector	93
12. Prognozy na podstawie zbudowanego modelu	96
12.1. Główne założenia modelu.....	97
12.2. Dane wejściowe do modelu	99
12.3. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu	101
12.4. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników – dla różnych scenariuszy	104
12.5. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników – dla wybranych determinant	106
12.6. Zestawienie otrzymanych wyników.....	106
Posumowanie i wnioski	113
Bibliografia	119
Spis tabel.....	126
Spis rysunków	127

Wprowadzenie

Eksploatacja paliw kopalnych, zarówno w Polsce, jak i na całym świecie, staje się coraz większym problemem nie tylko dla ludzkości, ale i całej Ziemi. Od zakończenia II wojny światowej nastąpił znaczący, kilkukrotny przyrost wykorzystania energii pierwotnej, z czego przytłaczająca jej większość pochodzi ze źródeł konwencjonalnych (głównie kopalnych). Taki stan rzeczy implikuje szereg kwestii do rozwiązania w najbliższej przyszłości. Wyczerpywanie się zasobów surowców energetycznych, takich jak węgiel, ropa naftowa czy gaz ziemny to pierwszy i najbardziej oczywisty aspekt nadmiernej eksploatacji tych kopalin. Jednakże wraz ze zwiększaniem zużycia tego rodzaju paliw, coraz większego znaczenia nabiera problem związany z emisją zanieczyszczeń, powstałych z ich spalania. Produkcja energii z konwencjonalnych źródeł, tj. węgla, ropy naftowej oraz gazu ziemnego powoduje nadmierną emisję gazów cieplarnianych i pyłów, jest także źródłem znaczących zanieczyszczeń, degradacji środowiska, w końcowym efekcie prowadząc do zmian klimatycznych, jak i powodując szereg chorób u ludzi. Dodatkowo, uzależnienie się od paliw kopalnych istotnie wpływa na bezpieczeństwo energetyczne, co nie jest bez znaczenia w przypadku krajów i regionów, które muszą takie surowce energetyczne importować. Dobitnie to pokazały ostatnie wydarzenia związane z agresją militarną Rosji przeciwko Ukrainie w lutym 2022 roku, co przełożyło się w efekcie na odcięcie dostaw gazu z kraju-agresora do większości krajów Europy.

Państwa Unii Europejskiej zostały zobligowane do przyjęcia strategii energetyczno-klimatycznej, mającej na celu między innymi redukcję emisji gazów cieplarnianych, zwiększenie efektywności energetycznej oraz zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii (OZE). Zarówno tzw. porozumienie paryskie zawarte w grudniu 2015 r., jak i wynikające z nich pakiety regulacyjne Wspólnoty, mają na celu osiągnięcie do 2050 roku neutralności klimatycznej przez UE. Dla Polski oznacza to transformację sektora energetycznego na ogromną skalę. Zarówno przyjęty w 2010 roku „Krajowy Plan Działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych”, jak i kolejny projekt pod nazwą „Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030” czy też zatwierdzona w marcu 2021 roku, zmodyfikowana „Polityka Energetyczna Polski do 2040 r.” (PEP 2040), skupiają się na konieczności stopniowej dekarbonizacji tego sektora kosztem zwiększonej roli OZE w koszyku ener-

getycznym Rzeczypospolitej. Mimo znaczącego spadku udziału węgla w polskiej elektroenergetyce w ostatnich latach, istotny jest fakt, że nadal wartości te są dużo większe niż w pozostałych krajach UE, co stawia dodatkowe wyzwania w procesie transformacji, związane z koniecznością jej przyspieszenia i dostosowania do nowej strategii. Co więcej sytuacja geopolityczna w regionie zmusiła powrót do technologii węglowych, co bez wątpienia negatywnie wpłynie na ekologię w naszym kraju.

Obecnie „zielona energia” w Polsce pochodzi w znaczącej większości – bo w około 80% – z biopaliw. Kolejna pod względem udziału, energia wiatru to zaledwie 12%, z kolei wszystkie pozostałe źródła odpowiadają za dostarczenie pozostałych 8%. Tak znacząca różnica produkcji pomiędzy poszczególnymi rodzajami OZE wynika zarówno ze specyfiki polskiego ekosystemu i uwarunkowań geograficznych, jak i z przyczyn ekonomiczno-politycznych. Wspomniana PEP 2040 ma istotnie zmienić zarówno znaczenie zielonej energii w koszyku energetycznym, jak i zmniejszyć istniejące obecnie dysproporcje. Oznacza to zaangażowanie ogromnych środków unijnych oraz krajowych, szacowanych na około 260 mld złotych w ciągu najbliższych dziesięciu lat. Zeroemisyjny system energetyczny przewiduje między innymi większy udział fotowoltaiki czy morskiej energetyki wiatrowej, a udział OZE w końcowym zużyciu energii brutto ma zwiększyć się o blisko 10% i wynieść nie mniej niż 23%, a jednocześnie wartość ta w elektroenergetyce ma osiągnąć poziom przynajmniej 32%.

Jednym z najbardziej popularnych „zielonych” rozwiązań energetycznych stała się fotowoltaika. Gwałtowny wzrost zainteresowania tym rodzajem OZE w Polsce to skumulowany efekt coraz niższych cen paneli PV przy coraz wyższej ich wydajności, a także uruchomienie pomocowych programów rządowych, mających na celu finansowe wsparcie prosumentów poprzez m.in. dotacje do nowych instalacji. Pozwoliło to na kilkusetprocentowy wzrost pozyskiwania energii z tego źródła, jednakże nadal wielkość ta jest niewielka – z tego też powodu nadal istnieją znaczące możliwości rozwoju takich instalacji. Analogicznie, odpowiednie działania mogą przynieść podobne efekty z pozostałych źródeł OZE – energetyki wiatrowej (morskiej oraz lądowej), hydroenergetyki czy też energetyki geotermalnej.

Wzrost znaczenia OZE wiąże się w naturalny sposób ze zwiększonym zapotrzebowaniem na surowce niezbędne do jej produkcji. Należy przyjąć, że w przypadku wypełnienia poszczególnych celów na lata 2030–2040–2050, w każdym z tych okresów nastąpi silny przyrost zapotrzebowania na cały szereg surowców, przy czym podaż niektórych z nich może okazać się niewystarczająca do pełnego zaspokojenia popytu wygenerowanego przez rynek. Ograniczeniem już nawet za kilka-kilkanaście lat mogą okazać się zarówno popularne metale, takie jak miedź, aluminium, srebro czy złoto, jak i te wykorzystywane, ale i jednocześnie wydobywane w mniejszych ilościach – kadm, tellur, ind, selen, mangan, lit, kobalt, neodym czy dysproz. Brak możliwości zaspokojenia pełnego popytu z tej strony może przyczynić się do spowolnienia rozwoju energetyki zeroemisyjnej.

Dlatego tak ważne jest wieloczynnikowe szacowanie zapotrzebowania na surowce niezbędne w kontekście rozwoju energetyki OZE w Polsce. Zapewnienie wystarczającej ilości surowców jest kluczowe dla realizacji założeń zawartych zarówno w krajowych, jak i unijnych celach, zmierzających do zeroemisyjnej energetyki, opartej na czystej, w pełni odnawialnej energii. Z tego powodu już teraz niezbędne jest wyznaczenie wartości przyszłego zapotrzebowania ze strony OZE na poszczególne surowce, ze szczególnym uwzględnieniem tych, których pozyskanie jest wyjątkowo wrażliwe np. metali ziem rzadkich, oraz pierwiastków, których odzyskanie w drodze recyklingu może okazać się niemożliwe bądź utrudnione. Istotną kwestią jest także zbadanie, popyt na które z analizowanych surowców może zostać zaspokojony poprzez produkcję krajową, a które z nich będą musiały być importowane, a także – w jakich ilościach. Dodatkowo, konieczne jest uwzględnienie szeregu innych czynników, wpływających na kształtowanie się zarówno popytu, jak i podaży. Pierwszym z nich jest postęp technologiczny, skutkujący całkowitą lub częściową zmianą wykorzystania danego surowca (całkowite bądź częściowe zastąpienie jednego przez inny, zmniejszenie ilości itd.). Drugi to aspekt ekonomiczny, który każe wziąć pod uwagę również zmianę cen danych surowców, wynikający z kosztów ich pozyskania. Finalnie, także możliwość i wielkość recyklingu niektórych z nich może okazać się istotnym elementem, pośrednio wpływającym na rozwój odnawialnych źródeł energii w Polsce. Tak duża ilość istniejących zmiennych przyczynia się do powstania złożonego zadania, jakim jest analiza zapotrzebowania na surowce wykorzystywane do produkcji energii odnawialnej, a które to zadanie wydaje się niezwykle istotne z punktu widzenia realizacji założeń energetyki OZE w Polsce na najbliższe dekady.

Niniejsza monografia skupia się rynku srebra – jednego z kluczowych surowców wykorzystywanych do produkcji paneli fotowoltaicznych. Będzie ona obejmować identyfikację głównych czynników wpływających na zapewnienie dostępności tego surowca dla branży produkującej fotowoltaikę, oszacowanie wielkości jego zużycia w przyszłości i możliwość pełnego zaspokojenia popytu przez produkcję krajową, a także zbadane zostanie, czy może zaistnieć niebezpieczeństwo jego niedoboru. Wyniki badań mogą być wykorzystane przez krajowe firmy z sektorów związanych z energetyką odnawialną, zarówno obecne, jak i te, które planują wejście na rynek. Dodatkowo, prognozowane dane mogą też zainteresować producentów srebra, które jest wykorzystywane w różnych branżach gospodarczych.

Część I. Fotowoltaika częścią nowej polityki energetycznej

1. Zmiany klimatyczne wynikiem działalności gospodarczej

Klimat według Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej jest to: „całokształt czynników fizycznych atmosfery i warunków pogodowych charakterystycznych dla danego obszaru, kształtowanych pod wpływem położenia geograficznego i cech fizycznych tego obszaru oraz określonych na podstawie wieloletnich pomiarów i obserwacji” (Lorenc 2012). Natomiast według Z. Kundzewicza to: „kompleks złożonych procesów atmosferycznych, kształtujący się pod wpływem właściwości fizycznych i geograficznych rozważanego obszaru (...). Klimat można rozumieć jako statystyczny stan atmosfery w danym miejscu, a więc uśredniony za dłuższy okres (np. 30 lat) stan pogody. Charakteryzują go wartości średnie i wahania elementów meteorologicznych” (Kundzewicz 2012). Wspólnym elementem obydwu definicji jest podkreślenie tego faktu, że klimat to całokształt czynników występujących na określonym obszarze przez dłuższy okres czasu.

Niezakłócone funkcjonowanie poszczególnych zmiennych klimatu opiera się na ich umiarkowanej zmienności – ochładzanie bądź ocieplenie klimatu na przestrzeni minionych tysiącleci zachodziło powoli. Klimatolodzy pracujący w Międzynarodowym Panelu do Spraw Zmian Klimatu (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) twierdzą, że dzisiejsze zmiany mocno różnią się od tych, które zachodziły wcześniej i w sposób istotny zakłócają równowagę klimatyczną. Zauważalne stało się szybkie tempo zmian klimatycznych, które obecnie jest klasyfikowane jako jeden z ważniejszych problemów ekonomicznych, społecznych i politycznych (Iwaszczuk i in. 2015). Klimat jest bowiem jednym z kluczowych czynników kształtujących specyfikę rynków i społeczeństw, wpływając na niemalże wszystkie branże w globalnej gospodarce.

1.1. Czynniki wpływu na klimat

W przeciągu wielu milionów lat zmiany klimatyczne na naszej planecie zachodziły stopniowo, będąc wynikiem procesów naturalnych. Dopiero w ostatniej

dekadzie XX wieku zwrócono uwagę na gwałtowność zachodzących zmian, do których wedle opinii naukowców przyczyniły się w największym stopniu czynniki antropogeniczne – związane ze wzrostem populacji ludzkiej i jej działalności gospodarczej. Generalnie zmiany klimatyczne mogą być spowodowane takimi czynnikami naturalnymi jak:

- aktywność Słońca,
- zmiana położenia i konfiguracji Ziemi,
- zmiana składu ziemskiej atmosfery,
- aktywność wulkanów (Kundzewicz i Kowalczak 2008),
- trzęsienia ziemi,
- zderzenia z obiektami z kosmosu i in.

Kożuchowski czynniki te podzielił na sześć podstawowych grup:

- czynniki geograficzne – określające położenie na kuli ziemskiej;
- czynniki radiacyjne – wynikające ze strumieni promieniowania w atmosferze;
- czynniki cyrkulacyjne – związane z ogólną cyrkulacją atmosfery;
- czynniki strefowe – kształtujące strefowe zróżnicowanie klimatów, takie w których panują południkowe (N-S) kierunki poziomych gradientów w polu elementów klimatu;
- czynniki astrefowe – zaburzające porządek czynników strefowych i powodujące, że gradienty poziome mają równoleżnikowo zorientowane kierunki (W-E);
- czynniki antropogeniczne – będące skutkiem pośredniego i/lub bezpośredniego oddziaływania człowieka na klimat (Kożuchowski 2011).

Wywierają one wpływ m.in. na wymianę ciepła, poziom wilgotności oraz ciągły ruch powietrza na danym obszarze geograficznym, tworząc specyficzne warunki do życia społecznego oraz działalności gospodarczej. Przy czym najwięcej szkód wyrządzają gazy emitowane do atmosfery oraz pyły i aerozole zawieszane w niej, posiadają bowiem zdolność do zatrzymywania energii słonecznej. Wśród nich to gazy najbardziej przyczyniają się do ocieplenia klimatu, stąd ich nazwa – cieplarniane.

Do najbardziej szkodliwych wśród gazów zalicza się dwutlenek węgla, metan, podtlenek azotu, ozon i freony, jednak to CO₂ odpowiada za ponad połowę wszystkich emisji do atmosfery ziemskiej. Chociaż emisja innych gazów cieplarnianych jest mniejsza, to wychwytyują one ciepło znacznie bardziej efektywnie niż CO₂, np. metan jest ponad 80 razy silniejszy niż CO₂ na przestrzeni 20 lat (Infografika 2022).

Pandemia COVID-19 przyniosła nadzieję na trwałe obniżenie emisji gazów cieplarnianych, ze względu na ograniczenie działalności gospodarczej. Rzeczywiście w roku 2020 zanotowano największy spadek globalnego śladu węglowego, jednak już w następnym roku emisje gazów cieplarnianych wzrosły o kolejne 4,9%. Według Global Carbon Project emisje CO₂ w 2020 roku wyniosły 36,4 miliardów ton (GT), czyli zaledwie 0,8% mniej niż w 2019 roku, który ustanowił dotychczasowy

rekord. Za 90% emisji gazów cieplarnianych odpowiadają paliwa kopalne. Według statystyk Global Carbon Project w 2021 roku emisje w wyniku spalania paliw kopalnych znów wzrosły. Najwięcej CO₂ pochodzi niezmiennie z użycia węgla – aż 40%. W 2021 roku węgiel odpowiadał za aż 14,7 miliardów ton (GT) CO₂, czyli 5,9% więcej w porównaniu do 2020 roku (Adamczyk 2022). W skali globalnej kluczowe gazy cieplarniane (GHG – *greenhouse gas*) emitowane przez działalność człowieka to:

- Dwutlenek węgla (CO₂). Stosowanie paliw kopalnych jest głównym źródłem tego gazu cieplarnianego. Może on być również emitowany w wyniku bezpośredniego oddziaływania człowieka na leśnictwo i inne użytkowanie gruntów, takie jak wylesianie, oczyszczanie gruntów pod rolnictwo, czy też degradacja gleby. Działanie człowieka może również usuwać CO₂ z atmosfery, poprzez ponowne zalesianie, ulepszanie gleby i inne tego typu działania.
- Metan (CH₄). Wynika z działalności rolniczej, gospodarki odpadami, zużycia energii i spalania biomasy. Powyższe działalności człowieka przyczyniają się do emisji CH₄.
- Podtlenek azotu (N₂O). Jest pochodną działalności rolniczej, takiej jak między innymi stosowanie nawozów, co jest głównym źródłem emisji tego gazu cieplarnianego. Jednak spalanie paliw kopalnych również generuje wydzielanie N₂O do atmosfery.
- Gazy fluorowane (gazy F). Powstają podczas procesów przemysłowych, chłodzenia, czy też stosowania różnych produktów konsumenckich, z czego najistotniejsze to wodorofluorowęglowodory (HFC), perfluorowęglowodory (PFC) i sześćofluorek siarki (SF₆). Uwzględniając globalną emisję gazów cieplarnianych w ogólności (tj. bez rozróżnienia na poszczególne rodzaje), produkcja energii elektrycznej i ciepłownictwo odpowiadają za około jedną czwartą globalnej emisji gazów cieplarnianych. Spalanie węgla, gazu ziemnego i ropy naftowej w celu produkcji energii elektrycznej i ciepła stanowi największe, pojedyncze źródło globalnych emisji gazów cieplarnianych (EPA).

Przyjmując dwutlenek węgla jako główny gaz cieplarniany, sektor energetyki i ciepłownictwa prezentuje się jeszcze gorzej. Pomimo globalnych wysiłków na rzecz dekarbonizacji tego sektora, wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła odpowiada za ponad 40% globalnej emisji CO₂ ze spalania paliw, przy czym elektrownie węglowe emitują ponad 70% związanych z tym emisji. Intensywność emisji CO₂ podczas wytwarzania energii (elektrycznej oraz cieplnej) determinowana jest między innymi przez takie czynniki, jak:

- ilość wyprodukowanej energii elektrycznej oraz cieplnej,
- sprawność wytwarzania,
- udział paliw kopalnych w całkowitej produkcji,
- emisyjność wytwarzania energii z paliw kopalnych (IEA).

Przemysł elektroenergetyczny od lat notuje najwyższe wzrosty emisji gazów cieplarnianych – zarówno w ujęciu ogólnym, jak i w przypadku dwutlenku węgla. Dowodzą tego takie dane: wzrost całkowitej emisji GHG pomiędzy rokiem 1990 a 2018 wyniósł dla wszystkich sektorów 57% (tj. wzrost pomiędzy około 32 650 a 51 200 Mt CO_{2eq}* rocznie), przy czym dla energetyki i ciepłownictwa wzrost ten był znacznie większy, osiągając wartość 83%. W tym samym okresie nastąpił 67% wzrost emisji dwutlenku węgla (z 22 637 do 37 887 Mt), a w omawianym sektorze wartość wzrostu osiągnęła aż 82%. Jak już zostało wspomniane, pandemia COVID-19 spowodowała znaczne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, szczególnie w sektorze transportowym. Energetyka i ciepłownictwo również odnotowały spadek emisji dwutlenku węgla w tym okresie – do wartości 35 963 Mt, co pozwoliło na zmniejszenie przyrostu emisji tego gazu do 72%, w porównaniu do roku 1990 (Crippa i in. 2019, 2021).

Warto zaznaczyć, że istnieją także znaczące różnice w ilościach gazów cieplarnianych emitowanych przez różne sektory i regiony. Od dłuższego czasu można zauważyć stabilizację, a nawet spadek emisji GHG (w szczególności dwutlenku węgla) w krajach i regionach rozwiniętych (np. USA czy Unia Europejska), a jednocześnie dynamiczny wzrost emisji w krajach rozwijających się, takich jak Chiny czy Indie. Przykładowo, Stany Zjednoczone odnotowały ponad dziesięcioprocentowy spadek emisji CO₂ pomiędzy rokiem 1990 (5067 Mt) a 2020 (4535 Mt), natomiast w Chinach w tym samym okresie nastąpił prawie 5-krotny wzrost emisji tego gazu – z 2426 Mt (1990 r.) aż do 11 680 Mt (2020 r.) (EDGAR 2021).

W wartościach bezwzględnych, energetyka i ciepłownictwo odpowiadają za wzrost emisji samego CO₂ z około 7620 Mt w roku 1990, poprzez 9360 Mt w 2000 roku oraz 12 500 w 2010, aż do około 14 070 Mt w roku 2019 (IEA). Oznacza to, iż właśnie ten sektor powinien być w najbliższym czasie głównym beneficjentem zmian, które mają przyczynić się do złagodzenia skutków zmian klimatu, poprzez redukcję gazów cieplarnianych. Jednocześnie, jak zauważono, w zakresie dostaw energii i ciepła, średnie roczne emisje były około 2,3 razy większe w latach 2009–2018 niż w latach 1970–1979, co oznacza przyspieszony wzrost emisji z tego sektora (Minx i in. 2021).

Skutkiem efektu cieplarnianego jest coraz częstsze pojawianie się nietypowych dla danego obszaru parametrów pogody (temperatury powietrza, siły i kierunku wiatru, prędkości i kierunków prądów oceanicznych etc.) oraz gwałtownych zjawisk pogodowych (huraganów, tornad, orkanów, tajfunów, ulewnych deszczy, obfitych śnieżyc, susz i powodzi etc.). W ostatniej dekadzie niestety nastąpiła intensyfikacja tych zjawisk zarówno pod względem częstotliwości występowania, jak i skutków dla flory i fauny. Wywierają one negatywny wpływ również na klimat,

* CO_{2eq} – równoważnik (ekwiwalent) emisji dwutlenku węgla, pozwalający na odniesienie innych gazów cieplarnianych, w porównaniu do CO₂.

a tym samym na gospodarczą aktywność człowieka oraz inne aspekty życia na naszej planecie.

Jedną z najbardziej dotkliwych zmian jest ocieplenie klimatu, które objęło całą kulę ziemską. Jakie są tego konsekwencje dla środowiska?

1.2. Globalne ocieplenie – wpływ na środowisko

Jak już zostało wspomniane, działalność człowieka przyczyniła się do ocieplenia klimatu, które z kolei wywiera negatywny wpływ na jego życie i działalność, w tym gospodarczą. Mamy więc zamknięte koło, które trudno jest przerwać. Wybrane punkty krytyczne spowodowane przez wzrost temperatury na planecie zaprezentowano w poniższej tabeli (tab. 1).

Najbardziej niepokojące z zaprezentowanych w tabeli zjawisk to topnienie lodowców oraz rozszerzanie się wody pod wpływem wzrostu temperatury, co doprowadza do podwyższenia poziomu wody w oceanach i zalania niskich terenów. Niestety obecna wiedza na temat zmian klimatycznych może być niewystarczająca dla przewidzenia wszystkich skutków, jakie niesie ze sobą zmiana klimatu.

1.3. Wpływ zmian klimatycznych na ludzkość

Niestety liczba ekstremalnych zjawisk pogodowych, klimatycznych i wodnych wzrasta z roku na rok, a ich skutki stają się coraz bardziej odczuwalne. Najbardziej cierpią na tym kraje o niższym poziomie rozwoju, które tak naprawdę najmniej przyczyniają się do ocieplenia klimatu. Rośnie też natężenie ww. zjawisk oraz trwałość oddziaływania, przynosząc ze sobą coraz bardziej dotkliwe straty ludzkie i ekonomiczne. Oznacza to, że będzie coraz więcej fal upałów, susz i pożarów lasów, wskutek czego w atmosferze zgromadzi więcej niż zwyczajnie pary wodnej, która wyleje się w postaci ulewnych deszczy i burz tropikalnych powodując śmiertelne powodzie w wielu częściach świata. Jednocześnie inne regiony będą dotknięte suszą i stratami z jej powodu. Najbardziej tragiczne w skutkach kataklizmy na świecie z ostatnich 50 lat pokazano w tabeli 2.

W ciągu ostatnich 50 lat w wyniku katastrof pogodowych co dziennie umierało średnio 115 osób. Największymi zabójcami były susze, odpowiedzialne za 650 000 ofiar śmiertelnych. Wielkie żniwo zebrały także sztormy – 577 232 ofiar śmiertelnych. Natomiast ekstremalne temperatury pochłonęły prawie 56 000 istnień ludzkich (Oleszko-Pyka 2021).

Choć w ostatnich dekadach ogólna liczba ofiar śmiertelnych katastrof spada (na skutek wprowadzenia skutecznych systemów ostrzegania przed nadciągającymi kataklizmami i nowych metod ratowania życia), jednak ogólna sytuacja na

Tabela 1. Wybrane punkty krytyczne spowodowane globalnym ociepleniem

Punkt krytyczny	Przebieg zjawiska	Zagrożenia
Pokrywa lodowa Antarktydy	Na skutek topnienia pokrywy w 2022 roku na wschodzie kontynentu oderwał się szelf o wielkości porównywalnej do powierzchni Nowego Jorku lub dwukrotnej powierzchni Warszawy.	Wzrost poziomu morza grożący globalnym zalaniem nadbrzeżnych miejscowości i wysp. Zagrożenie dla żeglugi morskiej i oceanicznej. Utrata zapasów słodkiej wody.
Wzrost temperatury w Arktyce	Krótsze okresy występowania twardego lodu utrudniają żerowanie zwierząt polarnych	Kurczy się areal życia niedźwiedzi polarnych oraz innych zwierząt z tego regionu. Na skutek wzrostu temperatury wody maleją też zasoby ryb, którymi zwierzęta się odżywiają
Ładolód największej na świecie wyspy – Grenlandii	Pokrywający ponad 80% terytorium wyspy lód coraz szybciej topnieje. Podniesienie temperatury o 8°C spowodowałoby roztopienie całej pokrywy lodowej.	Wzrost poziomu mórz i oceanów grożący globalnym zalaniem nadbrzeżnych miejscowości i wysp. Deficyt wody pitnej.
Wyżyna Tybetańska, Chiny	Pokryta śniegiem Wyżyna Tybetańska zaczęła bardzo szybko topnieć, wypelniając całą Żółtą Rzekę i powodując powódzie. Całkowite stopnienie Wyżyny spowoduje podniesienie się temperatury powietrza w regionie. Poza tym skurczą się zasoby słodkiej wody.	Topniejący śnieg z Wyżyny od lat zaspokajał potrzeby w wodzie pitnej mieszkańców Chin – największego na świecie kraju pod względem liczby ludności (ponad 1,4 mld stanem na 2020 rok). Deficyt wody pitnej może to doprowadzić do pogorszenia się warunków sanitarnych, a następnie do licznych chorób i epidemii, a co tym idzie – wzrostu śmiertelności. Innym skutkiem może być migracja ludności do innych krajów i regionów, co w konsekwencji doprowadzi do katastrofy humanitarnej.
Topnienie wszystkich lodowców jednocześnie	Kurczenie się zapasów słodkiej wody poprzez jej zmieszanie się z wodami słonymi (mórz i oceanów). Wzrost poziomu wód na planecie.	Brak wody pitnej dla coraz większej populacji ludzkiej. Zatopienie wysp i przybrzeżnych terenów kontynentów znajdujących się poniżej poziomu morza spowoduje masowe migracje ludności w rejony wyżej położone, ze wszystkimi konsekwencjami.
Tropikalne lasy deszczowe, Amazonia	Ocieplenie klimatu powoduje spadek ilości opadów i prowadzi do suszy, która wyniszcza lasy Amazonii (nazywane „płucami planety”). Kurczą się arealy lasów, obniża się poziom wód gruntowych, wysychają rzeki i strumienie.	Lasy magazynują dwutlenek węgla, wraz z ich niszczeniem następuje uwalnianie go do atmosfery, a tym samym wzrasta jego stężenie w atmosferze. Kurczy się środowisko bytowe dla ogromnej liczby gatunków zwierząt (m.in. ssaków, ptaków, bezkręgowców, płazów, gadów, owadów). Znikają też niektóre gatunki roślin i zwierząt. Prowadzi do zachwiania równowagi w naturze, które skutki są trudne do przewidzenia.

Punkt krytyczny	Przebieg zjawiska	Zagrożenia
Wycinanie lasów (wylesianie)	Wykorzystanie wylesionych terenów pod uprawy roślin (np. soi), budowę obiektów przemysłowo-usługowych, ciągów komunikacyjnych, budynków mieszkalnych).	Erozja gleby, susza, zmniejszenie a nawet zagłada niektórych gatunków roślin i zwierząt. Zmniejszenie tlenu a wzrost dwutlenku węgla w atmosferze, które spotęgują zjawiska ocieplenia klimatu.
Zmiany kierunków i natężenia prądów morskich i oceanicznych	Cyrkulacja prądów morskich i oceanicznych przyczynia się do: zmian temperatury wody i powietrza; kierunków wiatru; zmian ciśnienia atmosferycznego; usuwania dwutlenku węgla z atmosfery (jest on pochłaniany przez zimne powierzchniowe warstwy wody, które niosą go do głębinowych warstw oceanu).	Zmniejszenie intensywności cyrkulacji termohalinowej spowoduje wzrost ilości dwutlenku węgla w atmosferze, a co za tym idzie – wzrostu efektu cieplarnianego. Wzrost ilości kataklizmów naturalnych: powodzi, huraganów, sztormów, lawin błotnych, susz, pożarów oraz burz pyłowych.
Powiększanie się dziury ozonowej	Dziury ozonowe (jako skutek spadku stężenia ozonu w stratosferze atmosfery ziemskiej) tworzą się w obszarach podbiegunowych. W rezultacie ze Słońca do Ziemi przedostaje się większa ilość promieni słonecznych Ziemi.	Ozon pochłania część promieniowania ultrafioletowego (UV) docierającego do Ziemi. Zmniejszenie ozonu oznacza zwiększenie promieniowania UV, które jest szkodliwe dla żywych organizmów, uszkadzając komórki oraz materiał genetyczny komórek (DNA). U ludzi i zwierząt mogą wywoływać: poparzenia skóry i fotolegę, zmiany nowotworowe (np. rak skóry), obniżenie odporności organizmu, choroby oczu (np. zaćmę), wzrost śmiertelności. Dla roślin promieniowanie UV również nie jest korzystne – zbyt duża ekspozycja hamuje ich rozwój i zmniejsza ilość zbieranych plonów z upraw, czego skutkiem może być głód wśród ludzi i zwierząt. Poza tym rośliny zatrzymują wodę w glebie i zapobiegają jej erozji. Zanikanie roślinności może doprowadzić do pustynnienia coraz to większych obszarów na planecie.
Klatrat metanu (hydrat metanu, metanowy lód, wodzian metanu)	Klatrat to biała, kryształiczna substancja, która jest zamrożoną mieszaną cząsteczek wody i metanu. Odkryto go w syberyjskiej zmarlinie, Gwatemali, na dnie Morza Arktycznego i szelfach kontynentalnych niemal wszystkich oceanów.	Wzrost globalnej temperatury na planecie może doprowadzić do niekontrolowanego uwolnienia się metanu do atmosfery, co jeszcze bardziej spotęguje efekt cieplarniany.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Fry 2008; Iwaszczuk i in. 2015.

Tabela 2. Dziesięć najbardziej tragicznych kataklizmów na świecie w okresie 1970–2019

Lp.	Typ kataklizmu	Rok	Kraj	Liczba ofiar śmiertelnych
1	Susze	1983	Etiopia	300 000
2	Sztorm Bhola	1970	Bangladesz	300 000
3	Susze	1983	Sudan	150 000
4	Sztorm Gorky	1991	Bangladesz	138 866
5	Sztorm Nargis	2008	Myanmar	138 366
6	Susze	1973	Etiopia	100 000
7	Susze	1981	Mozambik	100 000
8	Ekstremalne temperatury	2010	Rosja	55 736
9	Powódzie	1999	Wenezuela	30 000
10	Powódzie	1974	Bangladesz	28 700

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Oleszko-Pyka 2021.

świecie nie napawa optymizmem. Tym bardziej, że większość zgonów związanych z katastrofami pogodowymi miało miejsce w krajach rozwijających się (w Afryce, Ameryce Łacińskiej, na wyspach Pacyfiku), gdzie poziom wczesnego ostrzegania pozostawia jeszcze wiele do życzenia.

2. Nasilające się skutki zmian klimatycznych w ostatnich latach

Jak już zostało wspomniane najbardziej tragiczne w skutkach kataklizmy to te, które zabierają ludzkie życie. Pandemia, która z całą siłą wybuchła z początkiem 2020 roku zahamowała działalność gospodarczą, nie zatrzymała jednak ocieplenia klimatu i katastrof naturalnych – straty z ich tytułu były wyższe niż rok wcześniej. W 2020 roku katastrofy naturalne pochłoneły, według firmy reasekuracyjnej Munich Re, około 8,2 tys. ofiar śmiertelnych oraz milionów zwierząt. Zniszczyły ogromne obszary lasów (Skibińska 2021), które ograniczają efekt cieplarniany.

Tragiczne skutki też odnotowano po katastrofach naturalnych w kolejnym, 2021 roku – najgorsze dla Europy były burze i powódzie, które nawiedziły Europę Zachodnią i Środkową – w ciągu 7 dni (12–18 lipca 2021 r.) zginęło tam 227 osób. W skali światowej najwięcej ofiar natomiast poniósł najbardziej zaludniony kraj na

świecie – Chiny – 545 osób zginęło podczas letnich powodzi sezonowych, które trwały aż cztery miesiące (od czerwca po wrzesień). Kataklizmy zdarzają się również w innych porach roku – nietypowo mroźna zima w USA i Meksyku w ciągu 9 dni (12–20 lutego 2021r.) pochłonęła 235 istnień ludzkich. Sumarycznie na skutek katastrof naturalnych na całym świecie śmierć poniosło ponad 10 500 osób (AON). Poza tym 2021 był szóstym najcieplejszym rokiem w historii, z temperaturą łądu i oceanu o 0,84°C powyżej średniej z XX wieku. Najwyższa temperatura, jaką kiedykolwiek wiarygodnie zmierzono na Ziemi, została nieoficjalnie zarejestrowana 9 lipca 2021 r. w Dolinie Śmierci w Kalifornii (54,4°C) (AON).

Początek 2022 roku niestety też nie był spokojny. Już w marcu zanotowano drastyczny skok temperatury w Arktyce. Jeszcze gorszą sytuację złożyła się na wschodzie Antarktydy, gdzie nastąpiło zawalenie się lodowca szelfowego (o powierzchni ponad 1100 km²) potwierdzone na zdjęciach satelitarnych. Jest to o tyle niepokojące, że po raz pierwszy doszło do topnienia lodowca na wschodzie kontynentu, który przez naukowców był uważany za stosunkowo stabilny. Przyczyniły się ku temu rekordowo wysokie (jak na połowę marca) temperatury, bo były wyższe aż o 40°C od średniej dla tego okresu (Wenio 2022).

Niestety topnienie lodowców trwa już od jakiegoś czasu. Według raportu NASA opublikowanego w 2019 roku (Wenio 2020a), na zachodzie Antarktydy przekroczyło ono poziom krytyczny. Oznacza to, że proces ten jest już nieodwracalny, a tempo utraty lodu jest pięć razy szybsze niż w latach dziewięćdziesiątych XX w. Skutki wzrostu globalnej temperatury odczuwa też Arktyka – łądolód Grenlandii (według badania naukowców z Ohio State University opublikowanego w 2020 r. (Wenio 2020b)) topnieje tak szybko, że nawet największe wysiłki ludzkości w kierunku spowolnienia procesu globalnego ocieplenia już nie mogłyby go uratować. Jak wyliczono pod koniec 2019 roku w magazynie „Nature” od 1992 r. ubyło tam już 3,8 mld Mg lodu. Globalny poziom mórz i oceanów podniósł się z tego powodu o około 1 cm (Gadzała 2020).

Według Światowej Organizacji Meteorologicznej (ang. *The World Meteorological Organization* – WMO) w ciągu ostatniego półwiecza liczba katastrof związanych z pogodą na świecie wzrosła pięciokrotnie. Według raportu WMO między 1970 a 2019 rokiem doszło do ponad 11 000 katastrof związanych z pogodą, w wyniku czego zginęło ponad dwa miliony ludzi. Dobra wiadomość jest natomiast taka, że spadła liczba przypadków śmiertelnych będących skutkiem burz, powodzi i susz. Mimo to potrzebna jest większa współpraca międzynarodowa, aby poradzić sobie z chronicznym problemem ogromnej liczby osób przesiedlanych każdego roku przez powodzie, burze i susze. Potrzeba też większych inwestycji w systemy kompleksowego zarządzania ryzykiem klęsk żywiołowych, które podążałyby za zmianami klimatu, a także w ich adaptację do krajowych i lokalnych strategii ograniczania ryzyka klęsk żywiołowych (Oleszko-Pyka 2021).

2.1. Ekonomiczne straty z powodu globalnego ocieplenia

W wyniku kataklizmów naturalnych, które miały miejsce w latach 1970–2019 ogólne straty ekonomiczne wyniosły 3,64 mld dolarów. W ostatniej dekadzie (2010–2019) globalna gospodarka traciła dziennie około 383 mln USD, co stanowi siedmiokrotny wzrost w stosunku do 49 mln USD dziennie w latach 1970–1979 (Oleszko-Pyka 2021). Poszczególne dane dotyczące największych strat z tego okresu zaprezentowano w poniższej tabeli 3.

Tabela 3. Dziesięć największych kataklizmów z okresu 1970–2019 według strat ekonomicznych

Lp.	Typ kataklizmu	Rok	Kraj	Ekonomiczne straty [mld USD]
1	Sztorm Katrina	2005	USA	163,61
2	Sztorm Harvey	2017	USA	96,94
3	Sztorm Maria	2017	USA	69,39
4	Sztorm Irma	2017	USA	58,16
5	Sztorm Sandy	2012	USA	54,47
6	Sztorm Andrew	1992	USA	48,27
7	Powódź	1998	Chiny	47,02
8	Powódź	2011	Tajlandia	45,46
9	Sztorm Ike	2008	USA	35,63
10	Powódź	1995	Korea Północna	25,17

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Oleszko-Pyka 2021.

Jak widać w tabeli 3, największe sumaryczne straty spowodowały sztormy, które w 2017 roku trzykrotnie nawiedziły wybrzeża Ameryki Północnej. Bardziej szczegółowe badania kolejnych lat zostaną zaprezentowane poniżej.

2.2. Katastrofy naturalne w 2018 roku

Każda z dziesięciu największych katastrof naturalnych związanych z ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi w 2018 r. kosztowała co najmniej miliard dolarów. Cztery najkosztowniejsze spowodowały straty po co najmniej 7 mld dolarów każda. Takie katastrofy (fale upałów, susze, pożary, powodzie, tajfuny i/lub huragany)

występowały na każdym zamieszkałym kontynencie. Największe straty finansowe spowodowały huragany Florence (17 mld USD) i Michael (15 mld USD), które dotknęły Stany Zjednoczone oraz część Ameryki Środkowej i Karaibów. Argentynę dopadła susza, która trwała od końca 2017 r. do kwietnia 2018 r. Była to największa susza w tym kraju od 50 lat, która spowodowała poważne problemy gospodarcze – zbiory soi spadły o 31%, a kukurydzy o 20%. Sumaryczne straty oszacowano na 6 mld USD, a ich konsekwencją były kryzys walutowy i recesja gospodarcza w kraju. Początek roku był również trudny dla RPA – kraj nawiedziła tak potężna susza, że zabrakło wody pitnej. A straty oszacowano na co najmniej 1,2 mld USD. Susza była rezultatem trzech kolejnych lat z niskimi opadami, wynikającymi ze zmian klimatycznych. Zmniejszyła się też obfitość opadów w Australii – opady deszczu w basenie Murray-Darling były jednymi z najniższych w historii w ciągu pierwszych dziewięciu miesięcy 2018 r. Wzrosła natomiast temperatura powietrza, zwłaszcza w stanie Nowa Południowa Walia, gdzie przez niemal 11 miesięcy występowały rekordowe upały. Wysokie temperatury przy skąpych opadach doprowadziły do licznych, długotrwałych pożarów. Według szacunków susza kosztowała australijską gospodarkę od 5,8 do 9 mld USD. Poza tym istotnie spadły zbiory pszenicy, a na skutek zmniejszenia podaży pasz zredukowano pogłowie bydła do rekordowo niskich poziomów. W 2018 roku z letnimi upałami i ich konsekwencjami zmagaly się również kraje półkuli północnej. Rekordowe temperatury odnotowano w północnej Europie (m.in. Francji, Danii, Hiszpanii, Grecji), Południowej Kalifornii, Kanadzie, Korei Południowej. Susza w Europie Północnej i Środkowej kosztowała ubezpieczycieli co najmniej 7,5 mld USD. W Niemczech wysechł Ren, utrudniając transport towarów. W listopadzie 2018 r. w Kalifornii wybuchły pożary – najbardziej niszczycielskie i śmiertelne od prawie 90 lat. W konsekwencji śmierć poniosło co najmniej 85 osób, a ogień strawił około 14 000 budynków. Sumaryczne straty oszacowano na 9–13 mld USD. Ekstremalnie wysokie letnie temperatury spowodowały nie tylko pożary, lecz również uszczerbek na zdrowiu wielu ludzi. Dotknęło to m.in. Japonię, gdzie z powodu udaru cieplnego w sierpniu 2018 r. do szpitali trafiło ponad 30 tys. osób. Przy czym upał pojawił się tuż po powodzi, spowodowanej rekordowo ulewnym deszczem, która zabiła co najmniej 230 osób, a jej koszt dla gospodarki oszacowano na 7 mld dol. Na domiar złego, w tym samym miesiącu przez kraj przetoczył się najpotężniejszy od 25 lat tajfun, niosąc ze sobą powszechnie zniszczenia i zabijając 11 osób. Straty z powodu tego kataklizmu oszacowano na 2,3–5,5 mld USD. Z powodu zmian klimatycznych nastąpił nie tylko wzrost liczby pożarów w zachodnich stanach USA, lecz również objęte nimi terytorium powiększyło się w ciągu ostatnich lat prawie dwukrotnie. Wiele krajów zostało też dotkniętych powodzią. W okresie czerwiec–lipiec 2018 r. Indie nawiedziły potężne deszcze monsunowe, które doprowadziły do najgorszej od ponad 80 lat powodzi w stanie Kerala. Powódź zabiła blisko 500 osób, zniszczyła ponad 10 tys. domów. Uszkodziła kolejne 100 tys. i 83 tys. km dróg.

Ponad milion osób musiało zamieszkać w specjalnie przygotowanych dla nich obozach. Naprawa szkód kosztowała kraj aż 3,7 mld USD. Powodzie nie ominęły też Chin: w lipcu–sierpniu 2018 r. przez cały kraj przetoczyły się ekstremalnie ulewne deszcze, doprowadzając do osunięć ziemi i zalewając niżej położone terytoria. Skutkiem było pozbawienie życia co najmniej 35 osób oraz straty finansowe około 9,3 mld USD. We wrześniu 2018 r. w Chinach nadal nie było spokojnie – w południowe prowincje uderzył potężny tajfun Mangkhut (w porywach wiatr osiągał prędkość 330 km/h), który zahaczył też o Filipiny. W rezultacie zginęło 127 osób na Filipinach i sześć osób w Chinach, zniszczonych zostało około 10 tys. domów, a koszty szkód w Chinach oszacowano na 1–2 mld USD; natomiast na Filipinach na 644 mln USD (Skwirowski 2019).

2.3. Katastrofy naturalne w 2019 roku

Z klimatycznego punktu widzenia 2019 rok był drugim najcieplejszym rokiem od 1851 roku, biorąc pod uwagę temperatury na lądzie i w oceanach. Rekordowe temperatury odnotowano we Francji (46,0°C) i w Niemczech (42,6°C), podczas gdy okres od stycznia do maja był najwilgotniejszym w historii w Stanach Zjednoczonych (399 mm opadów). Do najpoważniejszych katastrof, które wystąpiły w 2019 roku, zaliczyć można tajfuny Hagibis i Faxai (w Japonii), monsun Floods (w Chinach), powodzie u wybrzeży Mississippi River oraz cyklon Dorian. Firma Aon w swoim raporcie pt. *Weather, Climate & Catastrophe Insight: 2019 Annual Report* zaznacza, że w 2019 roku na naszym globie wystąpiło 409 katastrof naturalnych, które kosztowały światową gospodarkę 232 mld USD, z czego tylko 71 mld USD zostało pokryte z programów ubezpieczeniowych finansowanych przez sektor prywatny i rządy. Dwa najkosztowniejsze zdarzenia ubezpieczeniowe – tajfuny Hagibis i Faxai – spowodowały odpowiednio 9 i 6 mld USD strat objętych ubezpieczeniem. Ogólnie rzecz biorąc (w skali świata), największe szkody wyrządziły powodzie w głębi lądu (łącznie straty gospodarcze około 82 mld USD) oraz cyklony tropikalne (straty około 68 mld USD). Poza tym 2019 rok był w USA okresem o największych opadach od 1895 roku. W rezultacie wzdłuż rzeki Mississippi wstąpiła powódź, której koszt oszacowano na ponad 20 mld USD. Bahamy nawiedził cyklon 5 kategorii Dorian (o maksymalnej sile wiatru do 295 km/h), który na równi z cyklonem Labor Day (z 1935 roku) uznano za najsilniejsze zarejestrowane na Oceanie Atlantyckim zdarzenie tego typu z konsekwencjami na lądzie. Z kolei cyklon Idai nawiedził Mozambik, gdzie spowodował największy kryzys humanitarny, zabijając 1303 osoby i niszcząc ponad 300 000 domów. Straty finansowe oszacowano na poziomie 2 mld USD. Europa również nie była bezpieczna: wichura Eberhard była jedynym wydarzeniem w Europie, które przekroczyło 1 mld USD w ubezpieczonych stratach, po tym jak przetoczyła się w marcu

2019 roku przez Europę Zachodnią i Środkową; Albanie natomiast 26 listopada nawiedziło trzęsienie ziemi z 52 śmiertelnymi ofiarami. Chiny i Indie z kolei zmagają się ze skutkami deszczy monsunowych (powodziami), z powodu których gospodarki tych krajów poniosły straty o łącznej wartości 25 mld USD – w Chinach (15 mld USD) i Indiach (10 mld USD). Na antypodach (w Australii) wiosną i latem zagościła intensywne wieloletnia susza oraz rekordowe upały. Ich skutkiem były niszczące pożary buszu – spłonęło wówczas około 18,2 mln hektarów, a ponad 2500 domów zostało zniszczonych (straty ubezpieczeniowe na poziomie 1 mld USD). Lata 2010–2019 były najkosztowniejszą dekadą w historii – szkody finansowe wyniosły 2,98 mld USD, czyli o około 1,19 mld USD więcej niż w latach 2000–2009, przy czym 44% strat dotyczyło regionu Azji i Pacyfiku (Katastrofy naturalne 2020).

2.4. Katastrofy naturalne w 2020 roku

Według firmy Munich Re globalne straty spowodowane klęskami żywiołowymi w 2020 r. wyniosły 210 mld USD. To znacznie więcej niż w 2019 r., kiedy straty zostały oszacowane na 166 mld USD. Nieco inne wyliczenia prezentuje firma Aon, która w raporcie pt. *Weather, Climate & Catastrophe Insight 2020 Annual Report* oszacowała je na poziomie 268 mld USD (Skibińska 2021). Tragedie pochłonęły także 3,5 tys. istnień ludzkich i spowodowały przesiedlenia 13,5 mln osób. Przewyższa to dane z 2019 roku i odzwierciedla długoterminowy wpływ globalnego ocieplenia (Piórko 2020).

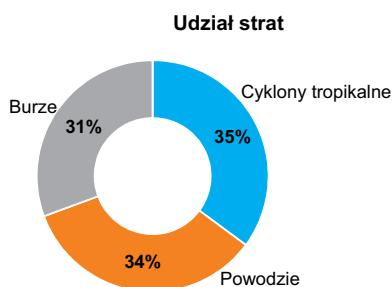
Finansowo najbardziej dotknięte katastrofami naturalnymi były w 2020 r. USA – huragany z Atlantyku zaatakowały wybrzeża USA i krajów Ameryki Środkowej. Według organizacji Christian Aid kosztowały one sumarycznie gospodarkę światową około 40 mld USD (Skibińska 2021). 30 tragicznych nawałnic przyczyniło się do śmierci co najmniej 400 osób (Piórko 2020). Kolejną pod względem kosztów katastrofą naturalną były powodzie w Chinach – straty na poziomie 32 mld USD. Na trzecim miejscu uplasowały się pożary, które wybuchły na zachodnim wybrzeżu USA – straty około 20 mld USD. Nieco mniej kosztowne były szkody wyrządzone przez cyklon Amphan gospodarkom Indii, Bangladeszu i Sri Lanki – 13 mld USD. Z kolei powodzie w Indiach to straty rzędu 10 mld USD, a plaga szarańczy, która spustoszyła Afrykę Wschodnią – 8,5 mld USD. W Europie największe straty spowodowały huragany Ciara i Alex – 5,9 mld USD. Ogólne straty w krajach europejskich wyniosły 12 mld USD. Oprócz huraganów Ciary i Alexa na europejskim kontynencie najbardziej dotkliwe były obfite opady deszczu w południowej Francji i we Włoszech oraz grudniowe trzęsienie ziemi w Chorwacji (Skibińska 2021). Poniżej zaprezentowano chronologicznie 10 największych katastrof, które dotknęły Ziemię w 2020 roku (tab. 4).

Tabela 4. Dziesięć największych katastrof, które dotknęły Ziemię w 2020 roku (chronologicznie)

Lp.	Rodzaj katastrofy	Lokalizacja	Szacunkowe straty [mld USD]
1	Požary lasów	Australia	5,00
2	Plaga szarańczy	Afryka Wschodnia	8,50
3	Huragan Ciara i Alex	Europa	5,90
4	Cyklon Amphan	Indie, Sri Lanka, Bangladesz	13,00
5	Sezon huraganów na Atlantyku	USA, Ameryka Środkowa	40,00
6	Powodzie	Chiny	32,00
7	Powodzie	Indie	10,00
8	Powodzie	Japonia, Wyspa Kyushu	5,00
9	Powodzie	Pakistan	1,50
10	Požary zachodniego wybrzeża	USA	20,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Rogala 2020.

Udział najpoważniejszych kategorii katastrof naturalnych w szkodach finansowych zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Udział poszczególnych kategorii katastrof w 2020 roku

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Skibińska 2021

2.5. Katastrofy naturalne w 2021 roku

Według raportu firmy Aon pt. *Weather, Climate and Catastrophe Insight 2021* w 2021 roku globalna gospodarka poniosła straty w wysokości 343 mld USD na skutek katastrof naturalnych (z czego 329 mld USD wynikało z wydarzeń związa-

nych z pogodą i klimatem), co czyni zeszły rok trzecim najbardziej kosztownym rokiem w historii po korekcie o inflację. Dla porównania – w poprzednim roku stanowiły one 297 mld USD, co daje wzrost o ponad 15%. Przy czym w 2021 roku liczba zdarzeń zmalała, przy wzroście ich kosztów i dotkliwości. W 2021 r. odnotowano 401 znaczących katastrof, w porównaniu z 416 w 2020 r. Odnotowano też 50 przypadków strat ekonomicznych o wartości wielu miliardów dolarów. Lipcowe powodzie w Europie były najkosztowniejszą katastrofą w historii kontynentu o wartości 46 mld USD. Pożary lasów stały się bardziej widoczne, ponieważ warunki stały się bardziej sprzyjające szybkiemu rozprzestrzenianiu się pożarów, a termin „sezon pożarów” stał się oficjalnie nieaktualny, ponieważ ryzyko niebezpiecznych pożarów jest powszechne w ciągu całego roku kalendarzowego. Niemcy, Belgia, Austria, Luksemburg i Chiny odnotowały najbardziej kosztowne wydarze-

Tabela 5. Dziesięć najkosztowniejszych katastrof naturalnych w 2021 roku

Daty	Wydarzenia	Lokalizacja	Zgony	Straty gospodarcze [mld USD]	Ubezpieczone straty [mld USD]
27.08–02.09.	Huragan Ida	USA, Karaiby	96	75,3	36,0
12.07–18.07.	Powódź	Europa Zachodnia i Środkowa	227	45,6	13,0
01.06–30.09.	Powodzie sezonowe	Chiny	545	30,0	2,1
12.02–20.02.	Pogoda zimowa (mrozy)	USA, Meksyk	235	25,0	15,0
01.01–31.12.	Susza	USA	–	9,0	4,3
13.02–13.02.	Trzęsienie ziemi w Fukushima	Japonia	1	8,0	2,5
05.04–08.04.	Zimowa pogoda	Europa Zachodnia i Środkowa	–	5,6	0,4
10.12–12.12.	Trudne warunki pogodowe	USA	93	5,1	4,0
17.06–25.06.	Trudne warunki pogodowe	Europa Zachodnia i Środkowa	7	4,9	3,5
01.01–31.12.	Susza	Brazylia	–	4,3	0,1
Wszystkie inne wydarzenia			~9 500	~130	~49
SUMA			~10 500	343	130

Źródło: AON.

nia w branży ubezpieczeniowej w historii (AON). Według firmy Aon lista 10 największych katastrof naturalnych, które spowodowały ogromne straty ekonomiczne w 2021 roku przedstawia się następująco (tab. 5).

Jak widać, na skutek ocieplenia klimatu w USA i Brazylii przez cały 2021 rok występowała susza, która przyczyniła się do dużych strat ekonomicznych. Najkosztowniejszy natomiast był huragan Ida, który nawiedził pod koniec lata USA i region Karaibów.

Zmiany klimatyczne spowodowały, że wiele krajów jest narażonych na coraz bardziej niestabilne warunki pogodowe. Co gorsza, nie da się sporządzić w miarę wiarygodnych prognoz, ponieważ nie można opierać się na danych historycznych. Taka sytuacja komplikuje całe życie gospodarcze, gdyż prowadzi do globalnych zakłóceń w łańcuchach dostaw i różnych usługach humanitarnych. Dlatego tak ważne jest opracowanie polityki klimatycznej oraz wdrożenie zasad zrównoważonego rozwoju we wszystkich krajach, zwłaszcza w tych najbardziej rozwiniętych i o największej liczbie ludności. Tylko takie podejście może zahamować destruktywny wpływ człowieka na klimat i środowisko.

3. Nowa polityka energetyczna sposobem na ograniczenie zmian klimatycznych

Zmiany klimatyczne, jakie zachodzą w ostatnim czasie na całym świecie jasno wskazują, że rozwój gospodarczy nie jest dalej możliwy w obecnym kształcie, jak i nie powinien się odbywać w oparciu o energię pochodzącą wyłącznie z konwencjonalnych źródeł kopalnych. Ich spalanie doprowadza bowiem do nasilania efektu cieplarnianego z ww. konsekwencjami dla planety i ludzkości. Ponadto rosnąca świadomość następstw wyczerpywania się paliw kopalnych, degradacji środowiska czy też zwiększonej zachorowalności ludności, wpływa na intensyfikację prac związanych z transformacją energetyczną.

3.1. Opracowanie i wdrażanie nowej polityki energetycznej

Obecnie większość energii jest pozyskiwana ze źródeł kopalnych, m.in. węgla, gazu i ropy naftowej, których zasoby ulegają szybkiemu wyczerpywaniu się, a ceny rosną ciągle rosną, doprowadzając wielokrotnie do kryzysów energetycznych a w konsekwencji – kryzysów gospodarczych na całym świecie.

Nośnikami energii (elektrycznej, cieplnej) mogą też być inne źródła, jak np. promienie słoneczne, siła wiatru, energia prądów i fal morskich, energia spadającej

wody w rzekach czy energia wnętrza Ziemi. Takie źródła energii nazywane są odnawialnymi, ponieważ nie ulegają wyczerpaniu i mogą być dostępne bez ograniczeń. Pozyskana energia nazywana jest często „zieloną energią” lub „czystą energią”, ponieważ w trakcie jej produkcji nie powstają żadne odpady. Istnieją też alternatywne (do kopalnych i odnawialnych) źródła energii, jak np. biomasa, odpady nieorganiczne i organiczne. Z pierwszych dwóch kategorii energię pozyskuje się najczęściej przez ich termiczne przekształcanie, a z ostatniej – przez beztlenowy rozkład materii organicznej, wskutek czego wytwarza się biogaz. Alternatywne źródła są mniej szkodliwe dla środowiska niż kopalne, ponieważ zmniejsza się ilość gromadzonych odpadów oraz niezagospodarowanych gazów. Nie można jednak ich nazwać czystymi, więc są one nieco „gorsze” w porównaniu ze źródłami odnawialnymi.

Nie ulega wątpliwości, że udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w globalnej produkcji energii musi ulec znacznemu przyrostowi, a sam proces – znacznemu przyspieszeniu. Na obecnym etapie zmiany te nie tylko sygnalizowane, lecz wręcz wymagane. Dzieje się tak dlatego, że również politycy dostrzegli potrzebę szybkiego działania na tym polu, co stanowi siłę napędową do wdrażania odpowiednich porozumień, regulacji oraz dyrektyw, będących siłą napędową do przejścia na energię nisko- i zeroemisyjną, tzn. zredukować emisję przede wszystkim dwutlenku węgla CO₂ (tzw. dekarbonizacja) oraz innych gazów cieplarnianych (m.in. CH₄ i NO_x). Dekarbonizacja, już wcześniej powszechnie uznawana za nieuniknioną, obecnie jest postrzegana jako priorytet w trwającej transformacji energetycznej. Odejście od spalania paliw kopalnych na rzecz odnawialnych i alternatywnych źródeł energii wydaje się najpilniejszą kwestią. Umożliwi ono obniżenie ilości emitowanych do atmosfery gazów cieplarnianych.

Konieczność zmian, prowadzących finalnie do całkowitego zastąpienia paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii, a jednocześnie paląca potrzeba redukcji emisji gazów cieplarnianych, doprowadziły do uzgodnień, których celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej w jak najkrótszym czasie. Zakres powyższych porozumień ewoluował w kolejnych latach; w początkowym okresie cele były mniej ambitne, a same uzgodnienia nie prowadziły do przełomowych zmian (Sobieraj 2017).

Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, która odbyła się w Nowym Jorku w 1992 r., następnie protokół z Kioto (1997), kolejne szczyty klimatyczne, a w efekcie Porozumienie paryskie z 2015 roku, konsekwentnie prowadziły do ustalenia zarówno celów nowej polityki klimatycznej, jak i środków, które miały pomóc w ich osiągnięciu. Następnie stawały się one podstawą dla tworzenia własnych strategii politycznych, ekonomicznych, czy w końcu klimatycznych w poszczególnych krajach.

Historycznie ujmując, głównymi „krokami milowymi”, które znacząco wpłynęły na dostrzeżenie konieczności zmian, a następnie ich stopniowe wcielanie w życie, były kolejno: Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu

(1992 r.), Protokół z Kioto (1997 r.), kolejne szczyty klimatyczne, a w efekcie – dotychczas najistotniejsze uzgodnienie – Porozumienie paryskie z 2015 roku. Wszystkie te działania konsekwentnie prowadziły do ustalenia zarówno celów nowej polityki klimatycznej, jak i środków, które miały pomóc w ich osiągnięciu. Następnie stawały się one podstawą dla tworzenia własnych strategii politycznych, ekonomicznych, czy w końcu klimatycznych w poszczególnych krajach.

Jak wspomniano, już w 1992 roku, podczas tzw. Szczytu Ziemi w Rio de Janeiro w Brazylii (tj. Konferencji Narodów Zjednoczonych ds. Środowiska i Rozwoju, która odbywała się w dniach 4–14 czerwca 1992), przyjęta została Ramowa konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (ang. *United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC). Konwencja została uzgodniona i przyjęta przez Międzyrządowy Komitet Negocjacyjny Ramowej Konwencji w sprawie Zmian Klimatu podczas jego piątej sesji, która miała miejsce w Nowym Jorku i trwała od 30 kwietnia do 9 maja 1992 r. a następnie pozostawała otwarta w siedzibie Organizacji Narodów Zjednoczonych w Nowym Jorku do 19 czerwca 1993 r. Ostatecznie weszła ona w życie 21 marca 1994 r. – po ratyfikowaniu jej przez 50 państw. Obejmuje obecnie 196 państw i jedną regionalną organizację integracji gospodarczej. Celem Konwencji było określenie założeń międzynarodowej współpracy związanej z ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych. Pierwotnie nie zawierała ona wiążących przepisów – zostały one ustanowione dopiero w protokołach. Pierwszym takim instrumentem był wspomniany protokół z Kioto, drugim – porozumienie paryskie. UNFCCC weszła w życie w 1994 r., sygnatariuszami zostało 165 państw, a obecnie jest 198 stron tej konwencji (*United Nations Treaty Collection*).

Począwszy od 1995 roku, odbywają się coroczne konferencje stron (*Conferences of the Parties* – COP), z jednym wyjątkiem – w 2020 roku, kiedy to odwołano konferencję ze względu na pandemię COVID-19. Co istotne, pierwsze konferencje (COP-1 w Berlinie oraz COP-2 w Genewie) nie przyniosły jakichś ważnych ustaleń. Dopiero trzecia, która odbyła się w Japonii w 1997 r., skutkowała powstaniem tzw. Protokołu z Kioto, będącego ważnym uzupełnieniem UNFCCC. Kolejne COP-y, odbywające się w różnych krajach świata, przyniosły kolejne dopełnienia do wcześniejszych ustaleń, jednakże bez większych, przełomowych decyzji. I tak, COP-11 (Montreal, 2005) był pierwszym spotkaniem stron protokołu z Kioto, COP-14 (Poznań, 2008) to pierwsza konferencja w Polsce, a z kolei COP-15 (Kopenhaga, 2009) okazała się fiaskiem, ze względu na brak przyjęcia prawnie wiążących decyzji dotyczących ograniczenia emisji CO₂. Warto dodać, że w Polsce odbyły się jeszcze dwie konferencje: COP-19 (Warszawa, 2013) oraz COP-24 (Katowice, 2018).

Istotnym krokiem w zmianach okazało się Porozumienie paryskie, kiedy to podczas 21 Konferencji Stron Konwencji klimatycznej w Paryżu w grudniu 2015 r. przyjęto tekst porozumienia dotyczącego wzmocnienia światowej reakcji na zagrożenia związane ze zmianami klimatu. Przy czym wartym podkreślenia jest fakt,

że choć porozumienie zostało otwarte do podpisu w siedzibie ONZ w Nowym Jorku 22 kwietnia 2016 r., to jego podpisanie przez Komisję i Radę w imieniu UE i przez wszystkie państwa członkowskie w ich imieniu nastąpiło już pierwszego dnia tego otwartego terminu (Decyzja 2016). W dokumencie wskazano, że w celu ograniczenia negatywnych skutków zmian klimatu konieczne jest lepsze wykorzystanie różnych instrumentów zarówno przez Unię Europejską oraz państwa grupy G-20, jak i kraje rozwijające. Porozumienie jest wyrazem dążeń do intensyfikacji globalnej odpowiedzi na zagrożenie klimatyczne, zakłada więc konieczność utrzymania, dzięki globalnemu, solidarnemu wysiłkowi wszystkich państw, wzrostu średnich temperatur na poziomie znacznie poniżej 2°C ponad poziom przedindustrialny i kontynuowania wysiłków na rzecz ograniczenia wzrostu temperatur do 1,5°C (Mace 2016).

Jednocześnie podkreślono konieczność dostosowania zmian do możliwości poszczególnych sygnatariuszy, zobowiązując je zarazem do cyklicznego przeglądu założonych celów, ich realizacji oraz ewentualnej aktualizacji. Wskazano też – co bardzo istotne – że realizacja powyższych celów (tj. między innymi działania zmierzające do redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery) odbywać się może w różnorodny sposób, np. dzięki wprowadzaniu nowych technologii, zwiększeniu udziału odnawialnych źródeł energii w energetycznym miksie, ale również jego pochłanianiu, np. przez powiększanie powierzchni lasów. Pozwoli to na zachowanie bioróżnorodności, jednocześnie zapobiegając migracjom ludności, która może nastąpić z powodu zmian klimatycznych (nietypowej temperatury, powodzi, huraganów, wyschnięcia zbiorników wodnych, suszy etc.), bądź środowiskowych (związanych z brakiem czystego powietrza, czystej wody, brakiem pożywienia etc.). UE zobowiązała się na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych do 2030 r. o min. 40% w porównaniu do roku 1990 r. Jednocześnie ustalono, że udział OZE w miksie energetycznym, w założonym okresie nie będzie niższy niż 27%. Rada Europejska w Konkluzjach przyjęła, że wyznaczony cel główny zostanie zrealizowany wspólnie przez wszystkie kraje UE, w sposób najbardziej racjonalny pod względem kosztów, przy redukcji emisji do 2030 r. przez sektory objęte i nieobjęte unijnym systemem handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS), wynoszącej odpowiednio 43 i 30% w stosunku do 2005 r. (Sobieraj 2017). Ostatecznie, najbardziej istotne ustalenia odnoszą się do systemu handlu uprawnieniami do emisji, odnawialnych źródeł energii oraz efektywności energetycznej. Porozumienie jeszcze przed jego wejściem w życie wpłynęło na zmianę polityki klimatyczno-energetycznej UE do 2030 r., otworzyło też dyskusje na temat kształtu nowych unijnych regulacji wdrażających tę politykę, która jest obecnie priorytetem dla UE w kontekście Porozumienia (Sobieraj 2017). Co istotne, powyższe ustalenia są wiążące zarówno w ujęciu globalnym, poprzez członków Porozumienia, jak również dla krajów członkowskich Unii Europejskiej, w tym Polski, poprzez przyjęte akty prawa unijnego.

Dodatkowo, Porozumienie paryskie zapoczątkowało prace nad specjalnym raportem, który został opublikowany w 2018 r. przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC). Raport ten – w skrócie nazywany SR15 – będący wynikiem prac blisko 100 autorów z 40 krajów, jest źródłem wiarygodnych, opartych na badaniach naukowych informacji na temat zmian klimatu w przeszłości oraz wytycznych dla decydentów w zakresie przeciwdziałania tym zmianom w przyszłości. Zaprezentowano w nim dokładny przegląd wpływu działalności człowieka, między innymi na atmosferę ziemską, oceany, kriosferę, poziom mórz, czy koncentrację niektórych gazów w atmosferze. Wymieniono także czynniki, które powodują zmianę klimatu, a także przedstawiono modele, prezentujące przyszłą globalną i regionalną zmianę klimatu. W raporcie tym stwierdzono, że ocieplenie klimatu wyniesie 1,5°C w latach 2030–2052 ponad poziom przedindustrialny, a wzrost o 2°C spowoduje nasilenie ekstremalnych zjawisk pogodowych oraz innych niekorzystnych zjawisk, będących konsekwencją destabilizacji globalnego klimatu. Raport wskazuje nie tylko konsekwencje zmian temperatury o wskazane 1,5 czy 2°C na pogodę, poziom wód, ekosystemy, gospodarkę żywnościową etc., ale także wskazuje działania, jakie należy podjąć, aby przeciwdziałać tym zmianom (między innymi poprzez ograniczenie emisji dwutlenku węgla) (IPCC).

Ostatnia konferencja (COP-26) odbyła się w dniach od 31 października do 13 listopada 2021 roku i miała miejsce w Glasgow w Wielkiej Brytanii. Stwierdzono na niej, że konieczne jest przyspieszenie wysiłków na rzecz wycofywania energetyki węglowej o nieobniżonej emisji oraz nieefektywnych subsydiów dla paliw kopalnych, jednakże przy uwzględnieniu sprawiedliwego przebiegu tejże transformacji (Nowak 2021). Według ekspertów Międzynarodowej Agencji Energetycznej, aby zatrzymać wzrost globalnych temperatur na poziomie 1,5°C w porównaniu z temperaturami sprzed ery przemysłowej (co jest głównym celem porozumienia paryskiego), potrzebne jest zamknięcie przynajmniej 40% z około 8500 elektrowni węglowych do 2030 roku (Gramwzielone.pl). W ostatnich chwilach trwania szczytu Chiny, będące największym na świecie konsumentem paliw kopalnych, zdołały zmienić zapis, który pierwotnie brzmiał *phase out*, czyli wycofywanie się z paliw kopalnych, na sformułowanie *phase down*, czyli ich redukcję. Podczas konferencji poruszono wiele innych kwestii między innymi określono cele redukcji emisji do 2030 roku oraz działania dotyczące niesienia pomocy ubogim krajom, adaptacji do zmian klimatu, handlu redukcjami emisji, raportowania emisji, a także konkretnych ustaleń, np. deklaracji Indii o zeroemisyjności netto do roku 2070 (i wytwarzaniu przez ten kraj 50% energii elektrycznej z OZE już w roku 2030). Deklaracje takich krajów jak Chiny, USA oraz Indie pozostały szczególnie istotne, ze względu na fakt, że kraje te są głównymi emitentami gazów cieplarnianych. Poza powyższymi kwestiami, omówiono także konkretne działania, takie jak zalesianie, redukcja emisji metanu, przyspieszenie odejścia od pojazdów

spalinowych na rzecz zeroemisyjnych, czy też wsparcie dla krajów rozwijających się i ubogich, a jednocześnie zagrożonych poprzez zmiany klimatu. Choć COP-26 nie przyniósł rewolucyjnych zmian, to jednak eksperci są zgodni co do tego, że powyższe ustalenia przybliżają realizację zapisów Porozumienia paryskiego i stanowią ważny krok na drodze zatrzymania katastrofalnych zmian klimatu. Jednocześnie wskazują, że nadal dla pełnego sukcesu konieczne jest nie tylko podjęcie wspomnianych działań (które, póki co w większości pozostają tylko deklaracjami i uzgodnieniami), ale także ich intensyfikacja oraz przyspieszenie wdrażania. Najbliższa konferencja COP-27, która odbędzie się w dniach 6–18 listopada 2022 roku w Sharm El Sheikh w Egipcie, ma być pogłębieniem debat z Glasgow, między innymi na temat finansowania niezbędnych działań, naprawy szkód, które już się dokonały przez zmianę klimatu, działań adaptacyjnych i prewencyjnych, a także sprawiedliwej transformacji, przy zachowaniu wskazanych norm czasowych (COP-27).

25 września 2015 r. na Szczycie ONZ ds. Zrównoważonego Rozwoju, przyjęta została Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030, która jest swoistym planem działań na rzecz ludzi, planety, dobrobytu, pokoju i międzynarodowej, globalnej współpracy. Określone tam cele, zostały wymienione poniżej (United Nations, Department):

- Cel 1. Skończyć z ubóstwem we wszystkich jego formach na całym świecie.
- Cel 2. Wyeliminować głód, osiągnąć bezpieczeństwo żywnościowe i lepsze odżywianie oraz promować zrównoważone rolnictwo.
- Cel 3. Zapewnić zdrowe życie i promować dobre samopoczucie dla wszystkich w każdym wieku.
- Cel 4. Zapewnić sprawiedliwą i wysokiej jakości edukację oraz promować możliwości uczenia się przez całe życie dla wszystkich.
- Cel 5. Osiągnąć równość płci i wzmocnić pozycję wszystkich kobiet i dziewcząt.
- Cel 6. Zapewnić wszystkim dostęp i zrównoważoną gospodarkę wodną i sanitarną.
- Cel 7. Zapewnić wszystkim dostęp do niedrogiej, niezawodnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii.
- Cel 8. Promować trwałe, sprzyjający włączeniu społecznemu i zrównoważony wzrost gospodarczy, pełne i produktywne zatrudnienia oraz godną pracę dla wszystkich.
- Cel 9. Budować odporną infrastrukturę, promować zrównoważoną industrializację sprzyjającą włączeniu społecznemu oraz wspierać innowacje.
- Cel 10. Zmniejszać nierówności wewnątrz krajów i między nimi.
- Cel 11. Sprawić, by miasta i osiedla ludzkie były przyjazne, bezpieczne, odporne i zrównoważone.
- Cel 12. Zapewnić zrównoważone wzorce konsumpcji i produkcji.

- Cel 13. Podjęcie pilnych działań w celu przeciwdziałania zmianom klimatu i ich skutkom*.
- Cel 14. Ochrona i zrównoważone wykorzystanie oceanów, mórz i zasobów morskich dla zrównoważonego rozwoju.
- Cel 15. Ochrona, przywracanie i promowanie zrównoważonego użytkownika ekosystemów lądowych, zrównoważone zarządzanie lasami, zwalczanie pustynnienia oraz powstrzymanie i odwrócenie degradacji gleby oraz powstrzymanie utraty różnorodności biologicznej.
- Cel 16. Promować pokojowe i integracyjne społeczeństwa na rzecz zrównoważonego rozwoju, zapewnić wszystkim dostęp do wymiaru sprawiedliwości oraz budować skuteczne, odpowiedzialne i integracyjne instytucje na wszystkich poziomach.
- Cel 17. Zwiększyć środki na realizację oraz ożywienie globalnego partnerstwa na rzecz zrównoważonego rozwoju.

Wymienione działania powinny być zarówno realizowane, jak i monitorowane tak na poziomie krajowym, jak i regionalnym oraz globalnym. Poruszone tu cele w znacznej części wymagają skoordynowanych, podjętych na szeroką skalę działań zmierzających do przeciwdziałania zmianom klimatu, gdyż tylko w takim wypadku możliwe jest zapewnienie ich realizacji. I dotyczy to nie tylko celu 13, który jest tam wskazany jako cel bezpośredni, ale także znacznej części pozostałych, które są jego pochodną.

Z kolei UE, aspirująca do miana światowego lidera w zakresie zarówno ochrony środowiska, ograniczenia emisji zanieczyszczeń, przeciwdziałania zmianom klimatu oraz transformacji energetycznej, opracowała założenia, których nadrzędnym celem jest osiągnięcie neutralności klimatu w Europie do 2050 roku. Zostały one przedstawione w opublikowanym w grudniu 2019 roku komunikacie Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów pn. Europejski Zielony Ład (EZŁ). Ten dokument zapoczątkowuje nową unijną strategię na rzecz wzrostu, wspiera transformację UE w sprawiedliwe i dobrze prosperujące społeczeństwo, które odpowiada na wyzwania związane ze zmianą klimatu i degradacją środowiska, poprawiając jakość życia obecnych i przyszłych pokoleń. Komisja zwraca się do Parlamentu Europejskiego i Rady o zatwierdzenie inicjatyw politycznych Europejskiego Zielonego Ładu i przywiązanie jak największej wagi do zawartych w nim środków (Komunikat Komisji). Działania te zostały określone jako:

- Bardziej ambitne niż dotychczasowe cele klimatyczne UE na lata 2030 i 2050.
- Dostarczanie czystej, przystępnej cenowo i bezpiecznej energii.

* Uznając, że Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu jest głównym międzynarodowym, międzyrządowym forum negocjowania globalnej odpowiedzi na zmiany klimatu.

- Zmobilizowanie sektora przemysłu na rzecz czystej gospodarki o obiegu zamkniętym.
- Budowanie i remontowanie w sposób oszczędzający energię i zasoby.
- Przyspieszenie przejścia na zrównoważoną i inteligentną mobilność.
- Od pola do stołu: stworzenie sprawiedliwego, zdrowego i przyjaznego środowiska systemu żywnościowego.
- Ochrona i odbudowa ekosystemów i bioróżnorodności.
- Zerowy poziom emisji zanieczyszczeń na rzecz nietoksycznego środowiska.
- Wspieranie zielonego finansowania i zielonych inwestycji oraz zapewnienie sprawiedliwej transformacji.
- Ekologizacja budżetów krajowych i zapewnienie odpowiednich sygnałów cenowych.
- Wspieranie badań naukowych i pobudzanie innowacji.
- Aktywizacja kształcenia i szkolenia.
- Zielone przyrzeczenie: „Nie szkodzić”.
- Uwzględnianie kwestii zrównoważonego rozwoju we wszystkich obszarach polityki UE.
- UE w roli światowego lidera.
- Współpraca – Europejski Pakt na Rzecz Klimatu (Komunikat Komisji, Załącznik do Komunikatu).

W ramach EZŁ powstał dodatkowo pakiet regulacji klimatycznych Unii Europejskiej, pod nazwą Fit for 55, w Polsce znany jako „Gotowi na 55”. Powyższa nazwa to działania zmierzające do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych w Europie o co najmniej 55% do 2030 roku względem poziomu z 1990 roku i osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku. Gotowi na 55 to zestaw kilkunastu powiązanych aktów legislacyjnych, a sam pakiet został zaproponowany przez Komisję Europejską 14 lipca 2021 roku. Przewiduje on między innymi:

- umocnienie systemu handlu emisjami, w tym w lotnictwie i jego rozszerzenie na gospodarkę morską, transport drogowy i budynki;
- zaktualizowanie dyrektywy w sprawie opodatkowania energii;
- stworzenie nowego mechanizmu dostosowywania cen na granicach z uwzględnieniem emisji CO₂;
- zaktualizowanie rozporządzenia w sprawie wspólnego wysiłku redukcyjnego;
- zaktualizowanie rozporządzenia w sprawie użytkowania gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwa;
- zaktualizowanie dyrektywy w sprawie odnawialnych źródeł energii;
- zaktualizowanie dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej;
- zaostrzenie norm emisji CO₂ w przypadku samochodów osobowych i dostawczych;
- stworzenie nowej infrastruktury na potrzeby paliw alternatywnych;
- wykorzystanie bardziej zrównoważonych paliw lotniczych;

- stosowanie bardziej ekologicznych paliw żeglugowych;
- ustanowienie nowych środków wsparcia, w tym nowego Społecznego Funduszu Klimatycznego;
- ograniczenia emisji metanu w sektorze energetycznym;
- zmiany dyrektywy w sprawie charakterystyki energetycznej budynków;
- zmiany trzeciego pakietu energetycznego w zakresie gazu (zdekarbonizowany rynek gazu) (Pakiet „Gotowi na 55”).

W czerwcu 2022 roku Fit for 55 został jednak zablokowany w Parlamencie Europejskim – projekty dotyczące reformy systemu handlu emisjami (ETS), mechanizmu dostosowywania cen na granicach z uwzględnieniem emisji CO₂ (CBAM) oraz Społecznego Funduszu Klimatycznego zostały odesłane do komisji, po tym jak Parlament Europejski odrzucił raport w sprawie unijnego systemu handlu emisjami (CIRE.PL).

Także w Polsce zauważono konieczność zmian w krajowej energetyce, z uwzględnieniem oddziaływania jej na środowisko naturalne i, co za tym idzie, na zmiany klimatu. Opracowana Polityka Energetyczna Polski do 2040 roku (PEP 2040) jako główny cel określa „zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego, przy jednoczesnym zapewnieniu konkurencyjności gospodarki, efektywności energetycznej i zmniejszeniu oddziaływania sektora energii na środowisko, biorąc pod uwagę optymalne wykorzystanie własnych zasobów energetycznych (PEP 2040)”. I tak określono osiem głównych kierunków, których celem jest osiągnięcie założonego celu głównego:

1. Optymalne wykorzystanie własnych surowców energetycznych.
2. Rozbudowa infrastruktury wytwórczej i sieciowej energii elektrycznej.
3. Dywersyfikacja dostaw i rozbudowa infrastruktury sieciowej gazu ziemnego, ropy naftowej oraz paliw ciekłych.
4. Rozwój rynków energii.
5. Wdrożenie energetyki jądrowej.
6. Rozwój odnawialnych źródeł energii.
7. Rozwój ciepłownictwa i kogeneracji.
8. Poprawa efektywności energetycznej gospodarki (PEP 2040).

Powyższe działania zawierać się mają w trzech głównych filarach:

- sprawiedliwa transformacja (I filar),
- zeroemisyjny system energetyczny (II filar),
- dobra jakość powietrza (III filar) (Ministerstwo Klimatu i Środowiska).

Ostatnie zmiany w podejściu do problemu zielonej energii i neutralności klimatycznej zauważalne są także na Starym Kontynencie. Jeśli chodzi o USA, prezydent tego kraju, Joe Biden, podczas kwietniowego szczytu '21, podkreślił również zwrot w polityce swojego kraju w tym zakresie (FACT SHEET), łagodząc w ten sposób negatywny wizerunek Stanów Zjednoczonych Ameryki, będący efektem działań poprzedniego prezydenta, Donalda Trumpa. W rezultacie, zdecydowano

się na modyfikację procesu transformacji, co oznacza konieczność przyspieszenia wdrażanych zmian niż przyjęte poprzednio (Davis i in. 2021). To z kolei wymusza podjęcie działań, które zapewnią odpowiednie tempo ich realizacji. Dla rynku OZE oznaczać to może już nawet nie ewolucję, a wręcz rewolucję – uwarunkowaną jednak od wielu czynników – w tym m.in. od dostępności surowców, służących do wdrożenia źródeł odnawialnych energii na skalę masową.

Konieczność zastąpienia konwencjonalnych źródeł energii za pomocą OZE dla niektórych krajów wydaje się większym wyzwaniem niż dla innych, ze względu na uwarunkowania polityczne, ekonomiczne i środowiskowe kształtujące zarówno końcowy efekt, jak i postęp realizacji tych zmian. W krajach, które opierają swoją strategię energetyczną na kopalinach (jak np. w Polsce) często podkreśla się konieczność wydłużenia procesu transformacji energetycznej, jej przyspieszenie bowiem może wydać się dla polityków ruchem, nieprzynoszącym popularności wśród wielotysięcznej grupy pracowników zamykanych kopalń. Analogicznie, w krajach, których gospodarka opiera się na eksporcie wydobywanych surowców, takich jak ropa naftowa (Arabia Saudyjska, Irak) czy gaz ziemny (Rosja, USA), intensyfikacja działań zmierzających do całkowitego zaprzestania wykorzystania tych zasobów wydaje się gigantycznym wyzwaniem ekonomicznym i politycznym. Również w krajach o niskim wskaźniku PKB, niezbędne kosztowne inwestycje w OZE mogą okazać się poważną barierą utrudniającą lub wręcz uniemożliwiającą proces transformacji energetycznej. Dodatkowo, uwzględnić należy, że nie wszystkie regiony świata są w jednakowy sposób zasobne w energię pochodzącą ze źródeł odnawialnych. Regiony o niekorzystnym układzie geograficznym i przyrodniczym (niskie nasłonecznienie, niewielki ruch mas powietrza, brak źródeł geotermalnych, czy też ograniczone możliwości wykorzystania hydroenergetyki) w konsekwencji powodować mogą spowolnienie procesu transformacji energetycznej w ujęciu globalnym. Wszystkie te aspekty powodują istnienie znacznych różnic, jeśli chodzi o oczekiwania, ale jednocześnie – także obaw i wyzwań. Nie zmienia to jednak faktu, że większość państw, w większym bądź mniejszym stopniu, dostrzega nieuchronność i konieczność tej transformacji.

Zachodzące na świecie zmiany klimatyczne i środowiskowe oraz wpływ zanieczyszczeń na zdrowie i życie ludności, nie mogą być w dalszym ciągu ignorowane. Co istotne, o ile dwa pierwsze problemy są widoczne i znane większej części społeczeństwa, o tyle dane dotyczące wpływu zanieczyszczeń na zdrowie i życie ludzkie – już niekoniecznie. Jak wskazują badania, jest to jeden z głównych czynników ryzyka śmierci (zajmuje czwarte miejsce, odpowiadając za średnio około 5 milionów zgonów rocznie na całym świecie) – w tym chorób serca, udaru, infekcji dolnych dróg oddechowych czy raka płuc (Stanaway i in. 2018). Szacuje się, że zanieczyszczenie powietrza przyczyniło się do około 9% zgonów w 2017 r., a wskaźnik ten w ostatnich latach waha się w zależności od regionu pomiędzy 2 a 15% (Ritchie i Roser 2017).

3.2. Wdrażanie fotowoltaiki a zapotrzebowanie na surowce

Wcześniejsze podejście, które polegało na dostrzeżeniu potrzeby zastąpienia konwencjonalnych źródeł energii przez odnawialne, obecnie przybrało postać bezwzględnej konieczności, tzn. konieczności podejmowania natychmiastowych działań w tym zakresie. To z kolei oznacza, że OZE muszą stanowić coraz większą część miks energetycznego, docelowo zastępując w pełni źródła nieodnawialne (węgiel, ropę naftową, gaz ziemny). Rola energii odnawialnej w globalnej transformacji energetycznej jest przedmiotem wielu badań, jednak nie ma wątpliwości, że to fotowoltaika jest w ostatnim czasie największym beneficjentem tych zmian. Przewiduje się również utrzymanie tego trendu w przyszłości (Gielen i in. 2019). Zwiększone zainteresowanie energią pozyskaną ze słońca skutkuje zwiększeniem popytu na panele fotowoltaiczne (PV – *photovoltaics*), a jego zaspokojenie – koniecznością zapewnienia odpowiedniej ilości surowców, niezbędnych do ich produkcji wraz z odpowiednią infrastrukturą (inwertery (falowniki), sterowniki, przewody, stelaże, inne system mocujące, konektory).

Zagadnienie to już wcześniej było przedmiotem badań naukowych (Moreau i in. 2019; Elshkaki 2019; Kavlak i in. 2014; World Bank 2021), obecnie jednak staje się kluczową kwestią, zarówno dla rynku fotowoltaiki, jak i szerzej – rozwoju odnawialnych źródeł energii. Z badań tych wynika, że już w najbliższych latach należy brać pod uwagę zwiększone zapotrzebowanie ze strony producentów instalacji OZE na wybrane surowce, mogące doprowadzić do ich niedoboru i gwałtownego wzrostu cen, a w konsekwencji – do spadku efektywności ich wykorzystania. Odnosi się to w szczególności do metali ziem rzadkich oraz zasobów, znajdujących się w ograniczonych geograficznie lokalizacjach. Jednakże może to dotyczyć również większości pozostałych surowców. Wymienić tu można między innymi: mangan, lit, molibden, neodym, kobalt, wanad, tytan, ale także: aluminium, miedź, cynk czy srebro (Tokimatsu i in. 2018). W konsekwencji może to przyczynić się do spowolnienia rozwoju energetyki zeroemisyjnej.

Do produkcji fotowoltaiki potrzebny jest szereg surowców, jednakże wielkość zapotrzebowania na poszczególne z nich zależy będzie m.in. od przyszłych rozwiązań technologicznych produkcji paneli PV. Uwzględnić tu należy między innymi takie metale jak: kadm, tellur, ind, gal, selen, german, ind, srebro, aluminium, miedź, cynk, krzem (Grandell i Höök 2015; Elshkaki, Graedel 2015; Feltrin, Freundlich 2008). Obecnie, dominująca jest technologia oparta na krzemie (c-Si)*, dwie odmiany którego (krzem polikrystaliczny, krzem monokrystaliczny) odpowiadają za około 95% całego rynku paneli PV (Oberbeck i in. 2020).

* C-Si, *crystalline silicon*; krzem krystaliczny, oznaczenie takie dotyczy także w części literatury technologii monokrystalicznego krzemu, podczas gdy dla krzemu polikrystalicznego używane oznaczenie to mc-Si.

Według danych raportu Instytutu ISE*, w 2020 roku wartość nowych instalacji wyniosła w ujęciu globalnym 151,6 GWp, z czego tylko 7,7 GWp pochodziło z paneli wykonanych w technologiach innych niż krzemowe (Fraunhofer). Do produkcji tego rodzaju modułów PV wymagane są znaczne ilości różnorodnych surowców, w tym srebra. Wcześniejsze badania wskazywały, że to właśnie ten metal może stanowić ograniczenie przy produkcji fotowoltaiki na skalę masową, jednakże ich analiza odbywała się przy założeniach, które uległy w ostatnich latach dezaktualizacji. Zmiany, które zaszły w tym czasie (technologiczne, ekonomiczne, polityczne) wskazują na konieczność ponownej oceny przedstawionych problemów i pytań badawczych.

Tematyka dostępności surowców w kontekście rozwoju OZE dynamicznie się rozwijała w przeciągu ostatnich dekad. W badaniach naukowych (Grandell i Höök 2015; Elshkaki i Graedel 2015; Feltrin i Freundlich 2008) poruszane były zagadnienia wskazujące na możliwy niedobór wybranych metali, mających zastosowanie w OZE, a w szczególności – fotowoltaice. Jednak wymagają one uaktualnienia danych z lat 2015–2020, charakteryzujących się znaczną intensywnością przemian zachodzących w energetyce zeroemisyjnej. Jeszcze inne opracowania, takie jak (Zuser i Rechberger 2011; García-Olivares 2015; Louwen i in. 2016; Davidsson i Höök 2017) zawierają wprawdzie istotne informacje i dane, jak również wnioski oraz konkluzje, nie obejmują jednak w pełni założonego obszaru badawczego, bądź też ich charakter jest w wybranych aspektach odmienny od powyższych ram rozważań. Przykładowo, autorzy publikacji (Kavlak i in. 2014) dotyczącej metali wykorzystywanych w fotowoltaice, nie uwzględnili srebra. Stosując analizę scenariuszową, objęli swoim badaniem takie metale jak: ind, gal, selen, tellur, kadm oraz krzem, wskazując na ich zwiększony udział w przyszłych technologiach fotowoltaicznych. Jednakże, przyjęte w 2015 roku założenia scenariuszowe, nie do końca się sprawdziły, ponieważ jak wykazano w dalszej części niniejszego opracowania, udział technologii innych niż krzemowe jest obecnie niższy niż pierwotnie zakładano, a rozwój tego sektora OZE okazał się bardziej dynamiczny, niż prognozy. Wszystkie te aspekty wymuszają konieczność ponownego przeprowadzenia badania, które będzie uwzględniało powyższe zmiany oraz zmodyfikowane założenia scenariuszowe – tak dotyczące całego sektora energetycznego, jak i udziału w nim OZE, a w szczególności sektora fotowoltaicznego, ze zwróceniem uwagi na rolę technologii krzemowej, w której srebro odgrywa istotną rolę.

* Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.

Część II. Czynniki wpływu na rynek srebra

z uwzględnieniem rozwoju rynku paneli PV

4. Analiza globalnego rynku srebra

4.1. Historia srebra

Srebro jest drugim – zaraz po złocie – pod względem popularności metalem szlachetnym. Jego właściwości powodują, że może być traktowany zarówno jak towar inwestycyjny, tak i surowiec przemysłowy. Historycznie ujmując, początki wykorzystania srebra sięgają starożytnego Egiptu, w którym już prawie 5000 lat temu kruszec ten był stosowany w jubilerstwie. Mało tego, ze względu na niewielkie ilości złóż srebra w północnej Afryce było ono nawet cenniejsze od złota. Rzadkość występowania tego metalu spowodowała, że był on wykorzystywany tylko do wykonywania najcenniejszych przedmiotów lub nawet zaledwie ich części – takie najwartościowsze przedmioty znalazły się między innymi w posiadaniu faraonów i zostały odnalezione w ich grobowcach.

Dwa tysiące lat później, około VII w. p.n.e. pojawiły się pierwsze monety wykonane z elektrum, czyli naturalnie występującego w przyrodzie stopu złota i srebra. Zaczęto je wybijać początkowo w Grecji, a następnie przyjęły się także w kolejnych państwach jako wygodny i uniwersalny środek płatniczy. Następne stulecia przynosiły odkrywanie kolejnych złóż srebra, co powodowało, że kruszec ten przyczyniał się do wzbogacania się danego państwa lub regionu – tak było między innymi w V w. p.n.e., kiedy to w okolicach Aten znaleziono większe pokłady tego metalu, co sprawiło, że nastąpił znaczny wzrost zamożności mieszkańców tej części Grecji. Dwa tysiące lat później odkrycie przez Krzysztofa Kolumba Ameryki dało początek powstaniu znacznej liczby kopalni, szczególnie na terenie Meksyku, Peru i Boliwii, gdzie odkryte zostały złoża zawierające ogromne ilości srebra. To z kolei spowodowało zwiększenie roli srebra na świecie i wzbogacania Hiszpanów przez okres 300 lat (Historia Srebra 2020).

Także na terenie Europy (a dokładniej Czech) odkryte zostały wielkie złoża białego kruszcu, z którego zaczęto wybijać talary. Zbliżona historia dotyczy także dolara – holenderskiego odpowiednika talara, wprowadzonego do obiegu na terenie

dzisiejszego Nowego Jorku. Jednym z ważniejszych wydarzeń w historii srebra było utworzenie w 1792 roku w USA waluty bazującej na srebrze – jeden dolar odpowiadał 24,056 g tego kruszcu (Historia Srebra 2020). Takie sztywne połączenie waluty z kruszczem posiadało oprócz wielu zalet (między innymi stabilności i wiarygodności dolara) także pewne wady. Te ujawniły się między innymi po odkryciu wielkich złóż srebra na terenie Nevady w USA – znaczna nadpodaż na rynku srebra spowodowała spadek jego wartości, a to z kolei skutkowało spadkiem siły nabywczej dolara jako waluty skorelowanej bezpośrednio z tym metalem. Nie sposób pominąć jednak jeszcze kilku wydarzeń, które nie dość, że znacząco wpłynęły na kształtowanie się cen samego srebra, produktów z nim powiązanych, czy też rynków, na których obracano tym surowcem, ale także wywołały istotne zmiany, szczególnie ekonomiczne oraz polityczne.

Chronologicznie, pierwszym z takich ważnych wydarzeń było podjęcie decyzji o ustanowieniu w Stanach Zjednoczonych Ameryki sztywnego kursu srebra do złota, w stosunku 1:16. Choć bimetalizm funkcjonował tam już wcześniej, nie stanowiło to większego problemu, gdyż wymienialność tych cennych kruszców na dolary odbywała się bez większych przeszkód, można pokusić się tutaj nawet o stwierdzenie, że wręcz dobrze się uzupełniały, tworząc symbiozę dolar–srebro–złoto. Warto wspomnieć, że już wcześniej, na mocy Coinage Act z dnia 2 kwietnia 1792 r. w Stanach Zjednoczonych został wprowadzony bimetalizm. Podstawową srebrną monetą miał być dolar, natomiast złotą – orzeł, który miał wartość 10 dolarów. W sekcji ósmej Coinage Act moneta jednodolarowa została zdefiniowana jako 371,25 granów* czystego srebra lub równowartość 24,75 granów czystego złota. Oznacza to stosunek wartości złota do srebra na poziomie 15:1. Zawartość kruszców w emitowanych monetach ukazano w tabeli 6.

Jednak wyczerpywanie się zasobów srebra w USA zmusiło rząd do wprowadzenia waluty opartej na złocie i przyjęcie w roku 1900 tzw. Gold Standard Act. Odbyło się to stosunkowo szybko – na przestrzeni zaledwie około 30 lat kolejne decyzje w tym zakresie spowodowały utratę przez Stany Zjednoczone znacznej części swoich zasobów złota. Pierwszą z tych decyzji była ustawa o monetach z 1873 r. – pozwalająca na wymianę certyfikatów dłużnych na dowolny metal (zwykle preferowane było złoto). Drugą taką decyzją była uchwała Kongresu z roku 1878, która nakazywała zakup przez rząd USA srebra po cenach rynkowych i wybijanie z niego monet. Kolejną zastąpiła poprzednią uchwałę przez ustawę z 1880 roku (Sherman Silver Purchase Act), zwiększającą wielkość rezerw tego kruszcu, za które płacono certyfikatami wymienialnymi na srebrne oraz złote monety – doprowadziło to do sytuacji, w której znaczna część tych certyfikatów była zamieniana na złoto, co jak wspomniano, doprowadziło w efekcie do utraty przez USA około połowy zapasów tego cennego kruszcu (Sherman Silver). Obawy o spowodowanie wzrostu inflacji

* Gran, ang. *grain*, jednostka masy używana w krajach anglosaskich, 1 gran = około 0,0648 g.

Tabela 6. Zawartość metali w amerykańskich monetach na mocy Coinage Act z 1792 roku

Nazwa waluty	Wartość [\$]	Zawartość i rodzaj metalu
Orzeł	10,000	247,5 granów (16,04 g) czystego złota
Pół orła	5,000	123,75 granów (8,02 g) czystego złota
Ćwierć orła	2,500	61,875 granów (4,01 g) czystego złota
Dolar	1,000	371,25 granów (24,10 g) czystego srebra
Pół dolara	0,500	185,625 granów (12,00 g) czystego srebra
Ćwierć dolara	0,250	92,8125 granów (6,01 g) czystego srebra
Dime	0,100	37,125 granów (2,41 g) czystego srebra
Pół dime	0,050	18,5625 granów (1,20 g) czystego srebra
Cent	0,010	264 grany (17,10 g) miedzi
Pół centa	0,005	132 grany (8,55 g) miedzi

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Coinage Act z dnia 2 kwietnia 1792 r., sekcja 9; Cyrzan 2013.

przez bimetalizm płatniczy doprowadziły do przyjęcia wspomnianego standardu złota i podpisanie słynnej ustawy Gold Standard Act, na mocy której przyjęto, że złoto jest jedynym standardem w wykupie papierowych pieniędzy emitowanych przez bank centralny USA (Allen 2009).

Drugim istotnym wydarzeniem, a właściwie ciągiem wydarzeń, które znacząco wpłynęły na rynek srebra były zmiany, które nastąpiły w latach Wielkiego Kryzysu oraz II Wojny Światowej. Ze względu na szalejącą w wielu krajach inflację a nawet hiperinflację, będącą między innymi konsekwencją konieczności finansowania kosztownych działań zbrojnych podczas I Wojny Światowej, kraje utrzymujące standard złota, postanowiły najpierw go zmodyfikować, a w końcu ostatecznie od niego odejść. Tak stało się najpierw między innymi w Wielkiej Brytanii oraz innych krajach Europy, a następnie także Stany Zjednoczone porzuciły parytet złota na mocy ustawy Gold Reserve Act z 1934 roku (Zabielski 2005). Rok wcześniej w USA ukazało się słynne Rozporządzenie wykonawcze numer 6102, które zostało wydane przez prezydenta Franklina D. Roosevelta, z jednej strony zakazujące wszystkim obywatelom oraz instytucjom gromadzenia złota w postaci monet, bulionu oraz certyfikatów złota, a z drugiej strony nakazujące zwrot już posiadanych monet, sztabek czy certyfikatów do Banku Rezerwy Federalnej*. Od 1 maja 1933 roku

* Bank centralny USA.

posiadanie wyżej wymienionych dóbr było przestępstwem zagrożonym karą 10 lat więzienia (Kolany 2018). Tak zdeponowane złoto było wymieniane po stałym kursie wynoszącym 20,67 dolara amerykańskiego za jedną uncję trojańską (Hayes 2022). Jednak już w roku 1934 na mocy wspomnianego Gold Reserve Act zostały zmienione warunki dotyczące paritetu złota do dolara – od tej pory jedna uncja tego kruszcu kosztowała 35 USD, co oznaczało natychmiastową utratę blisko połowy siły nabywczej dolara (Officer 2018). W tym samym czasie Chiny nadal utrzymywały standard srebra, co pozwoliło im na osiągnięcie przewagi konkurencyjnej względem innych krajów dotkniętych Wielkim Kryzysem, a które to kraje utrzymywały standard złota. Rezygnacja z niego przez rząd USA oraz rządy licznych krajów Europy spowodowała, że waluta Chin zaczęła się umacniać, a eksport chińskich towarów stał się nieopłacalny. Dodatkowo przeforsowane przez kongresmena Pittmana prawo obligowało Departament Skarbu do skupowania krajowego lub zagranicznego srebra, do momentu aż kruszec ten osiągnie wartość 25% podaży pieniądza w USA, lub też dopóki jego cena nie wzrośnie do 1,29 dolara za uncję (Mihm 2015). Doprowadziło to do szybkiego wzrostu ceny srebra. O ile początkowo wynosiła ona około 35 centów, o tyle w ciągu zaledwie roku wzrosła o ponad 100%. Dla mieszkańców USA i firm zajmujących się wydobywaniem tego kruszcu, znajdujących się między innymi w Nevadzie (skąd pochodził kongresmen, mający udziały w tych kopalniach), była to bardzo dobra wiadomość. Zupełnie odwrotny wpływ miało to na Chiny – przyczyniając się do deflacji spowodowanej wysokimi cenami srebra; po pewnym czasie waluta Chin została uwolniona od paritetu srebra, a gospodarka tego kraju przeszła najpierw głębokie załamanie a następnie – reformę.

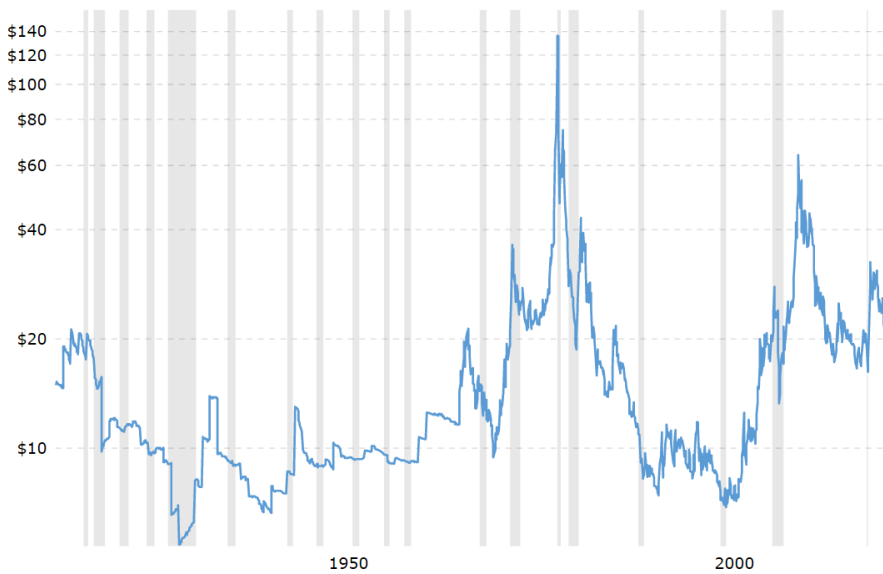
Kolejnym wydarzeniem (a właściwie dwoma, jednak dotyczącymi tego samego, czyli paritetu złota do dolara), które wpłynęło na rynek srebra było wprowadzenie systemu z Bretton Woods w roku 1944, a następnie odejście od niego w roku 1971 i całkowite odstępianie od standardu złota. Choć te wydarzenia bezpośrednio nie dotyczyły srebra tylko złota, jednak znacząco wpłynęły na wartość białego metalu. Na rysunku 2 przedstawiony jest stosunek ceny złota do ceny srebra, czyli tak zwany Gold-Silver Ratio za okres ostatnich stu lat (1920–2020).

Z kolei Na rysunku 3 zaprezentowano wartość srebra, wyrażoną w dolarach amerykańskich z uwzględnieniem inflacji. Można tu zauważyć, że w latach 1940–1970, czyli od momentu wprowadzenia systemu z Bretton Woods do chwili jego zakończenia, stosunek Gold-Silver Ratio spadł z prawie 100:1 do niespełna 20:1, co oznacza pięciokrotny wzrost ceny srebra wyrażanego w złocie. Analizując jednak wartość srebra wyrażanego w dolarach, widoczne jest, że w tym czasie cena srebra wahała się w przedziale 7–17 USD, z czego większość czasu utrzymywała się w okolicach 8–12 USD, co oznacza, że różnice wyniosły zaledwie około 50%. Jest to diametralna różnica w stosunku do ceny srebra wyrażanej za pomocą Gold-Silver Ratio.



Rys. 2. Gold-Silver Ratio w latach 1920–2020

Źródło: Clark 2019



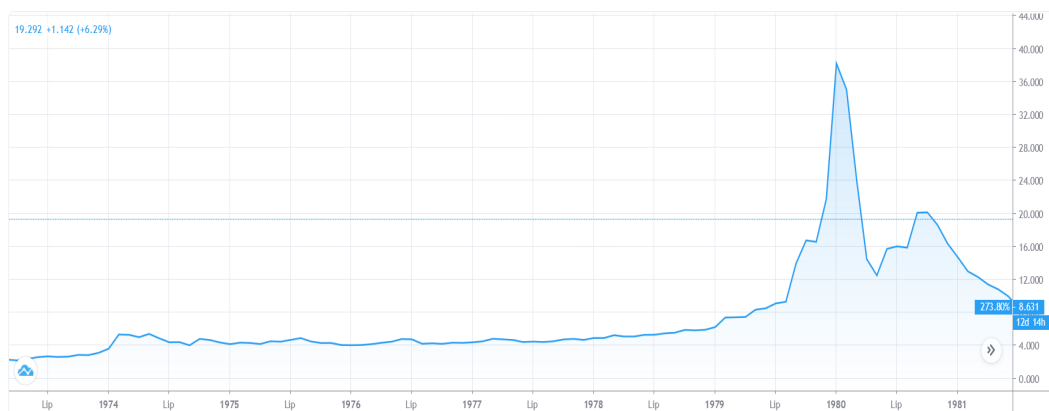
Rys. 3. Cena srebra w latach 1920–2020, wyrażona w dolarach amerykańskich

Źródło: Silver Prices 2020

Po upadku systemu z Bretton Woods, 15 sierpnia 1971 r., kiedy to prezydent Nixon podjął decyzję o całkowitym zawieszeniu wymienialności dolara na złoto, Amerykański System Rezerwy Federalnej może prowadzić dużo bardziej elastyczną politykę monetarną, opartą na systemie pieniądza fiducjarnego oraz rezerw cząstkowych, która nie jest już uzależniona od pokrycia emitowanego pieniądza przez cenny kruszec, który miałby znajdować się w państwowych skarbcach. Dodatkowo już wcześniej, bo w roku 1963 w USA uchylono ustawę z 1934 r. o zakupie srebra, a następnie wycofano z obiegu srebrne monety (1967) oraz zakończono odkupowanie papierów wartościowych z pokryciem w srebrze (1968) (Historia Srebra 2020).

Jeszcze inny epizod, który wpłynął znacząco na rynek srebra, a miał miejsce stosunkowo niedawno, bo w latach 1973–1980, związany był z inwestycjami w ten kruszec przez braci Hunt. Wszystko zaczęło się w roku 1973, kiedy to Huntowie dokonali swojego pierwszego dużego zakupu – dwudziestu milionów uncji tego metalu, a do kwietnia 1974 roku posiadali już prawie trzy razy więcej, bo aż 55 milionów uncji, co stanowiło około 8% światowej produkcji srebra (Adamiak 2021). Dysponując znacznymi środkami finansowymi zdobytymi wcześniej na rynkach ropy naftowej oraz nieruchomości, postanowili zdominować mało płynny rynek tego surowca, skupując niesamowite jego ilości w cenie 2 dolarów za uncję. W przeciwieństwie jednak do większości inwestorów, decydowali się oni na realizację kontraktów poprzez odbiór fizycznego kruszcu, co miało na celu ochronę ich majątku przed inflacją (GOLDCO). Dodatkowo, aby zabezpieczyć się przed konfiskatą mienia przez rząd USA (tak, jak to de facto już miało miejsce w przypadku złota) zdecydowali się oni na przetransportowanie srebra za pomocą samolotów do Szwajcarii, uznając, że jedynie tam będzie ono wystarczająco bezpieczne. Z każdym kolejnym rokiem skala ich działalności była większa, a inni inwestorzy widząc szansę dla siebie, także decydowali się na dołączenie do rynku srebra ze swoim kapitałem, co powodowało stopniowy, ale zarazem znaczny wzrost ceny srebra.

W pewnym momencie, gdy stało się jasne, że znaczna część rynku zdominowana została przez kapitał spekulacyjny, a druga część (kontrolowana przez braci Hunt oraz podmioty z nimi powiązane) kończy się odbiorem fizycznego kruszcu, na giełdzie wybuchała panika. Widać to na wykresie z rysunku 38 (przy czym w tym wypadku wartości są powiększone o inflację), a jeszcze wyraźniej zostało to przedstawione na rysunku 4, gdzie dokładnie można prześledzić moment, w którym rynek srebra nie miał już nic wspólnego z rzeczywistym inwestowaniem, a stał się jedynie miejscem spekulacji, co z kolei doprowadziło do równie szybkiego spadku ceny tego kruszcu. Gdy handel zaczął przybierać niebezpieczne rozmiary i zaczął wymykać się spod kontroli, dwie największe giełdy, na których obracano srebrem – COMEX i CBOT, z obawy przed brakiem możliwości dostarczenia fizycznego kruszcu, zdecydowały się najpierw na podwyższenie depozytów zabezpieczających na kontraktach futures oraz ograniczenie odpowiednio do 3 mln (CBOT)



Rys. 4. Cena srebra w latach 1973–1981

Źródło: XAGUSD 2020

lub 10 mln (COMEX) uncji otwartych pozycji na jednego inwestora, aby w końcu 21 stycznia 1980 zupełnie zawiesić handel (COMEX), zezwalając jedynie na zlecenia zamykania kontraktów (van Winkoop 2012).

W tym czasie cena srebra wzrosła ze wspomnianych 2 dolarów w roku 1973 aż do 50 dolarów w 1980 r. W notowaniach *intraday* odnotowano nawet chwilowo wartość 135 dolarów za uncję tego kruszcu. Zdecydowanie największy wzrost cen miał jednak miejsce pod koniec wspomnianego okresu, bo w latach 1979–1980. Jednak opisane działania giełd towarowych, połączone z decyzją FED*-u, który zdecydował o podniesieniu stóp procentowych z 11 do 20% spowodowały, że bracia Hunt musieli pozbyć się swoich zasobów srebra. To pogłębiło już i tak znaczący spadek notowań tego kruszcu – już wcześniej cena obniżyła się do około 20 USD/oz (także ze względu na zmniejszone zainteresowanie tym metalem przez inwestorów, co doprowadziło do spadku popytu, ale też poprzez wywołaną na tym rynku nadpodaż spowodowaną przez nadprodukcję z kopalni oraz pochodzącą z rynku wtórnego oraz recyklingu), a w tzw. Srebrny Czwartek cena spadła do zaledwie 10 dolarów. Rynek srebra się załamał. Po chwilowym odbiciu i wzroście do kilkunastu dolarów, w następnych latach cena tego kruszcu spadła ponownie poniżej dziesięciu dolarów, utrzymując się w tych granicach przez kolejne 20 lat. Bracia Hunt ogłosili bankructwo, tracąc miliardy dolarów i praktycznie wszystkie dobra, które posiadali (akcje spółek paliwowych, całe srebro, hodowlę koni wyścigowych etc.) – nie tylko te, które zarobili podczas swoich inwestycji, ale też te, które odziedziczyli. Ciąg zdarzeń, jaki miał miejsce w tym wypadku świadczy o tym, że po pierwsze, jedna decyzja może przyczynić się do nieodwracalnych zmian (w tym

* Skrócowa nazwa banku centralnego USA.

przypadku przede wszystkim finansowych), a po drugie, że jeszcze kilkadziesiąt lat temu rynek srebra był na tyle niewielki, że mogła na nim zaistnieć powyższa sytuacja, w której (można w uproszczeniu to przyjąć) nawet inwestor indywidualny mógł wpłynąć spekulacyjnie na cenę tego surowca na całym rynku światowym.

Jak widać, historycznie rynek srebra wielokrotnie doświadczał gwałtownych zmian i zwrotów. Ścisłe uzależnienie od decyzji politycznych, gospodarczych czy też inwestycyjnych doprowadziło ten kruszec w miejsce, w którym znajduje się on obecnie. Należy jednak pamiętać, że srebro jest traktowane i wykorzystywane także jako metal przemysłowy. Taka swoista dwoistość zastosowania tego kruszcu powoduje pewne implikacje, a z całą pewnością komplikuje analizę czynników wpływających na jego cenę, co zostanie w dalszej części tej pracy dokładniej omówione. Poniżej zostanie przeprowadzona próba identyfikacji najważniejszych czynników, które kształtują ceny srebra na światowych rynkach.

4.2. Popyt i podaż na rynku srebra

Upadek systemu z Bretton Woods, a w konsekwencji odejście od wymienialności złota na dolary spowodowały, że charakter obu tych metali szlachetnych diametralnie się zmienił. Złoto jako droższy metal, znajduje obecnie większe zastosowanie w wyrobach jubilerskich, lecz również jako kruszec inwestycyjny oraz tezauryzacyjny (w postaci sztabek, monet, medali), a tylko niewielka jego część znajduje zastosowanie w przemyśle. Zupełnie odmienną rolę spełnia srebro. Ze względu na swoje właściwości fizyczne, chemiczne oraz elektryczne, a jednocześnie stosunkowo niską cenę, znalazło ono szereg zastosowań w przemyśle, który rok rocznie zgłasza ponad połowę całkowitego zapotrzebowania na ten metal. Szczegółowe dane dotyczące kształtowania się podaży i popytu na ten kruszec w latach 2013–2022 przedstawione zostały w tabeli 7.

Analiza danych z tabeli 7 pokazała, że popyt na srebro ze strony przemysłu oscyluje pomiędzy około 440 a 540 milionów uncji (Moz). Jednocześnie zauważyć można znaczący spadek zapotrzebowania na ten metal w fotografii, a zarazem rosnący udział fotowoltaiki w wykorzystaniu tego surowca. Pozostałe zastosowania srebra, tj. inwestycje fizyczne, jubilerstwo oraz produkcja zastaw stołowych, ulegają większym bądź mniejszym fluktuacjom w czasie, zależnym od wielu czynników.

Według raportu Silver Institute, w roku 2021 całkowity popyt na srebro ze strony przemysłu wyniósł 508,2 Moz, z czego najwięcej – bo aż 330 Moz wykorzystano na potrzeby sektora elektronicznego i elektrycznego (World Silver Survey 2022). Jednak takie proporcje nie są zaskoczeniem – srebro, będąc bardzo dobrym przewodnikiem zarówno elektrycznym, jak i cieplnym, znalazło zastosowanie w produkcji wszelkiego rodzaju styków, płytek drukowanych przewodów elektrycznych, klawiatur, układów scalonych, baterii czy też spoiw lutowniczych. Obecnie,

Tabela 7. Zestawienie podaży i popytu na srebro w latach 2013–2022

Wielkość (mln uncji, Moz)	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022P*
Podaż										
Wydobycie	845,3	882,1	896,9	900,0	863,7	850,2	835,9	781,1	822,6	843,2
Recykling	180,3	161,3	147,3	145,9	147,2	148,6	147,7	162,2	173,0	180,5
Podaż netto hedgingu	-	10,7	2,2	-	-	-	15,2	8,5	-	5,0
Oficjalna sprzedaż netto w sektorze	1,7	1,2	1,1	1,1	1,0	1,2	1,0	1,2	1,5	1,5
Łącznie podaż:	1 027,3	1 055,3	1 047,4	1 046,9	1 011,9	1 000,0	999,8	953,0	997,2	1 030,3
Popyt										
Przemysł	449,6	438,9	441,1	475,3	503,6	499,6	498,1	464,9	508,2	539,6
▶ w tym fotowoltaika	50,5	48,4	54,1	93,7	101,8	92,5	98,7	101,0	113,7	127,0
Fotografia	45,8	43,6	41,2	37,8	35,1	33,8	32,7	27,8	28,7	28,4
Jubilerstwo	186,9	192,9	201,7	188,4	195,2	201,9	200,3	149,8	181,4	201,8
Srebro stołowe	46,5	53,6	57,9	53,9	59,6	67,6	62,1	32,4	42,7	52,7
Inwestycje fizyczne netto	300,6	283,1	310,4	212,0	155,7	165,2	186,8	205,0	278,7	279,2
Popyt netto hedgingu	29,3	-	-	12,0	2,1	7,7	-	-	9,4	-
Łącznie popyt:	1058,7	1012,0	1 052,3	979,4	951,3	975,7	980,0	880,0	1 049,0	1 101,8

P* – prognoza.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: World Silver Survey 2022.

zakres zastosowania przemysłowego tego kruszcu obejmuje praktycznie każdą gałąź – elektroniczną (w tym m.in. w telefonach komórkowych, komputerach, sprzęcie audio i wideo), elektryczną, motoryzacyjną itd. Jest także wykorzystywany do produkcji części i podzespołów mechanicznych, w procesach chemicznych, a nawet w medycynie.

Popyt na srebro przemysłowe w połączeniu z popytem inwestycyjnym oraz popytem użytkowym – ze strony jubilerstwa, fotografii czy też wytwarzania tzw. srebra stołowego – powodują, że przy gwałtownym wzroście zapotrzebowania przez sektor fotowoltaiczny, może nie być on w pełni zaspokojony. Przewaga popytu nad podażą bez wątpienia doprowadzi do wzrostu ceny tego surowca, tym samym zwiększając koszt wytwarzania paneli PV i doprowadzając do spowolnienia rozwoju tego typu OZE na całym świecie.

Rozpatrując kwestię zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania ze strony fotowoltaiki, niezbędna jest również analiza podaży na globalnym rynku tego surowca, z uwzględnieniem najważniejszych czynników, wpływających na kształtowanie się tych wielkości – popytu i podaży.

Generalnie ujmując, pochodzenie srebra podzielić można na dwa rodzaje:

- pierwotne;
- wtórne.

W pierwszym przypadku głównym źródłem tego kruszcu jest jego wydobycie (wraz z ewentualnym przetwarzaniem), w drugim – recykling. Z uwagi na fakt, że srebro jest stosunkowo drogim surowcem (w porównaniu do chociażby metali nieszlachetnych), a koszt jego wydobycia i przetworzenia kształtuje się na coraz wyższym poziomie, recykling stanowi istotną pozycję w strukturze podaży. W latach 2013–2021 wydobycie wahało się w przedziale około 780–900 Moz, a prognoza na rok 2022 to około 843 Moz. Z kolei recykling w analizowanym okresie to między około 146 a około 180 Moz. Oznacza to, iż zarówno wydobycie, jak i wtórne źródło tego surowca, wahały się w stosunkowo nieznacznym zakresie, maksymalnie odpowiednio o 15% w przypadku wydobycia, oraz o około 20% dla recyklingu. Można więc przyjąć, iż w okresie dziesięciu lat podaż, pochodząca z tych dwóch źródeł, była w przybliżeniu stała. Z kolei udział procentowy recyklingu w całkowitej podaży wahał się w wąskim przedziale, to jest pomiędzy 13,94 a 17,55%.

Niezależnie od powyższego, istotnym aspektem, który należy wziąć pod uwagę, jest także informacja, dotycząca tej części wydobytego do tej pory kruszcu, która może zostać zaklasyfikowana jako zapasy, gdyż w pewnych sytuacjach zasoby takie mogą zostać użyte do uzupełnienia niedoborów tego metalu np. w fotowoltaice. Według raportu Silver Institute z 2018 roku (World Silver Survey 2018) wielkość ta w ciągu 10 lat wzrosła z 1238 Moz w 2008 roku do 2786 Moz w 2018 roku, co odpowiada wzrostowi zaspokojenia pełnego popytu w danym okresie z 14 do 33 miesięcy. Oznacza to, że w szczególnych sytuacjach możliwe jest przesunięcie części wydobytego (i bądź to użytego, bądź w inny sposób zagospodarowanego

już srebra) w celu innego jego zastosowania, jednakże pod warunkiem, że będzie to ekonomicznie uzasadnione. Również kwestia wydobycia jest w tym przypadku kluczowa, bowiem rosnące koszty pozyskiwania kruszcu ze źródeł pierwotnych mogą znacząco wpłynąć na strukturę strony podażowej (np. zwiększając udział srebra z recyklingu).

Podkreślić należy, że istnieje istotna różnica pomiędzy zasobami a rezerwami srebra w skorupie ziemskiej. Zasoby zawierają w sobie zarówno złoża udokumentowane, jak i te nieodkryte obecnie, ale możliwe do oszacowania. Nie jest tu jednakże w żadnym wypadku brana pod uwagę kwestia ekonomiczna, tzn. opłacalność wydobycia danego surowca w celu jego dalszego wykorzystania. Z kolei rezerwy charakteryzują się już uwzględnieniem powyższego wskaźnika, co skutkuje z jednej strony ograniczeniem wskazanych ilości wydobycia do ekonomicznie uzasadnionych, a z drugiej strony implikuje trudności związane z prawidłowym oszacowaniem tych wielkości (Lo Piano i in. 2019). Spowodowane jest to dynamicznie zmieniającymi się czynnikami zewnętrznymi, takimi jak np.: cena rynkowa srebra, koszty technologiczne oraz koszty pracy, wymagania środowiskowo-klimatyczne, sytuacja polityczno-gospodarcza, warunki i wydarzenia geopolityczne, niezawodność łańcuchów dostaw i inne. Dane te są szczególnie trudno weryfikowalne, jeśli uwzględni się fakt, że sama definicja powyższych terminów jest uzależniona między innymi od kraju, którego one dotyczą.

Pozostałe rezerwy tego surowca – wg najnowszych analiz amerykańskiej agencji naukowo-badawczej The United States Geological Survey (USGS) – szacowane są (dane za rok 2021) na 500 000 ton (MCS 2021). Jednakże, dane dotyczące zarówno rezerw, jak i zasobów mogą się różnić od siebie, w zależności od źródła informacji, metody liczenia, a ponadto ulegają naturalnym fluktuacjom w czasie.

4.3. Cena srebra wynikiem wpływu czynników zewnętrznych

Srebro swoją popularność w zastosowaniach przemysłowych zawdzięcza nie tylko właściwościom fizycznym, chemicznym oraz elektrycznym, lecz także stosunkowo niskiej cenie. W przeciwieństwie do innych metali szlachetnych, takich jak złoto, platyna czy pallad, koszt użycia tego kruszcu to ułamek ceny wymienionych wyżej metali. Na rysunku 5 przedstawiono kształtowanie się ceny tego surowca na przestrzeni ostatnich 50 lat, tj. w okresie 1972–2022.

Zauważyć tu można znaczne wahania, oscylujące w przedziale pomiędzy około 2–50 USD/oz. Taki stan rzeczy spowodowany był zarówno naturalnymi procesami podażowo-popytowymi, jak i oddziaływaniem czynników inwestycyjno-spekulacyjnych, także na rynku srebra „papierowego”. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że handel srebrem występującym w formie fizycznej, stanowi obecnie zaledwie niewielką część obrotu tym surowcem. Zdecydowany wpływ na kształtowanie się



Rys. 5. Cena srebra w latach 1972–2022 [USD/oz]

Źródło: Trading View 2022

ceny tego kruszcu (zresztą, podobnie jak innych metali szlachetnych, z grupy inwestycyjnych, np. złota) ma handel instrumentami finansowymi, pozwalającymi inwestorowi uzyskać ekspozycję na srebro. Rynek instrumentów pochodnych, takich jak ETF, CFD oraz innych, pozwalających na inwestycję w srebro w formie niematerialnej, jest znacznie większy niż rynek kruszcu występującego w formie fizycznej.

Warto jednakże podkreślić znaczący wpływ zapotrzebowania ze strony przemysłu na kształtowanie się ceny tego surowca. W okresie zwiększonego popytu związanego z fazą prosperity globalnej koniunktury gospodarczej, jak i w latach intensywnego rozwoju jednej z największych gospodarek świata – Chin, cena kruszcu wzrastała, aby następnie ulec spadkom wraz z fazą spowolnienia gospodarczego i odwróceniem trendu. Tak silne oddziaływanie popytu niezwiązanego bezpośrednio z „tradycyjnym” zastosowaniem – przechowywaniem wartości (tezauryzacją) oraz jubilerstwem, wskazuje na odmienną rolę, jaką pełni obecnie ten surowiec, w porównaniu np. do złota.

Zagadnienie to jest niezwykle istotne, gdyż wskazuje, że zapotrzebowanie ze strony przemysłu obecnie istotnie wpływa na kształtowanie się ceny srebra. To z kolei implikuje konieczność uwzględnienia tej zależności w dalszych badaniach, gdyż istnieje niebezpieczeństwo, że wzrost użycia tego surowca w innych gałęziach przemysłu (np. w motoryzacji, elektronice, telefonii komórkowej etc.) doprowadzi do wzrostu popytu i cen, skutkującego następnie jego ograniczeniem ilościowym

(ze względu na koszt) w sektorach związanych z OZE, w tym między innymi – fotowoltaice. Naturalnie, ograniczając zużycie srebra w konkretnych zastosowaniach lub zastępując je innymi surowcami, wizja niedoboru tego kruszcu może zostać zażegnana.

Jednocześnie, zwrócić należy uwagę na stosunek ceny złota do srebra, tzw. Gold-Silver Ratio (GSR). Zmiana tego wskaźnika odzwierciedla zarówno stan gospodarki w ujęciu globalnym, wskazując przy tym kierunek przepływu kapitału, jak i pośrednio informuje o stanie przemysłu. Na rysunku 6 przedstawiono kształtowanie się tego wskaźnika w okresie 1972–2022.



Rys. 6. Wskaźnik Gold-Silver Ratio w latach 1972–2022

Źródło: Stooq 2022

Widoczny na wykresie przedział GSR (oś pionowa) zmieniał się w przedziale pomiędzy 20 a 115, tzn. każda uncja złota kosztowała wskazaną ilość uncji srebra. Niska wartość tego wskaźnika oznacza przesunięcie kapitału w kierunku inwestycji „agresywnych”, tzn. skierowanych na jego pomnażanie. Taki stan rzeczy odnosi się do okresu ożywienia gospodarczego (dobrej koniunktury w światowej gospodarce), kiedy to w przemyśle używa się znacznych ilości różnych surowców, w tym srebra. Z kolei w czasie recesji (złej koniunktury gospodarczej), inwestycje są przesuwane do bezpiecznych przystani, w tym między innymi – złota. Takie zależności dodatkowo mogą wpłynąć na wielkość udziału tego surowca, zarówno w całym sektorze OZE, jak i w samej fotowoltaice.

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że cena srebra kształtuje się pod wpływem wielu czynników – zarówno rynkowych, jak i pozarynkowych. Oprócz wymienionych powyżej, a związanych bezpośrednio z podażą i popytem, istnieje szereg innych, które mogą w sposób pośredni bądź bezpośredni wpływać na cenę tego metalu. I tak, niewątpliwie, na cenę srebra będzie miał wpływ koszt wydobycia i przetworzenia, a także – w przypadku fizycznego surowca (a z takim mamy do czynienia w przypadku wykorzystania w fotowoltaice) – jego transportem. Koszt wydobycia jest mocno uzależniony od regionu, gdyż jest ściśle związany z takimi kosztami, jak: koszt pracy, opłaty środowiskowe, koszty składowania i transportu etc. Podobnie, także przetwarzanie srebra wiąże się ze znacznymi kosztami, które wynikają ze znacznej energochłonności tego procesu, a także koniecznością zużycia innych surowców w trakcie jego trwania. Także wielkość recyklingu pośrednio wpływa na cenę surowca, gdyż większa ilość srebrnego złomu powoduje zwiększenie podaży tego kruszcu, co teoretycznie może obniżyć jego cenę. Z drugiej strony – wysoka cena srebra pierwotnego może zachęcać do zwiększonego recyklingu, „przesuwając” na rynek wtórny, do ponownego użycia także nie tylko stricte złom (np. z fotografii, czy też elektroniki), ale także srebro pochodzące z innych sektorów, takich jak starsze srebro (zastawy, sztuce) stołowe, czy nawet monety kolekcjonerskie itp. Kolejnym czynnikiem, który może wpłynąć (jednak w pewnym, ograniczonym stopniu) na cenę białego metalu jest cena substytutów, czyli surowców, które mogą zastąpić srebro. Oczywiście, nie jest możliwe całkowite zastąpienie tego metalu innym, ze względu na odmienne właściwości każdego z nich. Jednakże, pod pewnymi warunkami, niewykluczone jest zastosowanie tańszych rozwiązań, które w pewnym stopniu mogą ograniczyć popyt na srebro; szczególnie w przypadku niedoborów tego metalu, bądź jego wysokiej ceny.

Z innych przyczyn, które mogą także mieć wpływ na cenę srebra, należy wymienić czynniki makroekonomiczne; jak już wspomniano wcześniej, koniunktura gospodarcza bezpośrednio przekłada się na popyt, a ten – na cenę srebra. Nie pozostają bez znaczenia też inne czynniki makroekonomiczne pochodzące jak np.:

- polityka monetarna (w szczególności USA, w mniejszym stopniu Chin i UE);
- wskaźnik CPI (*Consumer Price Index*);
- wielkość zatrudnienia (głównie w USA);
- PKB (poszczególnych ważniejszych gospodarek świata);
- sprzedaż detaliczna;
- pozostałe (wielkość inflacji, stóp procentowych, polityka fiskalna, bilans płatniczy itp.) – dotyczące najważniejszych gospodarek świata bądź całych regionów.

Nie można pominąć także faktu, że cena srebra podlega wahaniom z powodu działań inwestycyjnych i spekulacyjnych na rynku srebra. W szczególności dotyczy to obrotu srebrem „papierowym”, tj. za pomocą wszelkiego rodzaju instrumentów pochodnych, które to spekulacje w krótkim czasie mogą w znacznej mierze

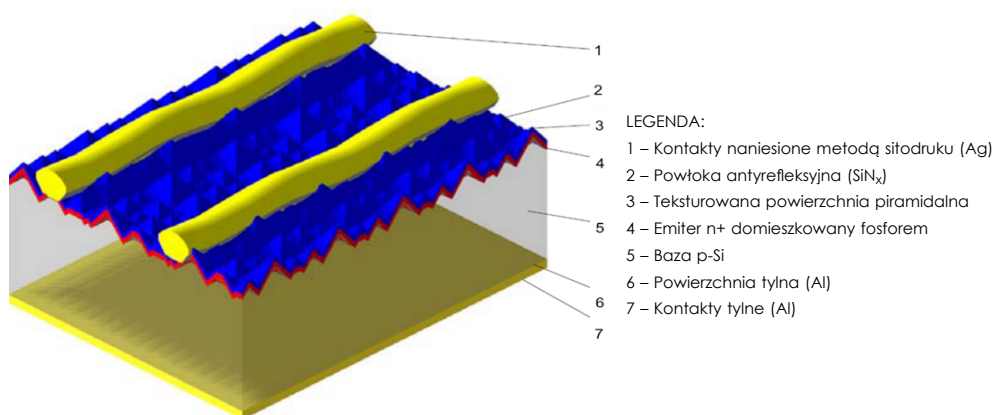
zmieniać cenę tego kruszcu. W przypadku inwestycji w fizyczny metal, widoczne jest zwykle powiązanie wielkości handlu na tym rynku z cyklem koniunkturalnym w gospodarce światowej, gdzie w przypadku recesji, następuje ucieczka do „bezpiecznych przystani” poprzez wycofanie kapitału m.in. z rynków akcji (oraz innych instrumentów finansowych, pozwalających na taką ekspozycję) i przesunięcie go właśnie na rynek metali szlachetnych (złota, srebra, platyny i innych).

Powyższa analiza pokazała, że na cenę srebra, poza tradycyjnymi podażą i popytem, wpływ wywierają zmiany technologiczne, pojawienie się nowych zastosowań, fazy cyklu koniunkturalnego, handel instrumentami finansowymi wystawionymi na ten kruszec szlachetny, jego „powiązania” z innymi surowcami (np. ze złotem) i inne.

W kontekście podjętych badań nasuwają się pytania: Czy i jak wpływa rozwój technologii fotowoltaicznych na rynek srebra? Czy zwiększenie popularności i wykorzystania paneli PV może wywierać wpływ na ten rynek?

5. Wykorzystanie srebra w fotowoltaice

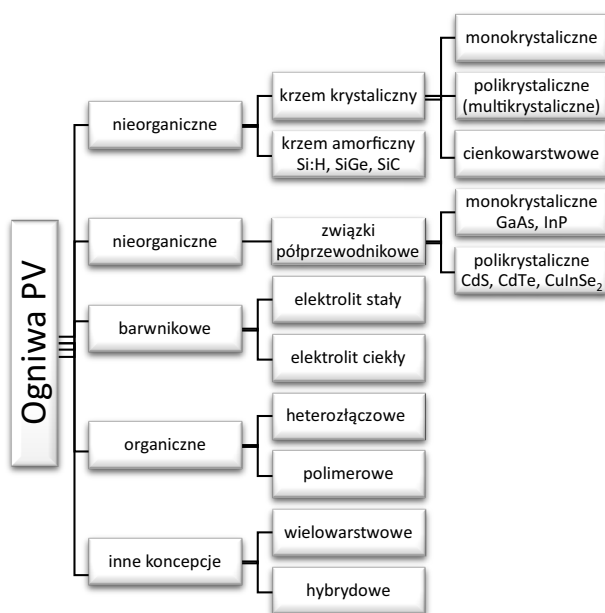
Wykorzystanie srebra w technologiach fotowoltaicznych jest obecnie niezbędne – metal ten stanowi podstawową część paneli PV opartych na krzemie. Ze względu na swoje właściwości – przede wszystkim niewielką rezystancję i znaczną odporność na interakcje chemiczne, metal ten jest powszechnie stosowany do wykonywania styków, połączeń i past przewodzących w technologiach produkcji ogniw PV opartych na krzemie (Kuczyńska-Łażewska i in. 2018). Na rysunku 7



Rys. 7. Budowa typowej komórki krzemowego ogniw fotowoltaicznego
Źródło: opracowanie własne na podstawie: Kuczyńska-Łażewska i in. 2018

przedstawiono budowę typowej komórki typu Al-BSF – jest to obecnie dominująca struktura fizyczna mono- i multikrystalicznych (polikrystalicznych) krzemowych ogniw fotowoltaicznych (Glunz i in. 2012).

Z kolei na rysunku 8 zaprezentowano podział paneli PV ze względu na rodzaj użytego materiału bazowego i jego postać. Oczywiście, jest to jedna z wielu możliwych klasyfikacji; inne uwzględniać mogą odmienne czynniki, jak chociażby generację, do której należy dana technologia wytwarzania ogniwa. Podobnie, powyższy podział nie uwzględnia także niektórych rozwiązań, które w tej chwili są na etapie badań lub ich wykorzystanie pozostaje laboratoryjne, bez możliwości zastosowania komercyjnego. Obecnie, moduły oparte na krzemie posiadają około 95-procentowy udział w całkowitej mocy wytwarzanej energii elektrycznej wśród wszystkich technologii PV (Photovoltaics Report 2022).

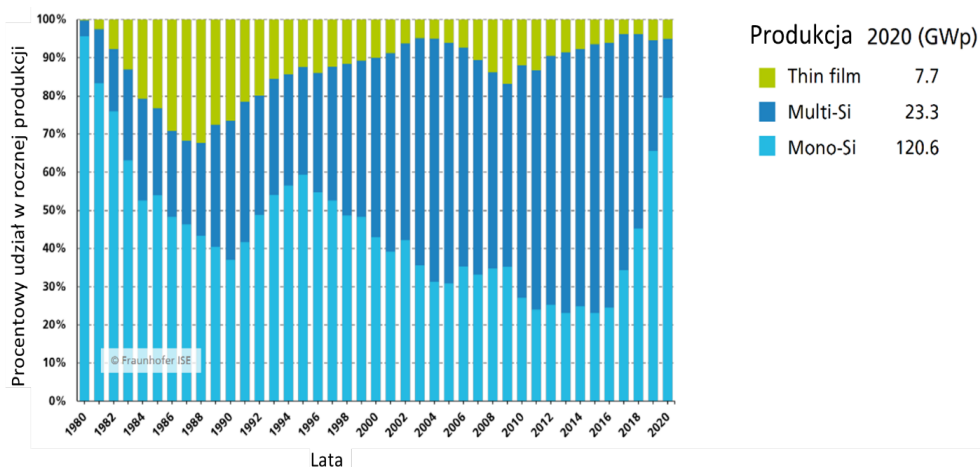


Rys. 8. Grupy materiałów wykorzystywanych w produkcji ogniw fotowoltaicznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Ostrowski 2010

Pomimo pojawiania się nowych rozwiązań i ich sukcesywnego wdrażania, w ciągu ostatnich dwudziestu lat moduły krzemowe generowały średnio około 90% całkowitej produkcji energii (Photovoltaics Report 2022). Na rysunku 9 przedstawiono wykres uwzględniający dane procentowego udziału poszczególnych technologii w latach 1980–2020.

Zasadne wydaje się w takim przypadku przyjęcie założenia, że w najbliższej przyszłości ten rodzaj ogniw będzie dominującym w zastosowaniach komercyj-



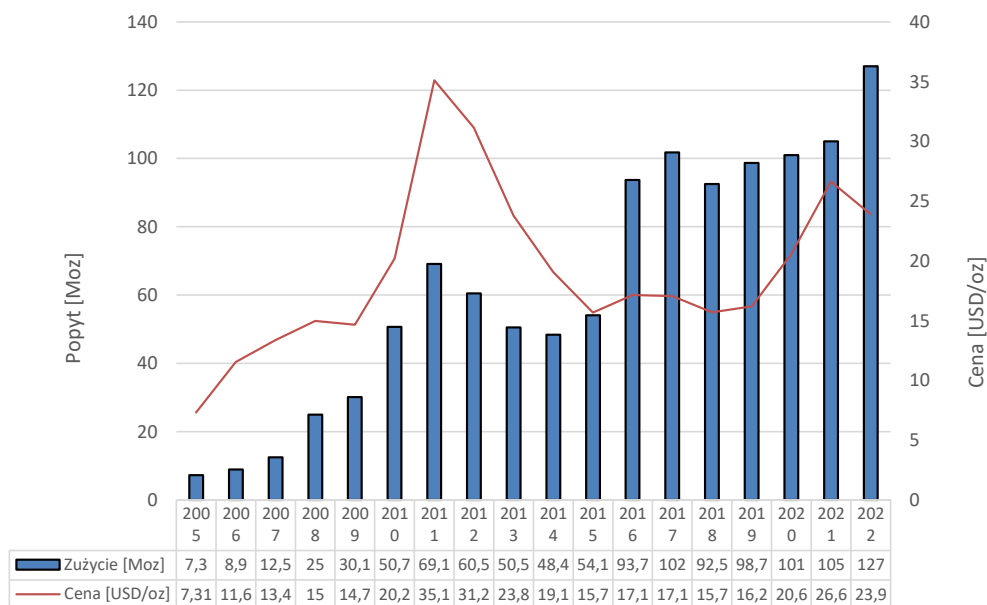
Rys. 9. Procentowy udział głównych technologii PV w rocznej produkcji energii elektrycznej
 Źródło: opracowanie własne na podstawie: Photovoltaics Report 2021

nych, a produkcja paneli fotowoltaicznych będzie opierała się w głównej mierze właśnie na tym typie PV. Szczegółowe założenia dotyczące zmiennych, które będą uwzględnione w naszych badaniach, zostaną przedstawione w części scenariuszowej.

6. Rozwój fotowoltaiki a zużycie srebra

6.1. Zużycie srebra w fotowoltaice

Uwzględniając przyjęte założenia, wydaje się, że rola srebra w fotowoltaice pozostanie kluczową jeszcze w najbliższych dekadach. Stąd tak ważne są badania problemu możliwych ograniczeń w dostępności surowców dla sektora OZE, w naszym przypadku – srebra dla fotowoltaiki. Rozpatrując aspekt wzrostu zużycia oraz dostępności srebra dla sektora PV, konieczne jest uwzględnienie najistotniejszych czynników, wywierających wpływ na rynek tego surowca. W tym celu w pierwszej kolejności należy dokonać analizy danych historycznych, które będą istotnym punktem odniesienia do dalszych badań. W tabeli 7 były podane dane dotyczące m.in. popytu na srebro przez sektor fotowoltaiki w latach 2013–2021 (z prognozą na rok 2022), z kolei na rysunku 10 ukazano kształtowanie się cen oraz zużycia tego kruszcu w technologiach PV w dłuższym okresie, tj. latach 2005–2021 oraz prognozą na 2022 rok.



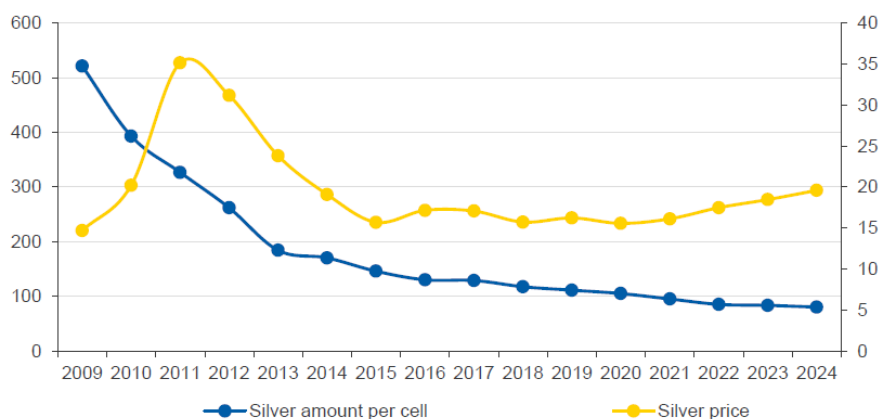
Rys. 10. Kształtowanie się cen oraz popytu na srebro przez sektor fotowoltaiczny w latach 2005–2022

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportów Silver Institute (World Silver Survey 2015, World Silver Survey 2021)

Zauważalne są tutaj dwie tendencje. Pierwsza – w analizowanym okresie nastąpił ogromny przyrost wykorzystania srebra w tej gałęzi OZE – z 7,3 Moz w 2005 roku aż do rekordowych 127 Moz szacowanych na rok 2022. Najbardziej spektakularne wzrosty przypadają wprawdzie na lata 2007–2011, w których odnotowano nawet 100-procentowe skoki zużycia tego metalu w ujęciu rdr (rok do roku), jednak również lata 2015–2016 okazały się pod tym względem równie imponujące. Druga tendencja dotyczy kształtowania się cen w kontekście wzrostu popytu na srebro, lub też odwrotnie – wzrostu popytu w kontekście zmiany cen tego surowca. Istotne jest, że pomimo podwyżki cen z około 7 USD/oz w roku 2005 aż do ponad 35 USD/oz w roku 2011 – co stanowi wzrost o 400%, w tym samym okresie nastąpił blisko 10-krotny przyrost zużycia srebra w sektorze fotowoltaicznym – z ponad 7 Moz w 2005 roku, do ponad 69 Moz w 2011 roku. Oznacza to, że tak istotna zmiana cen tego metalu nie była przeszkodą w jego masowym stosowaniu w panelach PV i kontynuowaniu ogromnego przyspieszenia zapotrzebowania na srebro przez ten sektor. Z drugiej strony, istotnymi i otwartymi kwestiami do dalszych badań są: Jak mogłoby kształtować się wykorzystanie tego surowca w PV w przypadku niższych cen srebra? Czy determinanta ta istotnie wpłynęłaby na ilość wyprodukowanych paneli, czy też znaczenie tego czynnika byłoby pomijalnie małe?

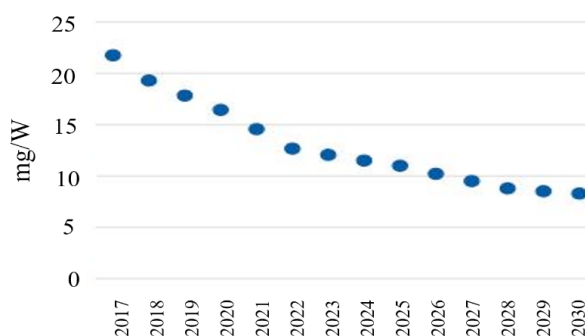
Kształtowanie się zużycia srebra (mg/komórkę ogniwa fotowoltaicznego) w latach 2009–2024 przedstawiono na rysunku 11, przy czym dane za lata 2020–2024 to wielkości prognozowane. Z kolei na rysunku 12 zaprezentowano prognozę użycia tego metalu w przeliczeniu na każdy wat mocy ogniwa PV (mg/W). Na obu wykresach widoczny jest dalszy trend spadkowy, oznaczający ograniczenie ilości użytego srebra, zarówno w przeliczeniu na każde ogniwo fotowoltaiczne, jak i uzyskaną z nich moc (per wat).

Warto zaznaczyć, że nierozstrzygnięta nadal jest kwestia tego, na ile niska cena tego surowca w poprzednich latach wyhamowała ograniczenie jego zużycia w panelach; innymi słowy – na ile wpłynęła na niższą gospodarność tym metalem, mającą bezpośrednie przełożenie na mniejszą oszczędność srebra w tym zastosowaniu. Przykładowo, w latach 2012–2017 tempo tego procesu spadło o połowę



Rys. 11. Zmiany ceny srebra oraz jego zużycia na jedno ogniwo w latach 2009–2024

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Silver's Important Role 2020



Rys. 12. Zużycie srebra w ogniwach fotowoltaicznych w przeliczeniu na wat

Źródło: The Role of Silver 2018

(w porównaniu z okresem 2009–2012, kiedy zawartość srebra w przeciętnym ogniwie fotowoltaicznym spadła niemal o połowę – z 4,0 do 2,5g). Prawdopodobną przyczyną tego spowolnienia w ograniczaniu zużycia surowca we wspomnianym okresie (2012–2017) był fakt, iż cena srebra spadła z 31 do 17 USD za uncję (The Role of Silver), powodując tym samym zmniejszenie intensywności prac nad ograniczeniem zastosowania srebra w ogniwach fotowoltaicznych. Co za tym idzie, można jednocześnie przyjąć, że wyższa cena srebra mogłaby zintensyfikować prace związane z dalszą jego redukcją w PV.

6.2. Zastąpienie srebra w panelach PV

Przeprowadzone w publikacji (Apergis i Apergis 2019) badania wykazują, że istnieje zależność pomiędzy wzrostem popytu na srebro wykorzystywane w fotowoltaice a wzrostem ceny tego surowca. Wykazano w niej dodatnią korelację pomiędzy tymi zmiennymi, co oznacza, że w istocie zmiana ceny tego metalu jest w pewnym stopniu spowodowana zmianami zapotrzebowania na ten kruszec ze strony sektora PV. Taka zależność może być czynnikiem hamującym rozwój fotowoltaiki w przypadku, gdy koszt srebra użytego do produkcji paneli PV, spowodowany zwiększonym popytem na ten produkt, przełoży się na wzrost jego ceny, która będzie nieosiągalna dla masowego konsumenta. Pomimo tego, że poprzednie wzrosty cen kruszcu nie spowodowały wyhamowania produkcji ogniw fotowoltaicznych, nie można mieć pewności, że analogiczna sytuacja powtórzy się w przyszłości.

Z powyższego względu, kolejną kwestią, która w najbliższych latach może mieć ogromne znaczenie w rozwoju OZE jest możliwość bądź to zastąpienia droższych surowców tańszymi odpowiednikami, bądź też ograniczenie zużycia (np. poprzez zwiększenie efektywności czy też będące skutkiem postępu technologicznego etc.) albo też zupełne ich wyeliminowanie (np. spowodowane wprowadzeniem zupełnie nowych technologii). W takim wypadku przewyżczenie ograniczeń związanych z dostępnością srebra może przyczynić się do wprowadzenia tej technologii na szeroką skalę, w zakresie wielu terawatów produkowanej energii elektrycznej (García-Olivares 2015).

W innej pracy (Tous 2014) opisano możliwość zastosowania alternatywnych rozwiązań, takich jak na przykład miedziowo-niklowa metalizacja przedniego styku ogniw w celu eliminacji kosztownego srebra. To pozwoliłoby na redukcję kosztów wytwarzania panelu PV, a przy tym zmniejszyło niebezpieczeństwo spadku produkcji tego rodzaju OZE, związanym z ograniczeniem dostępności srebra, możliwego do użycia w fotowoltaice. W pracy tej porównano koszty różnych rozwiązań metalizacji czołowej na ogniwo dla styków z nadrukiem Ag lub styków platerowanych (stopy: Ni/Cu/Ag, Ni/Sn oraz srebro w ilościach: 160–80–40 mg/cełę).

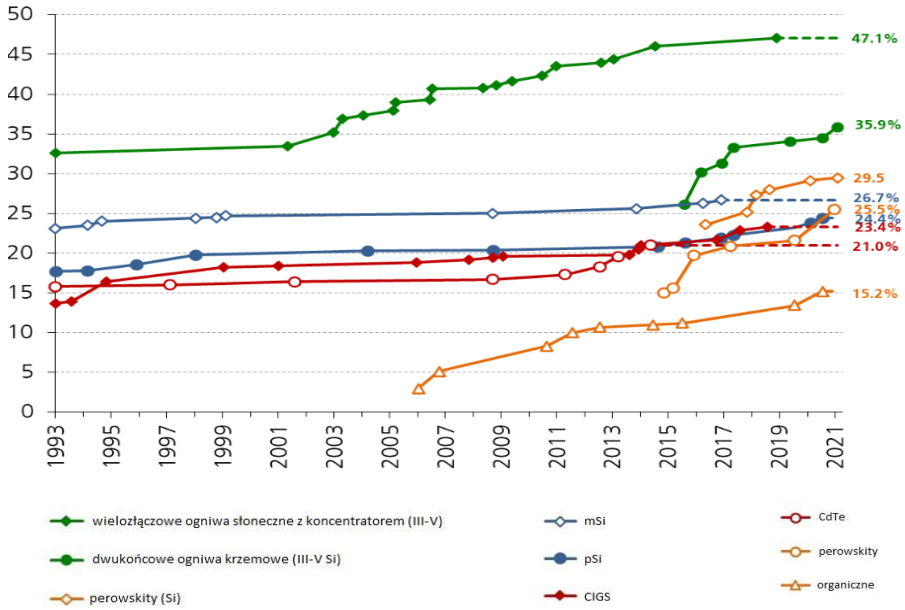
Zastąpienie srebra, jak wykazano we wspomnianej pracy, mogłoby przyczynić się do wymienionych wyżej pożądaných, pozytywnych zmian, jednakże istnieją ograniczenia, które mogą być przeszkodą w masowym wdrażaniu takich, jak i innych, zbliżonych rozwiązań. Wyeliminowanie tego metalu w obecnych rozwiązaniach może okazać się niemożliwe, gdyż istnieją granice, przy których oszczędności poczynione podczas redukcji srebra w ogniwie, generują problemy z jakością panelu, w praktyce oznacza to, że kwestia odejścia od tego surowca przesuwana się w czasie (Lo Piano i in. 2019).

Wykorzystanie w tym celu aluminium bądź miedzi jest ograniczone, gdyż srebro, mając najniższą rezystancję, pozwala na wyprodukowanie ogniw, których straty energetyczne są najniższe. Zastosowanie substytutów powoduje, że oszczędności poczynione w wyniku ich użycia, mogą okazać się zbyt niewielkie, gdyż będzie istniała konieczność zrekompensowania strat energetycznych, poprzez zwiększoną ilość bądź powierzchnię ogniw, co z kolei przełoży się na wzrost całkowitych kosztów produkcji panelu PV. Dodatkowo, inne przeszkody technologiczne, takie jak m.in. zmniejszona przyczepność past przednich zawierających duże ilości miedzi lub aluminium, sprawia, że ogniwa takie są zwykle bardziej zawodne i mają krótszą żywotność. To z kolei oznacza, że wdrożenie ich na masową skalę (użycie komercyjne), może być problematyczne i nigdy nie nastąpi, gdyż rynek oczekuje tak kompaktowych, jak i wydajnych paneli słonecznych. Pomimo że pełna eliminacja srebra jest mało prawdopodobna, to nadal wdrażane są nowe rozwiązania technologiczne, takie jak np. drukowanie podwójne, w którym palce i szyny ogniwa są nanoszone oddzielnie, co pozwala na produkcję szyn zbiorczych pastą o niższej zawartości srebra (Ag), ograniczając jego zużycie (The Role of Silver 2018). Ponadto, mimo zmniejszenia w ostatnich latach szerokości szyny zbiorczej i palca (elektrod ogniwa PV) z około 100 μm do średnio 30 μm , oczekuje się, że do roku 2025 wartość ta jeszcze spadnie, osiągając próg zaledwie 20 μm (World Silver Survey 2021).

6.3. Efektywność ogniw PV

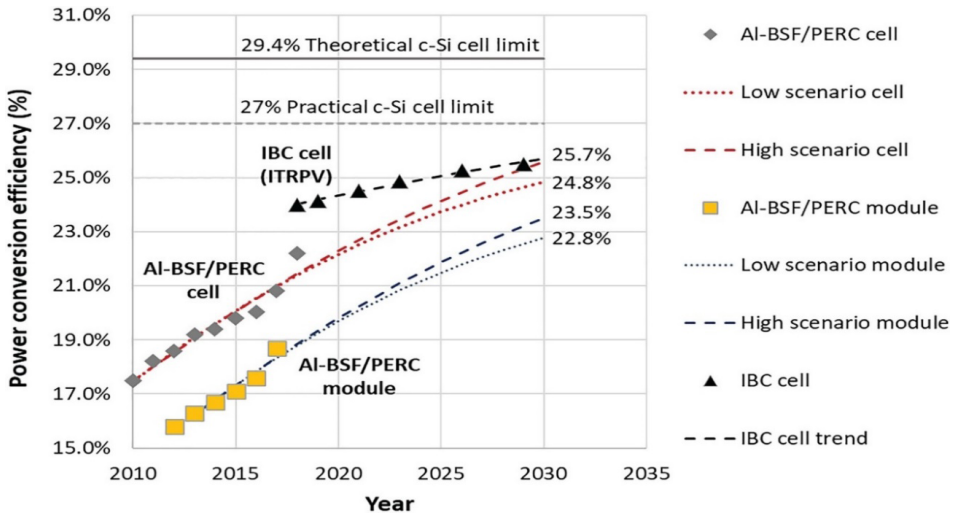
Kolejną istotną kwestią, którą należy uwzględnić, są zmiany dotyczące efektywności konkretnych rozwiązań ogniw PV. Zwiększenie tego parametru pozwoli na ograniczenie ilości użytych paneli, tj. zmniejszenie ich powierzchni, przy osiągnięciu takiej samej sprawności energetycznej. To z kolei ograniczy ilość surowców, użytych do ich produkcji. Obecnie, najnowsze rozwiązania pozwalają na osiągnięcie nawet blisko 50-procentowej sprawności. Na poniższym wykresie (rys. 13) przedstawiono zmiany tego parametru w latach 1993–2021 z podziałem na konkretne technologie.

Należy jednak podkreślić, że dotyczy to najwydajniejszych rozwiązań laboratoryjnych (niewdrożonych na danym etapie do masowej produkcji), co oznacza,



Rys. 13. Maksymalna sprawność ogniw PV uzyskana laboratoryjnie (1993–2021)

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Photovoltaics Report 2022



Rys. 14. Maksymalna sprawność komercyjnych ogniw PV opartych na krzemie (2010–2030)

Źródło: Oberbeck i in. 2020

że mimo uzyskania takich wyników, praktyczne, komercyjne ich wykorzystanie nie zawsze będzie możliwe bądź opłacalne. Istotniejsze w tym wypadku są dane dotyczące rozwiązań stosowanych na szeroką skalę, tj. będących wiodącymi technologiami, wykorzystywanymi w przemysłowej produkcji paneli fotowoltaicznych, dostępnych ogólnie na globalnych rynkach. Tu, zarówno obecnie, jak i w przeszłości, dominujące rozwiązania oparto na krzemie. To oznacza ograniczenia związane z maksymalną sprawnością takich ogniw, których teoretyczna wartość zbliżona jest do 30%, w praktyce jednak szacowana na około 27% (Oberbeck i in. 2020). Przedstawia to wykres na rysunku 14, na którym zobrazowano wykorzystywane obecnie rozwiązania (w latach 2010–2020), jak też ekstrapolowano trend na kolejne 10 lat, tj. na okres 2020–2030. Na podstawie tych danych założyć można, że pozostając przy technologiach opartych na krzemie, zwiększenie efektywności nie wpłynie na zmniejszenie ilości użytych surowców, w tym srebra.

Jest to o tyle istotna informacja, że zakłada ograniczoną możliwość dalszego zmniejszania zużycia srebra, w przypadku pozostania przy technologiach krzemowych i ich dalszego rozwijania. Dopiero przyjęcie innych rozwiązań mogłoby znacząco to zmienić, jak jednak wskazują obecne dane (Photovoltaics Report 2022) oraz prognozy (Lo Piano i in. 2019), taka zmiana na skalę masową nie wydaje się kwestią najbliższej przyszłości (Taylor i Jäger-Waldau 2020). Z powyższych względów, zasadne wydaje się rozważenie możliwości uzupełnienia ewentualnego zwiększonego zapotrzebowania na srebro (a być może nawet i jego niedoborów), z innych źródeł niż pierwotne, w tym np. z recyklingu użytkowanych obecnie paneli fotowoltaicznych.

7. Recykling paneli PV źródłem srebra wtórnego

Okres przewidywanego użytkowania paneli PV to 20–30 lat, co oznacza, że obecnie i w ciągu najbliższej dekady do odzysku, recyklingu lub unieszkodliwiania będą trafiać głównie moduły wyprodukowane w latach 2000–2010. Jest to okres, w którym odnotowano istotny wzrost zużycia srebra przez ten sektor, związany z jednej strony z dużym przyrostem zainstalowanych mocy PV, ale z drugiej – stosunkowo sporymi ilościami srebra, przypadającymi na każdy panel. Ponieważ problem odpowiedniego (i odpowiedzialnego) zagospodarowania zużytych instalacji PV stale rośnie, obecnie istnieje także wiele badań związanych z tym zagadnieniem. Znaczna liczba publikacji została poświęcona możliwości odzyskania użytych do ich produkcji surowców, ze szczególnym uwzględnieniem tych, których recykling jest najbardziej opłacalny lub też może być niezbędny, bądź to z wymienionych powodów, tzn. potencjalnych niedoborów tychże surowców, bądź też z innych względów, np. środowiskowych

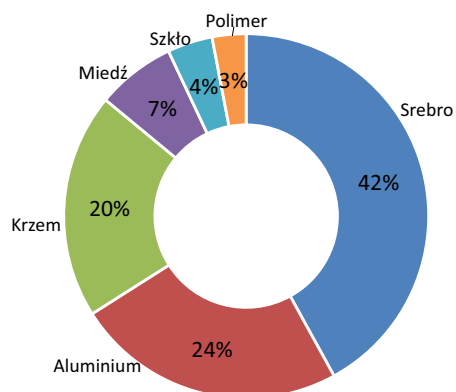
czy społecznych (Wade i in. 2017) (inną opcją jest też regeneracja zużytych paneli (Deng i in. 2020)). W pracach (Monteiro Lunardi i in. 2017; Markert i in. 2020; Ostrowski 2020; Granata i in. 2014; Chowdhury i in. 2020) dokonano analizy technik i technologii, które mogą być użyte w tym celu, jak również przedstawiono szacunkowe wartości, dotyczące stopnia odzysku poszczególnych surowców, bądź elementów panelu. W zależności od przyjętych założeń oraz rozwiązań, wydaje się, że osiągalne jest odzyskanie nawet 95% użytego do produkcji srebra, co oznacza uzysk około 500 g tego metalu z każdej tony „złomu fotowoltaicznego” (Latunussa 2016a). Jakkolwiek udział procentowy srebra w całym panelu jest stosunkowo niewielki (tab. 8) należy podkreślić jednak, że surowiec ten stanowić może nawet połowę jego wartości. W tabeli 8 podano skład masowy poszczególnych komponentów w przeliczeniu na kilogramy danego składnika z każdej tony odpadów zużytych paneli PV. Takie wielkości oznaczają, że z każdej tony zrecyklingowanych paneli PV potencjalnie możliwe jest odzyskanie m.in.: aluminium (182,65 kg), metaliczny krzem (34,68 kg), miedź (4,38 kg), srebro (0,5 kg) (Mathur i in. 2020).

Tabela 8. Skład masowy 1000 kg odpadów fotowoltaicznych

Komponent	Ilość	j.m.	Udział [%]
Szkło (zawierające antymon; 0,01–1%/kg szkła)	700,00	kg	70,000
Rama panelu (wykonana z aluminium)	180,00	kg	18,000
Warstwa laminacji (na bazie polimeru – EVA)	51,00	kg	5,100
Ogniwo (zawierające metaliczny krzem)	36,50	kg	3,650
Warstwa tylna (na bazie polifluorku winylu)	15,00	kg	1,500
Kable (zawierające miedź i polimery)	10,00	kg	1,000
Przewody wewnętrzny (aluminium)	5,30	kg	0,530
Przewody wewnętrzny (miedź)	1,14	kg	0,114
Srebro	0,53	kg	0,053
Pozostałe metale (np. cyna, ołów)	0,53	kg	0,053
Łącznie	1 000,00	kg	100,000

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Latunussa 2016b.

Na rysunku 15 zaprezentowano teoretyczną wartość materiałów, które stanowią skład panelu. Dane te jednak dotyczą ogniw produkowanych w ostatnich latach (2019–2020). Przyjęto dla nich wielkość użytego srebra na poziomie 87 mg dla przednich styków oraz 25 mg – dla tylnych, przypadających na jedną komórkę, podczas gdy w roku 2016 wartości te wynosiły odpowiednio 117 i 32 mg (L’Ecluse



Rys. 15. Teoretyczna wartość surowców możliwych do recyklingu z krzemowego panelu PV wyprodukowanego w roku 2019

Źródło: opracowanie własne na podstawie: L'Ecluse i Attwood 2020

i Attwood 2020). To z kolei oznacza, że wartość srebra użytego we wcześniejszych ogniwach jest odpowiednio większa – podczas gdy dla obecnych jest to około 42%, to już dla pochodzących z roku 2016 – około 47% wartości całego panelu (IRENA 2016). Z tego względu, rozpatrując lata wcześniejsze, należałoby uwzględnić adekwatnie większe ilości tego metalu – przykładowo, w roku 2009 na jedną komórkę zużywało się aż 521 mg srebra (por. rys. 7); w tym wypadku jednak trzeba spojrzeć na te dane w kontekście wielkości ówczesnego rynku, tj. ilości wyprodukowanych w danym okresie paneli – dopiero mnożąc obie wartości można oszacować rzeczywisty potencjał recyklingu srebra.

Srebro jednak jest tylko jednym z wielu składników, które można odzyskać i wykorzystać ponownie. Należy dodać, że oprócz rozwoju fotowoltaiki w zakresie ilości użytych surowców – w tym srebra – (zarówno w przeliczeniu na panel, metr kwadratowy modułu, czy też uzyskaną kilowatogodzinę), która dokonywała się od momentu pojawienia się tego rodzaju OZE, drugim istotnym w przypadku recyklingu współczynnikiem, jest możliwy stopień odzysku. Wyrażany jest on jako stosunek (wartość procentowa) ilości użytego danego surowca i jego ponownego wykorzystania, poprzez proces recyklingu. W typowym module PV mogą znajdować się takie metale jak (dane w kg/kWp*): Cu 0,37; Ag 0,14; Sn 0,12; Pb 0,12 – przy czym stopień odzysku szacowany jest różnie w zależności od użytych technologii i przykładowo wynosi nawet 100% dla aluminium (Granata i in. 2014), podczas gdy dla srebra są to wartości w zakresie 90–99,98%. Zaznaczyć jednak należy, że dotyczy to procesów, które pozostają na etapie badań laboratoryjnych i są bardziej

* kWp – kilowatopik; maksymalna moc panelu fotowoltaicznego, uzyskiwana w standardowych warunkach testowych (STC – Standard Test Conditions) tj.: nasłonecznienie = 100W/m², temp. modułu +25°C, widmo słoneczne AM = 1,5.

efektywne; w rozwiązaniach technologicznych używanych przemysłowo, obecnie te wartości pozostają na niższym poziomie (Kuczyńska-Łażewska i in. 2014).

Możliwość ponownego użycia surowców, które zostały już wykorzystane w modułach PV, a których cykl życia dobiega końca, wydaje się szczególnie istotny, z punktu widzenia zwiększonego zainteresowania zarówno społeczeństwa, jak i decydentów zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), tym bardziej, że z każdym kolejnym rokiem będzie przybywało „złomu fotowoltaicznego”, w którym stosowano znaczne ilości cennych metali.

8. Czynniki wpływu na rynek srebra

Podsumowując przeprowadzone badania, zasadne wydaje się uporządkowanie wszystkich wymienionych wyżej czynników, wywierających wpływ na globalny rynek srebra, co może mieć bezpośredni wpływ na produkcję i rozpowszechnianie się na szeroką skalę instalacji PV. Kluczowe (zdaniem autorów) czynniki zestawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Kluczowe czynniki wpływu na globalny rynek srebra

Czynnik	Działanie
Światowe zapotrzebowanie na energię	Jest to najistotniejszy czynnik związany z kształtowaniem się globalnego rynku energetycznego. W konsekwencji oznacza to, że ma on bezpośredni wpływ na wielkość instalacji energetycznych, w tym z odnawialnych źródeł energii, między innymi takich jak fotowoltaiki.
Rozwój odnawialnych źródeł energii	Przyszłość OZE to kolejna determinanta, która w bezpośredni sposób wpłynie na wykorzystanie srebra; nie tylko w fotowoltaice, ale także w pozostałych rodzajach „zielonej energii”.
Udział fotowoltaiki w OZE i całkowitej produkcji energii elektrycznej	To właśnie ten czynnik będzie najbardziej kształtował rynek srebra w rozpatrywanym zakresie. Zarówno udział PV w OZE, jak i w całkowitej produkcji energii elektrycznej w sposób naturalny przełoży się na ilość srebra użytego w tym zastosowaniu. To z kolei będzie wpływało na kształtowanie się popytu ze strony sektora fotowoltaicznego, co – jak wykazano, stanowi znaczącą część całego rynku srebra.
Intensywność srebra w ogniwach PV	Stopień intensywności srebra, wyrażany jako wielkość użytego srebra w tym zastosowaniu, będzie miał duży wpływ na ilość srebra niezbędnego do zaspokojenia popytu przez branżę fotowoltaiczną. Kolejne zmniejszenie tej wartości (wyrażanej np. poprzez gram Ag na każdy wat uzyskanej mocy) przyczyni się do zmniejszenia ogólnego zapotrzebowania na srebro przez sektor PV, przy założeniu, że pozostałe parametry, pozostaną bez zmian. Analogicznie, mniejsza intensywność użytego surowca pozwoli na wyprodukowanie większej liczby modułów fotowoltaicznych, tj. uzyskanie większej mocy, przy zużyciu tej samej ilości srebra.

Czynnik	Działanie
Substytuty i ich cena	Możliwość wykorzystania innych surowców, zamiennie do srebra, także w istotny sposób może wpłynąć na rynek srebra użytego w sektorze PV. Ograniczeniem w tym wypadku może być jakość danego substytutu (jego parametry) oraz cena. Tylko w przypadku, kiedy zastosowanie takiego rozwiązania będzie opłacalne, może przyczynić się do zastąpienia srebra w tej dziedzinie.
Cena srebra	Oczywisty i bezsporny czynnik kształtujący popyt na ten metal w omawianym zakresie. Wyższa cena srebra może przełożyć się na mniejszą ilość wyprodukowanych modułów fotowoltaicznych, ze względu na zmniejszony popyt, spowodowany wyższą ceną. Analogicznie – niższa cena srebra może spowodować zwiększone zainteresowanie tym rodzajem OZE. Dodatkowo, wyższa cena tego surowca może zintensyfikować prace nad jego ograniczeniem w PV, z kolei niższa – utrzymać obecną ilość.
Zapotrzebowanie na srebro z pozostałych sektorów	Sektor PV jest jednym z wielu, w którym używane jest srebro. Przemysł elektroniczny i elektryczny, motoryzacyjny, ale także jubilerstwo, fotografia, mennictwo, czy też wszystkie inwestycje w fizyczny metal powodują, że podaż na rynku srebra musi zaspokoić popyt całkowity ze wszystkich tych sektorów.
Recykling	Srebro może być wielokrotnie, praktycznie bezstratnie poddawane recyklingowi i ponownie wykorzystane. Oznacza to, że może zostać wykorzystane w branży fotowoltaicznej z innych źródeł, pochodzących np. ze złomu elektronicznego, AGD, fotografii, czy nawet paneli PV, których cykl życia dobiegł końca.
Rozwój technologii związanych z fotowoltaiką	Nowoczesne rozwiązania mogą istotnie wpłynąć na rynek srebra w fotowoltaice. Z jednej strony, mogą oznaczać ograniczenie użycia tego metalu poprzez bardziej wyrafinowane procesy, związane z nowszymi technologiami produkcji, z drugiej – mogą diametralnie zmienić rodzaj użytych surowców, łącznie z całkowitą rezygnacją ze srebra.
Wielkość zasobów/rezerw	Wielkość zasobów oraz rezerw bezpośrednio wpływa w dłuższym okresie na cenę srebra, a która to z kolei kształtować może popyt ze strony sektora PV.
Możliwość pozyskania srebra z innych sektorów	Możliwość „przesunięcia” srebra z innych gałęzi, w których wykorzystywany jest ten surowiec, do fotowoltaiki może znacząco wpłynąć na kształtowanie się tego rynku. Obecnie, w coraz mniejszym stopniu używane jest ono w fotografii, co oznacza, że zwiększone zapotrzebowanie ze strony sektora PV w coraz mniejszym stopniu może być kompensowane z tego źródła. Jednak, obecnie srebro nadal jest traktowane w czasie recesji jako kruszec inwestycyjny, co oznacza, że w przypadku dobrej koniunktury gospodarczej, może on zostać „przesunięty” i wykorzystany w sektorze fotowoltaicznym.
Koniunktura globalna i regionalna	Istotnym czynnikiem, wpływającym na rynek srebra, jest także szeroko rozumiana koniunktura gospodarcza – zarówno światowa, jak i także regionalna. Zmniejszony popyt na surowiec oznaczać może niższą cenę, która z kolei może spowodować obniżenie kosztów produkcji, tj. niższą cenę, wskutek czego zwiększy się rynek fotowoltaiki.
Industrializacja i urbanizacja	Im większy stopień industrializacji i urbanizacji, tym większe staje się zapotrzebowanie na ten surowiec. Jest to naturalny proces, spowodowany wzrostem popytu ze strony między innymi przemysłu, jak i gałęzi pochodnych, niezbędnych do jego funkcjonowania. Bardziej zurbanizowany region wykazuje zwiększoną chłonność wszelkiego rodzaju surowców, w tym też srebra.

Czynnik	Działanie
Koszt wydobycia i przetwarzania rudy srebra	Koszt wydobycia oraz przetwarzania rudy srebra stanowi istotną część końcowej ceny gotowego surowca. Ze względu na znaczną energo- oraz pracochłonność tego procesu, końcowa cena srebra przeznaczonego do dalszego wykorzystania może znacząco się wahać w zależności od regionu, czasu oraz innych czynników, takich jak np. koszt pracy, stan gospodarki światowej, uwarunkowania środowiskowe i inne. To z kolei w efekcie końcowym wpływa na wielkość podaży tego metalu.
Ceny paliw	Cena paliw bezpośrednio wpływa na koszt transportu, który stanowi istotną część końcowej ceny fizycznego surowca. Jak wskazano powyżej, to z kolei silnie determinuje wielkość popytu na ten metal.
Utworzenie lub przerwanie dotychczasowych łańcuchów dostaw	Jak wskazują doświadczenia, związane z przerwaniem łańcucha dostaw w trakcie i po pandemii COVID-19, jego zachwianie potrafi drastycznie wpłynąć na rynek każdego surowca, w tym także srebra. To z kolei może spowodować ograniczenia, między innymi w produkcji, ze względu na brak możliwości zapewnienia w odpowiednim czasie dostępu do tego metalu z innych źródeł (np. krajowych).
Sytuacja geopolityczna	Na każdy surowiec, który jest importowany, wpływ ma także sytuacja geopolityczna – zarówno w danym regionie (zwykle oddziaływanie bezpośrednie, silniejsze, szczególnie w krótszym okresie), jak i w ujęciu globalnym (zwykle słabsze, jednakże implikujące znaczne zmiany w dłuższym okresie). Dostawy danego surowca, w tym także srebra, mogą być źródłem nacisku militarnego, politycznego, gospodarczego i ekonomicznego przez kraj je eksportujący, wywołując zagrożenia związane z ograniczeniem dostaw lub nawet całkowitym ich zaprzestaniem.
Zachowania teauzaryzacyjne inwestorów	Istotnym odbiorcą na rynku srebra są inwestorzy, którzy kupują ten metal w celach teauzaryzacyjnych. Jak wskazano wcześniej, w zależności od fazy cyklu koniunkturalnego, różne są zachowania inwestorów, które w efekcie końcowym mogą wywierać znaczący wpływ na kształtowanie się tego rynku.
Zachowania spekulacyjne inwestorów	Podobnie, jak w przypadku zakupu tego metalu w celach inwestycyjnych i teauzaryzacyjnych, podobny wpływ mają zachowania spekulacyjne inwestorów, które to dotyczyć mogą zarówno srebra fizycznego, jak i wszelkich instrumentów finansowych, dających ekspozycję na srebro. W pierwszym przypadku ma to bezpośredni wpływ na handel srebrem fizycznym, w drugim zaś pośredni, między innymi poprzez oddziaływanie na cenę tego metalu.
Powiązania z cenami innych surowców	Srebro, jako metal szlachetny w znacznej mierze zachowuje się jak metal inwestycyjny – podobnie jak ma to miejsce w przypadku złota, platyny czy palladu. Stąd też widać pewną zależność między tymi kruszcami, w szczególności ma to miejsce w przypadku pary srebro-złoto. Jednakże, należy pamiętać, że srebro jest także metalem przemysłowym, szeroko używanym w niezliczonej ilości zastosowań, takich jak elektronika, energetyka czy motoryzacja. Z tego też powodu widać, że jego cena w pewien sposób jest powiązana z innymi surowcami przemysłowymi, takimi jak miedź czy aluminium, ale także z takimi, które są wykorzystywane szeroko w gospodarce, jak np. ropa naftowa czy gaz ziemny.

Źródło: opracowanie własne.

Jak widać, rynek srebra podlega wszechstronnym i wszechobecnym oddziaływaniom ze strony wielu czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Rola każdego z nich jest bezpośrednio powiązana z kierunkiem i siłą jego oddziaływania. Ze względu na fakt, że podlegają one silnym fluktuacjom w czasie, a jednocześnie część z nich jest trudna do przewidzenia, konieczne jest przyjęcie pewnych założeń i uproszczeń, które pozwolą opracować scenariusze zmian na globalnym rynku srebra w perspektywie kilku dekad.

Część III. Prognoza globalnego popytu na srebro na podstawie scenariuszy energetycznych

9. Scenariusze energetyczne oraz założenia dotyczące udziału fotowoltaiki

Aby prawidłowo oszacować przyszłe zapotrzebowanie na srebro, które zostanie zużyte w procesie produkcji paneli fotowoltaicznych, niezbędne jest sporządzenie takich scenariuszy, które w możliwie najbardziej zbliżony sposób będą prognozowały popyt na ten surowiec. W niniejszym badaniu prognozowany okres obejmuje lata 2020–2050. Ponieważ jest to dość długi okres, należy mieć świadomość, że nawet najbardziej zaawansowane i dokładne scenariusze, obejmujące znaczną liczbę zmiennych branych pod uwagę, mogą okazać się w mniejszym bądź większym stopniu nietrafione. Z tego też powodu, wiele z nich co pewien okres – zwykle kilka lat – są aktualizowane, uwzględniając zmiany, które zaistniały w tym czasie, a mające lub mogące mieć wpływ na sporządzanie kolejnych scenariuszy.

9.1. Scenariusze i ich aktualizacja

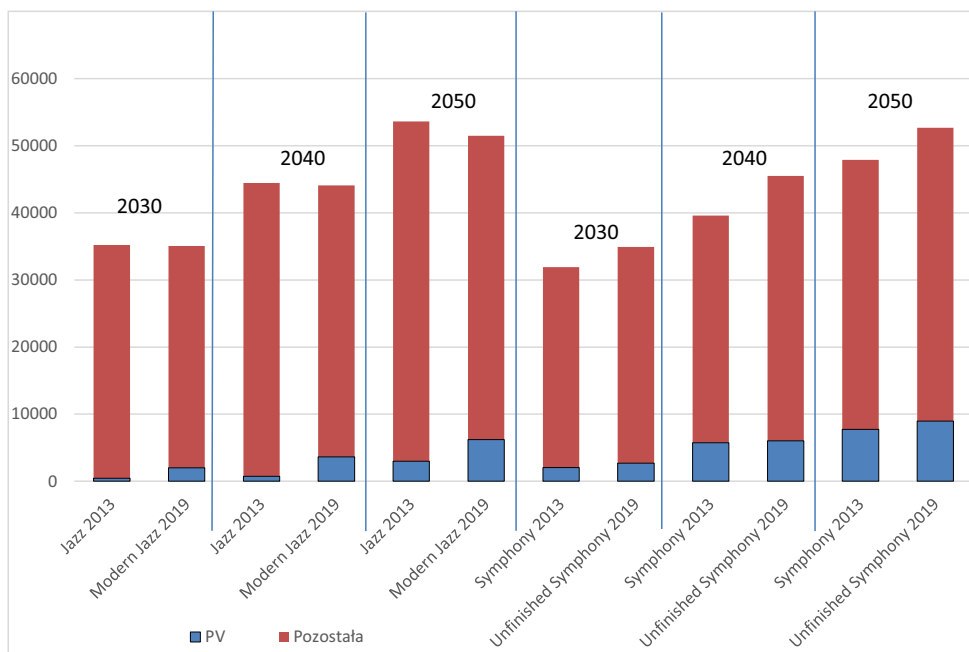
W tabeli 10 przedstawiono przykład takich aktualizacji scenariuszy autorstwa WEC (World Energy Council), które miały miejsce w latach 2013 (WEC 2013) i 2019 (WEC 2019). Widoczne są tutaj znaczne różnice, które pojawiły się w zaprezentowanych scenariuszach, a które to zaszły na przestrzeni kilku lat, dzielących obie publikacje. O ile pomiędzy wartościami globalnej produkcji energii elektrycznej w obu porównywanych scenariuszach, tj. Jazz – Modern Jazz oraz Symphony – Unfinished Symphony maksymalny zakres zmian oscyluje w granicach kilkunastu procent, o tyle różnica w tych częściach scenariuszy, zorientowanych na OZE (na potrzeby niniejszych badań analizowana jest gałąź związana z fotowoltaiką) jest już znacząca.

Najbardziej istotna modyfikacja, uwzględniona w tabeli 10 (i pokazana na rys. 16), związana jest z przemodelowaniem scenariusza Jazz na Modern Jazz w zakresie fotowoltaiki – prognozy na rok 2030 w nowszym opracowaniu przewidyują pozyskiwanie 2000 TWh rocznie z tej gałęzi OZE, podczas gdy wcześniejsze

Tabela 10. Porównanie scenariuszy World Energy Council z roku 2013 i z 2019

Nazwa scenariusza	Prognoza produkcji energii [TWh] na lata		
	2030	2040	2050
Produkcja energii elektrycznej (Jazz, 2013)	35 198	44 453	53 648
Produkcja energii elektrycznej (Modern Jazz, 2019)	35 069	44 085	51 493
Produkcja energii z PV (Jazz, 2013)	462	732	2 979
Produkcja energii z PV (Modern Jazz, 2019)	2 000	3 643	6 195
Produkcja energii elektrycznej (Symphony, 2013)	31 898	39 598	47 917
Produkcja energii elektrycznej (Unfinished Symphony, 2019)	34 930	45 519	52 698
Produkcja energii z PV (Symphony, 2013)	2 054	5 752	7 741
Produkcja energii z PV (Unfinished Symphony, 2019)	2 684	6 038	8 970

Źródło: opracowanie własne na podstawie: WEC 2013, 2019.



Rys 16. Porównanie scenariuszy World Energy Council, pochodzących z roku 2013 oraz 2019

Źródło: opracowanie własne na podstawie: WEC 2013, 2019

zakładały zaledwie 462 TWh. Oznacza to aż ponad czterokrotne zwiększenie tej wartości. Analogicznie, dla roku 2040 założenia to odpowiednio 3643 TWh vs 732 TWh, a dla 2050 – 6195 TWh w nowszym scenariuszu, podczas gdy starszy zakładał tylko 2979 TWh. Tak znaczne różnice pomiędzy tymi scenariuszami mogą wynikać z faktu, że w przeciągu tych kilku lat (od 2013 do 2019 roku) nastąpiło wiele zmian – technologicznych, prawnych, politycznych, czy też związanych z uwarunkowaniami środowiskowo-klimatycznymi, jak i wiele innych, które to finalnie wpłynęły na skokowy wzrost zainteresowania zarówno fotowoltaiką, jak i w szerszym zakresie – całą energią odnawialną w ujęciu globalnym.

Taki stan rzeczy, związany z przeformowywaniem modeli jest naturalny, gdyż należy pamiętać, że musi się on dostosowywać w sposób ciągły do zachodzących zmian i przeobrażeń na świecie. Jest to proces, a nie stan – dodatkowo niezbędne jest uwzględnienie tego, że scenariusze są prognozami; nie mogą one w pełni przewidzieć przyszłości, jednakże pozwalają opisać, jakie warunki są konieczne do spełnienia konkretnych założeń z nimi związanych. Kwestia ta wydaje się niezwykle istotna szczególnie w przypadku tak skomplikowanych zagadnień, jak te związane z przyszłością energetyczną całego świata. Nie sposób w tym kontekście pominąć niezaprzeczalnego faktu, że scenariusze je opisujące, muszą zawierać w sobie ogromną ilość zmiennych, które w tak odległym horyzoncie czasowym mogą ulec znacznym przeobrażeniom, diametralnie zmieniając ostateczny rezultat, co oznacza, że wszystkie uzyskane wyniki mogą być obarczone znacznymi błędami, związanymi z dużą niepewnością realizacji tychże założeń.

Każdy globalny scenariusz energetyczny odzwierciedla zintegrowaną wersję możliwej przyszłości, przewidywanej na podstawie relacji pomiędzy ogromną ilością danych historycznych oraz założeń dotyczących przyszłości. W literaturze przedmiotu dokonano wielu badań, które dostarczają istotnych informacji, związanych z modelami energetycznymi, scenariusze których obejmują szeroki zakres rozmaitych założeń, często o znacznym przekroju, a ich horyzont czasowy obejmuje okres od 20 do nawet 100 lat. Każdy ze scenariuszy zawiera unikatowy zestaw zmiennych, których parametry zawierają się w szerokim zakresie, a każdy z nich może przyjmować różne wagi. Powoduje to pojawienie się ogromnej ilości końcowych rezultatów, skutkując koniecznością wybrania modelu, którego dane wejściowe najbardziej pokrywają się z założeniami, uwzględniając kryteria konkretnego badania. Tak też uczyniono w tym wypadku, posługując się scenariuszami, które wydają się być najbardziej zbliżone do poczynionych wcześniej uwarunkowań z nimi związanych.

9.2. Czynniki uwzględniane w scenariuszach energetycznych

W literaturze naukowej dominuje pogląd, że globalny rynek energii w ostatnich dziesięcioleciach diametralnie się zmienił (Benedict 2017). W publikacjach określa-

jących ścieżki energetyczne na najbliższe dziesięciolecia dokonano identyfikacji głównych sił napędowych, kształtujących rynek energetyczny, jak również przedstawiono najważniejsze założenia dotyczące tych ścieżek (Ghasemian i in. 2020; Pregger i in. 2019). W badaniach tych wyodrębniono między innymi 40 kluczowych czynników globalnego systemu energetycznego, na podstawie ośmiu analizowanych scenariuszy:

- WEC's Hard Rock,
- Modern Jazz,
- Unfinished Symphony,
- Shell's Blueprints & Scramble,
- IEA Bridge,
- BP Energy Outlook,
- ExxonMobil's Outlook for Energy,
- Greenpeace's Energy Revolution.

Poniżej wymienione zostały najważniejsze zidentyfikowane czynniki, mogące mieć wpływ na kształt światowego rynku energetycznego, obejmujące horyzont czasowy do roku 2050, wraz z określeniem przynależności do jednej z pięciu grup deterministycznych, tzn. uwarunkowania: społeczne (S), techniczne (T), gospodarcze (G), środowiskowe (R) oraz polityczne (P).

- Liczba ludności (S);
- PKB (G);
- Ceny energetycznych surowców kopalnych (G);
- Globalna polityka energetyczna (P);
- Zmiana klimatu (R);
- Ceny emisji dwutlenku węgla (G);
- Rozwój technologii odnawialnych źródeł energii (T);
- Zachowania konsumentów (G);
- Relacje i napięcia geopolityczne (P);
- Wydajność siły roboczej (S).

Należy przy tym pamiętać, że większość z tych czynników nie jest prostą zależnością, a zawiera w sobie szereg dodatkowych uwarunkowań, które sumarycznie będą wpływać na końcowe dane, zawarte w scenariuszach. Przykładowo, na liczbę ludności, a więc populację globalną w danym okresie, wpływ będzie miało szereg czynników – trendy demograficzne, starzenie się społeczeństwa, rozwój medycyny wydłużający życie i poprawiający jego jakość, ale także nowe rozwiązania technologiczne zapewniające mniejsze obciążenie pracą fizyczną, czy z drugiej strony – pojawienie się nowych chorób (także związanych z siedzącym trybem życia) oraz rozprzestrzenianie się niebezpiecznych wirusów w skali całego świata (pandemie).

Nie można też pominąć faktu, że jedna zależność ma wpływ na drugą – zmiana (wzrost) PKB w krajach rozwijających się, może spowodować bezpośrednią, jak i pośrednią zmianę w globalnym zużyciu energii. Bezpośrednia dotyczyć może

zwiększonego zapotrzebowania ze względów technicznych (dostęp do urządzeń i rozwiązań, które będą tę energię zużywały), pośrednia z kolei może być uwarunkowana zmianą diety, długości życia etc. Analogicznie, podobne zależności dotyczyć mogą cen energii, uzależnionych między innymi od dostępności nośników energii. Oznacza to, że wpływ na końcową cenę będzie mieć zarówno wielkość wydobycia paliw kopalnych, zasoby i rezerwy, koszty produkcji (w tym związane z zasobami ludzkimi), nowe rozwiązania technologiczne w branży wydobywczej, ale także zmiany klimatyczne, polityczne, środowiskowe, ceny emisji CO₂, czy nawet zachowania konsumentów, wybierających konkretne rozwiązania energetyczne. Z drugiej strony, na cenę energii istotny wpływ będzie miało także wszystko to, co związane jest z OZE, a więc m.in. czynniki takie jak: koszt produkcji danego źródła, koszt wytworzenia 1 kWh, dostęp do tych rozwiązań na masową skalę, zastępowanie nimi tych, które oparto o kopaliny oraz większość determinantów wymienionych przy nieodnawialnych źródłach energii (klimatyczne, polityczne, środowiskowe, społeczne, techniczne czy gospodarcze).

Jak już zostało wspomniane, scenariusze nie są niezmiennie w czasie, ulegają bowiem modyfikacjom (czasami znacznym), w zależności od zmian czynników, które wchodzi w ich skład i podlegają analizie. To z kolei utrudnia przeprowadzenie badań, gdyż generuje konieczność weryfikacji założeń, które uległy modyfikacjom w czasie. Ze względu na ogromną liczbę możliwych zmiennych, które mogą być tutaj badane i wchodzić w skład danego scenariusza, także końcowe wyniki będą prezentować szeroki przekrój danych. Przykładowo, w roku 2000 zostały opublikowane trzy scenariusze, których horyzont czasowy obejmował 100 lat, tj. do roku 2100 (World Energy Assessment 2000). W skład analizowanych czynników wchodziły między innymi:

- populacja;
- produkt światowy brutto;
- produkt światowy brutto jako roczna zmiana procentowa;
- intensywność energii pierwotnej;
- wskaźnik poprawy energochłonności pierwotnej (roczna zmiana procentowa);
- zużycie energii pierwotnej;
- skumulowane zużycie energii pierwotnej z podziałem na źródła:
 - węgiel,
 - ropa naftowa,
 - gaz ziemny,
 - energia jądrowa,
 - hydroenergetyka,
 - biomasa,
 - energia słoneczna,
 - pozostałe;

- redukcja kosztów technologii energetycznej;
- szybkość dyfuzji technologii energetycznej;
- podatki na ochronę środowiska (nie wliczając w to dwutlenku węgla);
- emisje dwutlenku siarki;
- ograniczenia emisji dwutlenku węgla i uwzględnione podatki;
- emisje dwutlenku węgla (netto);
- skumulowane emisje dwutlenku węgla;
- stężenie dwutlenku węgla;
- intensywność węgla;
- inwestycje w sektorze zaopatrzenia w energię.

Jak widać, uwzględniono tu szereg czynników, a każdy scenariusz zakładał określone wartości związane z prognozowanymi zmianami. Przykładowo, założenia dotyczące globalnego zapotrzebowania na energię w 2100 r. zawierają się w przedziale pomiędzy 880 EJ (eksadzuli) a 1859 EJ, z kolei wielkość emisji CO₂ jest szacowana w tym okresie na 2–20 gigaton węgla, co oznacza przyjęcie danych różniących się aż o rząd wielkości pomiędzy scenariuszami. Naturalnie, im odleglejszy jest horyzont czasowy badanego okresu, tym znaczniejsze mogą być różnice zarówno w danych dotyczących założeń, jak i w danych wynikowych, będących rezultatem tychże analiz. Także w publikacji (Pregger i in. 2019) wyszczególniono szereg czynników, które oddziałują na wielkość i kształt globalnego rynku energetycznego w przyszłości. Główne z nich to:

- wzrost populacji,
- zwiększenie PKB,
- zmiany kosztów technologii,
- ewolucja udziałów tradycyjnych metod pozyskiwania energii oraz pochodzącej z OZE,
- zmiany cen paliw kopalnych,
- kształtowanie się energii pochodzącej z OZE,
- koszt emisji CO₂,
- wielkość zapotrzebowania na energię ze strony poszczególnych sektorów (przemysł, gospodarstwa domowe, transport i in.).

W publikacji podkreślono, że wszystkie wymienione determinanty są ważne dla prawidłowego modelowania przyszłych scenariuszy, jednak istnieją istotne różnice pomiędzy nimi. Prognozy dotyczące czynników „ogólnych”, takich jak wielkość populacji, światowe PKB czy też wydajność siły roboczej oraz związane z polityką, odnoszą się tak samo do źródeł tradycyjnych, jak i odnawialnych. Jednak już cena energii z tych dwóch odmiennych gałęzi energetyki będzie miała znaczący wpływ na sam podział rynku. Przykładowo, jeżeli cena emisji dwutlenku węgla ulegnie znacznemu zwiększeniu, będzie to skutkowało podniesieniem ceny energii, pochodzącej z tego źródła (tzn. ze spalania kopaliny). Jeżeli dodatkowo obniży się koszt produkcji urządzeń generujących „zieloną energię”, a w następstwie –

jednostkowy koszt każdej wytworzonej w ten sposób kilowatogodziny, może doprowadzić to do diametralnych zmian, związanych z ich udziałem w globalnej energetyce.

Wymieniony tu przykład jest jednym z wielu możliwych – wszelkie podatki od kopaliny, ograniczenia związane z emisją zanieczyszczeń, wzrost kosztów wydobycia etc. – będą miały zbliżone skutki do wyżej przytoczonych. Z drugiej jednak strony, wszelkie ograniczenia, które mogą pojawić się w przypadku choćby niedoborów surowcowych niezbędnych w OZE, mogą przynieść dokładnie odwrotny skutek, a mianowicie znaczne zwiększenie ceny energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, lub też – zahamowanie przyrostu jej udziału w globalnym rynku.

9.3. Koszty instalacji źródeł energii wyznacznikiem ich wdrażania

Kwestią bezdyskusyjną wydaje się także, że koszt związany z instalacją danego źródła „zielonej energii” będzie istotnym, o ile nie kluczowym czynnikiem w kontekście zwiększonego zainteresowania danym rozwiązaniem. W tabelach 4 i 5 przedstawiono dwa warianty, obejmujące prognozowane koszty inwestycji dla nowych instalacji (do roku 2050) różnych rodzajów elektrowni w Europie (tab. 11) i na świecie (tab. 12), w przeliczeniu na każdy 1 kW mocy.

Z danych przedstawionych w powyższych tabelach wynika, iż koszty nowych instalacji fotowoltaicznych będą znacząco spadać, stając się docelowo najtańszą formą nowych elektrowni. Dotyczy to zarówno instalacji obejmujących tylko Europę, jak i także tych, które uwzględniają cały świat. W przypadku elektrowni węglowych, koszt instalacji szacowany jest aż do końca prognozowanego okresu (do roku 2050), jako wartość stała, na poziomie ponad 2000 USD (wartość dolara dla roku 2015) za każdy kilowat mocy. Inne rodzaje elektrowni to koszt wahający się od 570 USD/kW w przypadku produkcji wodoru, aż do 6460 USD/kW dla elektrowni geotermalnych. Z kolei koszt elektrowni fotowoltaicznych w tym czasie to 470 USD/kW (tab. 11). Powyższa projekcja dotyczy Europy. Jednak, dodatkowo, fotowoltaika może być także w dłuższym okresie najtańszą formą OZE. Projekcja możliwych kosztów nowych instalacji w ujęciu globalnym wskazuje, iż w roku 2050 koszt nowych instalacji elektrowni wiatrowych będzie kształtował się w przedziale 900–1700 euro za kilowat (wartość euro w roku 2010), a PV – od 700 €/kW dla instalacji domowych do zaledwie 300 €/kW w przypadku farm fotowoltaicznych (tab. 12). Oznacza to, iż ze względu na niski koszt nowych uruchomień, fotowoltaika może w dużej mierze zastąpić inne rodzaje energii (pochodzące z nieodnawialnych źródeł), jak również stać się alternatywną dla tych rodzajów OZE, które bądź nie będą konkurencyjne ekonomicznie, bądź też nie będą mogły być zastosowane, ze względu na uwarunkowania.

Tabela 11. Projekcja możliwych kosztów nowych instalacji w latach 2015–2050 (Europa)

Rodzaj instalacji	Koszty [\$2015/kW] w latach				
	2015	2020	2030	2040	2050
Węgiel kogeneracyjny	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
Gaz kogeneracyjny	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
Węgiel brunatny kogeneracyjny	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
Olej kogeneracyjny	1 310	1 290	1 240	1 180	1 130
Elektrownia węglowa	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Generator diesla	900	900	900	900	900
Elektrownia gazowa	670	500	500	500	670
Elektrownia na węgiel brunatny	2 200	2 200	2 200	2 200	2 200
Elektrownia jądrowa	6 600	6 000	5 100	4 500	4 500
Elektrownia olejowa	950	930	890	860	820
Biomasa kogeneracyjna	2 550	2 500	2 450	2 350	2 250
Ogniwo paliwowe	5 000	5 000	2 500	2 500	1 120
Elektrociepłownia geotermalna	13 200	11 190	8 890	7 460	6 460
Elektrownia na biomasę	2 400	2 350	2 300	2 200	2 110
Elektrownia geotermalna	12 340	2 800	2 650	2 500	2 400
Hydro elektrownia	2 650	2 650	2 650	2 650	2 650
Elektrownia energetyczna oceanu	6 950	6 650	4 400	3 100	2 110
Elektrownia fotowoltaiczna	1 300	980	730	560	470
CSP elektrownia	5 700	5 000	3 700	3 050	2 740
Turbina wiatrowa na morzu	4 000	3 690	3 190	2 830	2 610
Turbina wiatrowa na lądzie	1 640	1 580	1 510	1 450	1 400
Produkcja wodoru	1 380	1 220	920	700	570

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Pregger i in. 2019.

Należy pamiętać, że rozwój technologii energetycznych wymaga czasu oraz znacznych nakładów inwestycyjnych. Nie uda się ich poczynić w krótkim okresie oraz nie angażując znacznych środków finansowych. Oznacza to, że z jednej strony koszt ten rozłoży się w czasie, czyniąc go mniej dotkliwym dla wielu krajów, jednak z drugiej strony zapowiada się powolne odchodzenie od paliw kopalnych.

Tabela 12. Projekcja możliwych kosztów nowych instalacji w latach 2030 i 2050 (świat)

Rodzaj instalacji	Koszt inwestycji [€2010/kW] w roku	
	2030	2050
Lądowe elektrownie wiatrowe	900–1 150	900–1 000
Morskie elektrownie wiatrowe	1 350–2 000	1 300–1 700
PV – instalacje domowe	900	700
PV – farmy	500	300
Biogazyfikacja	1 380	1 250
Elektrownia gazowo-parowa	615	590
Elektrownia gazowo-parowa na gaz ziemny	525	500
Ogniwa paliwowe z membraną	640	510

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Pursiheimo i in. 2019.

Dla niektórych państw taka inwestycja może być ogromnym obciążeniem finansowym, a regiony świata o najniższym PKB mogą takich działań w ogóle się nie podjąć.

9.4. Prognozowanie a dostępność danych

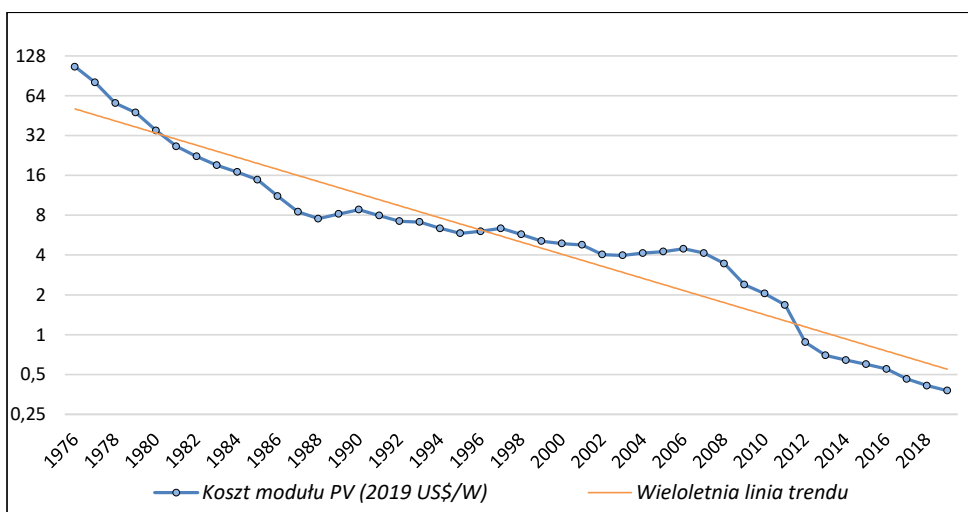
Jeszcze inna kwestia, jaka jest podkreślana przy omawianiu scenariuszu energetycznych to fakt, że dla „tradycyjnych” źródeł energii, ze względu na długoterminowe dane, obejmujące wiele dekad, możliwe jest znacznie dokładniejsze prognozowanie przyszłości. Zarówno w przypadku węgla, jak i gazu ziemnego czy ropy naftowej – dla tych surowców znane są przeszłe i obecne koszty wytworzenia urządzeń, infrastruktury, wydobycia czy też transportu; ze znacznym prawdopodobieństwem – mimo znacznych wahań cen w czasie – można też przewidzieć, jak będą kształtowały się one w przyszłości, lepiej oszacować szanse, zdefiniować zagrożenia.

Dla większości źródeł odnawialnych takich danych nie ma, gdyż okres ich eksploatacji jest zbyt krótki, a zmiany technologiczne zachodzące w tym obszarze są dynamiczne. Szczególnie jest to istotne w przypadku takiej gałęzi jak fotowoltaika, gdzie w ciągu zaledwie kilku dekad, nastąpiły zmiany, które w przypadku tradycyjnych surowców energetycznych nie mogłyby mieć miejsca.

Jak już wcześniej pokazano, nastąpił znaczny postęp technologiczny, skutkujący ogromnym przyrostem efektywności ogniwa PV. Wydajność paneli zarówno z każ-

dego metra kwadratowego powierzchni, jak i wydanego dolara, uległa znacznemu powiększeniu, co pozwoliło na szybki rozwój tej formy OZE, powodując z kolei dynamiczny przyrost produkowanej w ten sposób energii elektrycznej.

Z drugiej strony koszty produkcji paneli fotowoltaicznych sukcesywnie spadają. Wyraźnie widać to na rysunku 17 – jeśli w 1976 r. moduł PV kosztował ponad 100 USD, to w 2019 r. – zaledwie kilkadziesiąt centów za każdy wat zainstalowanej mocy (koszty przeliczone wg wartości USD w roku 2019). Dane za lata 2010–2019, wskazują jednocześnie, że całkowity koszt instalacji PV (moduł, falownik, montaż) uległ znacznemu spadkowi – z 4702 USD w roku 2010 do zaledwie 995 USD w roku 2019 za każdy 1 kW mocy (IRENA 2020).

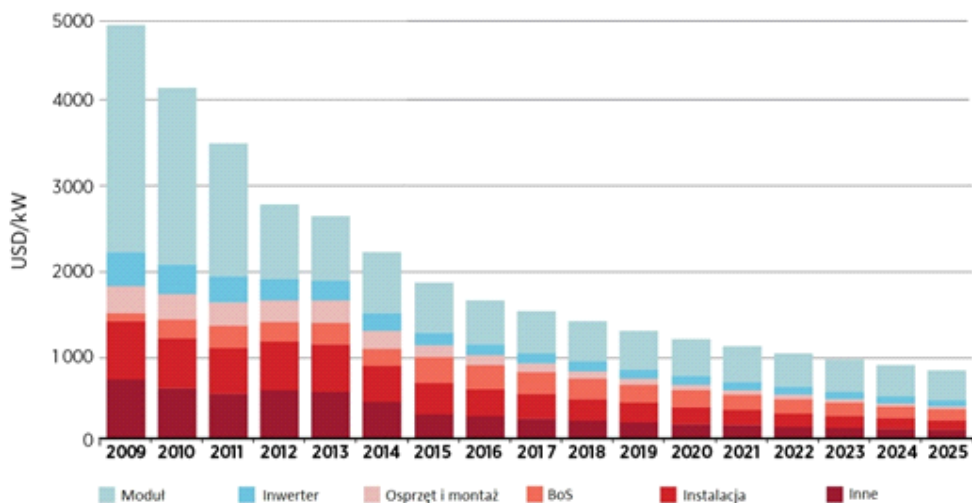


Rys. 17. Koszt modułu PV (2019 US\$/W) w latach 1976–2019

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych: Our World in Data 2022

W tym miejscu należy podkreślić, że istnieje istotna różnica pomiędzy kosztem modułu PV, a kosztem całej instalacji fotowoltaicznej. Udział kosztów poszczególnych elementów w instalacji PV wraz z prognozą do roku 2025 zaprezentowano na rysunku 18. Zauważyć tu można, że spadek ten dotyczy nie tylko samych modułów, ale także inwertera, montażu, pozostałego osprzętu, czy też instalacji, aczkolwiek zarówno w ujęciu nominalnym, jak i procentowym największy udział w tym mają wspomniane panele (jako ogniwa fotowoltaiczne).

W publikacji (Oberbeck i in. 2020) zaprezentowano prognozę dotyczącą cen instalacji PV w 2030 roku, przewidując, że koszt modułu będzie się wahał pomiędzy 0,10 a 0,15 USD/W (wartość dolara dla roku 2019) w scenariuszach umiarkowanych oraz 0,08 USD/W – w scenariuszu „agresywnym”. Z kolei koszt wyprodukowanej



Rys. 18. Udział poszczególnych kosztów w instalacji PV
 Źródło: opracowanie własne na podstawie: IRENA

kilowatogodziny energii elektrycznej wyniesie dla Europy, w zależności od lokalizacji, pomiędzy 10,4–17,1 centów amerykańskich dla instalacji mniejszych (do 100 kWp) a 2,8–5,4 centa – dla dużych (1 MWp).

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę, że w publikacji (World Energy Assessment), w części poświęconej rozwojowi fotowoltaiki, dość trafnie przewidziano koszt systemu PV, na który składa się moduł oraz pozostała część osprzętu, tj. BoS (*Balance of System*). Opracowany w roku 2000 scenariusz, bazujący na danych z 1998 r., przewidywał przykładowo w średnim okresie czasu (w latach 2005–2015) koszt 1 kW zainstalowanej mocy na 1000–2000 USD (USD=1998\$), a po roku 2015 – spadek poniżej 1000 USD. Uwzględniając dodatkowo fakt, że koszt 1 kW mocy zainstalowanej w PV wynosił w roku bazowym około 5000–10000 USD, wydaje się, że scenariusz w tym zakresie dość znacznie pokrył się z rzeczywistością. Z kolei uśredniony koszt energii elektrycznej pozyskany z fotowoltaiki zmniejszył się z 0,378 USD w 2010 roku do 0,068 USD w roku 2019. Należy przy tym podkreślić, że jest to wartość uśredniona w ujęciu globalnym, i o ile dla Indii wynosi ona 0,063 USD, o tyle dla Wielkiej Brytanii – aż 0,265 USD (dotyczy instalacji na użytek własny, pozakomercyjny) (IRENA 2020).

9.5. Mnogość rodzajów scenariuszy energetycznych

W literaturze naukowej pod względem typologicznym scenariusze są klasyfikowane w trzech głównych kategoriach: „Predyktywne”, „Eksploracyjne” i „Norma-

tywne”. Celem scenariuszy predykcyjnych jest próba przewidzenia tego, co wydarzy się w przyszłości; celem scenariuszy eksploracyjnych jest zbadanie sytuacji lub wydarzeń, które są uważane za możliwe do zaistnienia; z kolei scenariusze normatywne skupiają się na osiągnięciu określonego celu w przyszłości (Ghasemian i in. 2020).

Nie sposób jest opisać wszystkie dostępne modele ze względu na ich liczbę. Nie byłoby to także zasadne ze względu na fakt, że część z nich bądź to nie uwzględnia wszystkich założeń, które wydają się istotne dla tego badania, bądź też ich zakres jest odmienny od oczekiwanego dla tego badania. Naturalnie, dodatkowo należy wziąć pod uwagę także to, że scenariusze energetyczne potrafią szybko się zdezaktualizować, zwłaszcza w przypadku prognozowania danych dla OZE, a już szczególnie dla tak szybko rozwijającej się jej gałęzi, jaką jest fotowoltaika.

Z tego też powodu zostanie tutaj dokonany jedynie krótki przegląd części z nich, ze szczególnym uwzględnieniem wyników, które zostały wykorzystane w literaturze przedmiotu. Nakreślone tu modele nie stanowią pełnego ich przekroju, dodatkowo w tym miejscu nie zostają one poddane pełnemu opisowi, gdyż analiza tych scenariuszy nie jest tematem tego opracowania.

W publikacji (Ghasemian i in. 2020) zaprezentowane zostały scenariusze, które wymieniono już wcześniej, a pochodzące z publikacji takich instytucji, jak WEC, Shell, IEA, BP, ExxonMobil oraz Greenpeace. Dokonany w nich przegląd, obejmuje wiele aspektów, wpływających na kształtowanie się rynku energetycznego do 2040 roku. W publikacji agencji IRENA (*International Renewable Energy Agency*) (IRENA 2019) zaprezentowano szereg danych prognostycznych, dotyczących wielkości rynku energetycznego do roku 2050 (dokładniej: postęp potrzebny do osiągnięcia kluczowych wskaźników w celu spełnienia założeń scenariuszowych „REmap Case”), z uwzględnieniem udziału OZE, jak również z podziałem na poszczególne rodzaje. Określono udział odnawialnych źródeł energii na:

- 25% w roku 2017/2018 (dane zastane),
- 57% w roku 2030,
- 75% w roku 2040,
- 86% w roku 2050.

Z kolei, roczny przyrost zainstalowanej mocy dla fotowoltaiki określono dla podanych lat odpowiednio na: 109, 300, 355 oraz 360 GW. Oznacza to, że w okresie 2030–2050 prognozowany przyrost z tej gałęzi OZE ma być w miarę stały i utrzymywać się w przedziale 300–360 GW rocznie. Koszt wyprodukowanej MWh ma kształtować się odpowiednio na poziomie: 81, 58, 48 oraz 38 USD, i ma być porównywalny z kosztami energii wytworzonej z lądowych elektrowni wiatrowych. Z kolei zainstalowana moc PV w 2050 roku według powyższego scenariusza, ma wynieść 8519 GW, podczas gdy łączna moc elektrowni wiatrowych (lądowych i morskich) tylko 6044 GW. Aż 86% wyprodukowanej energii elektrycznej ma pochodzić ze źródeł odnawialnych, co oznacza wygenerowanie blisko 50 000 TWh w ujęciu rocznym.

W przywoływanej wcześniej publikacji (Kavlak i in. 2014), mającej na celu określenie ilości wybranych metali niezbędnych do szybkiego, masowego wdrożenia fotowoltaiki, wybrano cztery scenariusze, dla których określono parametry związane z wielkością zainstalowanych mocy PV i ich udział procentowy w sektorze energii elektrycznej na rok 2030. Przyjęto tam modele, różniące się od siebie w sposób znaczący – przewidują one odpowiednio:

- 720 GW instalacji fotowoltaicznych z udziałem 3% w całym rynku energii elektrycznej (scenariusz IEA WEO*),
- 1850 GW i 8% (Solar Generation 6),
- 3000 GW i 13% (GEA),
- 5500 GW z 24-procentowym udziałem w scenariuszu Shella.

Naturalnie, tak istotne różnice implikują także ogromny przedział danych wynikowych, związanych z ilością surowców, potrzebnych dla danych rozwiązań fotowoltaicznych. Z kolei w publikacji (Oberbeck i in. 2020) wykorzystano 8 scenariuszy na rok 2030, w których łączna moc zainstalowanych rozwiązań PV to odpowiednio:

- IEA current policies – 1290 GW,
- IEA new policies – 1590 GW,
- IRENA 2017 – 1760 GW,
- BNEF – 2140 GW,
- IEA sustainable development – 2350 GW,
- ITRPV low – 3550 GW,
- ITRPV high – 4740 GW,
- Shell sky scenario – 5010 GW.

Tutaj, jak można zauważyć, zakres jest nieco węższy (zarówno od dołu – wartości minimalne, jak i od góry – wartości maksymalne) i zawiera się w przedziale 1290–5010 GW.

W publikacji poświęconej odnawialnym źródłom energii REN21 (Renewables 2017) przeglądowi poddane zostały scenariusze takich podmiotów jak: IRENA, IEA, BP, Greenpeace, Climate Scientists. Co istotne, porównawczo zostały także uwzględnione scenariusze danych podmiotów, które ukazały się we wcześniejszych okresach. Różnice, które się w nich pojawiają (np. weryfikacja części prognoz „w dół”, tj. zmniejszenie wartości procentowych udziału OZE w koszyku energetycznym) ukazują, że każdy scenariusz jest tylko modelem, który może znacząco odbiegać od przyszłej jego realizacji. Jednakże, uwzględniając jedynie najnowsze przedstawione tam scenariusze, wartości, które zostały w nich ujęte wynoszą od 14 do 37% partycypacji zielonej energii w globalnym rynku energii. Z kolei wartości bezwzględne zainstalowanej mocy dla samej fotowoltaiki wynoszą od 413 GW do 3725 GW w roku 2030, rosnąc do 712–9295 GW w roku 2050. Jednocześnie, należy

* The World Energy Outlook – coroczna prognoza energetyczna IEA, Międzynarodowej Agencji Energetycznej (International Energy Agency).

podkreślić znaczącą modyfikację danych w tym zakresie. O ile, w przypadku ogólnego udziału OZE, rewizje w kolejnych scenariuszach obniżały te wartości, o tyle dane dotyczące zainstalowanej mocy z fotowoltaiki ulegały znacznym poprawkom „w górę” – np. w przypadku scenariuszy IEA na rok 2030 – z 55 GW w WEO 2005 aż do 413 GW w WEO 2014. Podobne znaczne różnice dotyczą także pozostałych agencji i okresów. W latach 2030–2050 roczny przyrost mocy zainstalowanych tego źródła energii ma wahać się pomiędzy 15 a aż 295 GW, w zależności od konkretnego modelu. Oznacza to, że także i w tym wypadku pozostawiono szeroki zakres możliwych wartości, z czego wydaje się, że dolne wartości są prognozowane zbyt zachowawczo, gdyż już obecnie roczny przyrost mocy nowych instalacji PV osiąga około 100 GW.

W publikacji (Pursiheimo i in. 2019) określono także zakładane wielkości zainstalowanej mocy paneli fotowoltaicznych w roku 2050, z podziałem na regiony. Niewątpliwie, Chiny z prognozowaną mocą na poziomie 15 284 GW będą największym beneficjentem tego źródła OZE, szacowanego w tym badaniu na 48 549 GW w ujęciu globalnym. Należy dodać, że taki udział PV oznacza partycypację na poziomie aż 77% w sumarycznej produkcji energii elektrycznej. W badaniu tym zasygnalizowano także istotną kwestię, która może okazać się ważna w przyszłych scenariuszach, a mianowicie wielkość współczynnika rocznej wydajności energetycznej paneli PV – zależnej od lokalizacji (czyli między innymi – nasłonecznienia), a zawierającego się w przedziale od 15 do 24%. W tabeli 13 przedstawiono scenariusze globalnego zużycia energii w roku 2040 na podstawie (Carrington i Stephenson 2018).

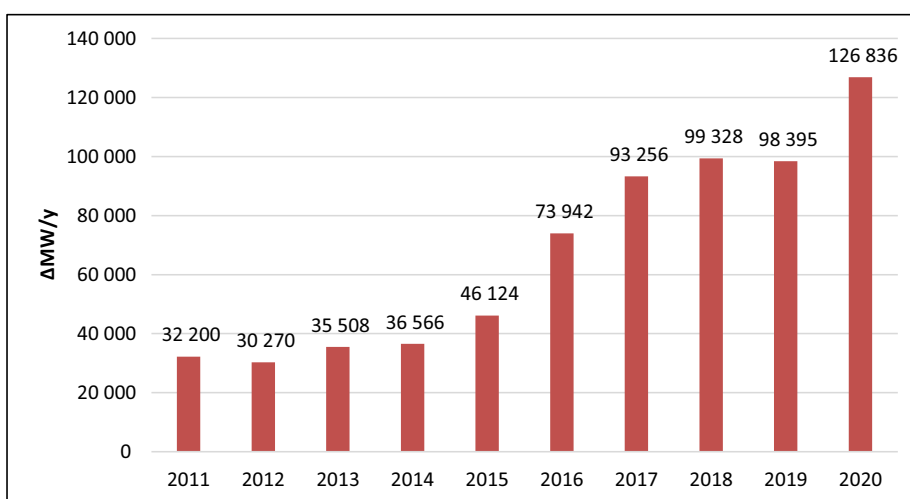
Z tabeli 13 wynika, że przewidywane globalne, całkowite zapotrzebowanie na energię w roku 2040 będzie kształtowało się pomiędzy 276 a 860 EJ (eksadzuli). Z kolei łączne zużycie energii elektrycznej w tym czasie zawierać się ma pomiędzy 23 800 a 46 100 TWh. Oznacza to dość szeroki przedział zarówno jednych, jak i drugich wartości, w zależności od przyjętego scenariusza. Jeszcze większe różnice dotyczą konkretnych źródeł OZE, takich jak fotowoltaika i energetyka wiatrowa. Dla PV prognozowane na rok 2040 wartości zawierają się w przedziale od zaledwie 190 aż do 11 400 TWh, z kolei dla energii wytwarzanej przez wiatr – od 1720 do 15 500 TWh. Oznacza to aż kilkudziesięciokrotną różnicę pomiędzy minimalnymi a maksymalnymi wartościami. Tak znaczące różnice wynikają z faktu, iż o ile materiały źródłowe do analizowanych scenariuszy zawierają już historyczne dane, na których można budować modele, o tyle brak jest takich informacji w przypadku nowych źródeł energii, jakimi są OZE. Dodatkowo zaznaczyć należy, iż podczas tworzenia tych scenariuszy brane są pod uwagę różne kierunki rozwoju źródeł energii elektrycznej, podczas gdy ilość energii pozyskiwanej ze źródeł „tradycyjnych”, nieodnawialnych, jest łatwiejsza w prognozowaniu, ze względu na znaczną ilość danych, które można uwzględnić (np. wielkość wydobycia ropy, węgla i gazu ziemnego, ilość obecnych kopalń etc.).

Tabela 13. Scenariusze globalnego zużycia energii w roku 2040

Scenariusz	Nieodnawialne źródła energii [EJ]				Elektryczność, OZE [TWh]		
	łącznie	gaz ziemny	ropa naftowa	węgiel	łącznie	pv	wiatr
2014 (referencyjny)	571	121	179	163	23 800	190	1 720
WWF 2011	276	32	20	24	28 800	4 700	7 100
G-peace 2015 Adv E [R]ev	482	82	46	33	46 100	9 400	15 500
G-peace 2015 E [R]ev	485	98	67	50	42 800	7 100	11 300
IEA-WEO 2017 SDS	587	144	142	73	35 900	5 300	7 000
IEA-WEO 2016 450	620	137	143	82	34 100	3 200	6 100
IEA-WEO 2015 450	634	139	144	102	33 900	2 200	5 100
Statoil 2017 Renewal	565	117	152	77	36 600	5 400	7 100
Carbon Tracker 2017	675	173	150	63	38 100	10 700	2 100
WEC 2016 Unfin Symph	633	152	183	86	35 500	3 800	4 900
WEC 2013 Symphony	654	170	170	101	39 600	5 800	3 000
Statoil 2017 Reform	680	154	202	142	39 700	3 600	5 500
WEC 2016 Mod Jazz	694	188	206	129	37 700	2 700	4 300
IEA-WEO 2017 NP	733	181	205	161	39 300	3 200	4 300
IEA-WEO 2016 NP	745	178	202	170	39 000	2 100	3 900
IEA-WEO 2015 NP	748	176	202	181	39 400	1 500	3 600
Shell Mountains 2013	822	226	189	191	36 400	3 700	2 300
Exxon-Mob 2017	739	188	236	151	33 600	1 700	3 300
WEC 2016 Hard Rock	709	159	216	169	35 600	1 300	2 900
Statoil 2017 Rivalry	713	156	229	181	37 600	2 600	3 300
Shell Oceans 2013	856	187	222	202	44 200	11 400	4 000
IEA-WEO 2017 CP	805	195	238	207	42 300	2 200	3 400
EIA Outlook 2016	860	223	260	190	36 500	1 000	2 500
IEA-WEO 2016 CP	819	195	228	218	42 500	1 500	3 100
IEA-WEO 2015 CP	819	192	228	230	43 100	1 100	2 800
G-peace 2015 Reference	803	193	202	240	44 000	800	2 600
WEC 2013 Jazz	825	216	231	224	44 500	700	3 100

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Carrington i Stephenson 2018.

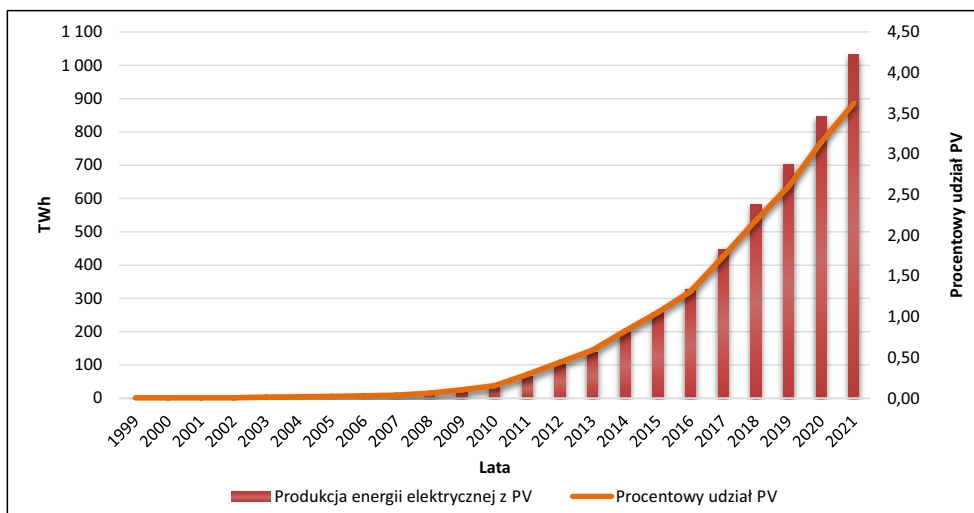
Uwzględnienie danych, dotyczących zarówno przeszłego, jak i obecnego udziału fotowoltaiki w miksie energetycznym jest niezbędne, aby jak najdokładniej przewidzieć partycypację tego rodzaju OZE w globalnym wytwarzaniu energii elektrycznej, tak w najbliższej przyszłości, jak i w odleglejszym terminie. Na rysunku 19 przedstawiono dane, obrazujące moce nowych instalacji fotowoltaicznych w ostatnich dziesięciu latach. Widać tutaj, że w latach 2011–2014 nowo, powstałe instalacje osiągały stabilne wartości mocy z przedziału około 30–37 GW rocznie, podczas gdy w 2016 roku nastąpił skokowy wzrost do blisko 74 GW, z kolei lata 2017–2019 to okres kolejnej stabilizacji, tym razem na wyższym poziomie – około 93–99 GW, a ostatni raportowany rok, tj. 2020, zamknął się znacznym wzrostem i osiągnięciem blisko 127 GW mocy kolejnych instalacji fotowoltaicznych. Można więc założyć, że w kontekście tych danych, dolne granice scenariuszy, traktujące o kilkunastu gigawatach przyrostu na rok, są mocno niedoszacowane, nawet jeśli kolejne lata nie przyniosą aż tak dużej dynamiki wzrostowej.



Rys. 19. Roczny przyrost zainstalowanej mocy PV w latach 2011–2020

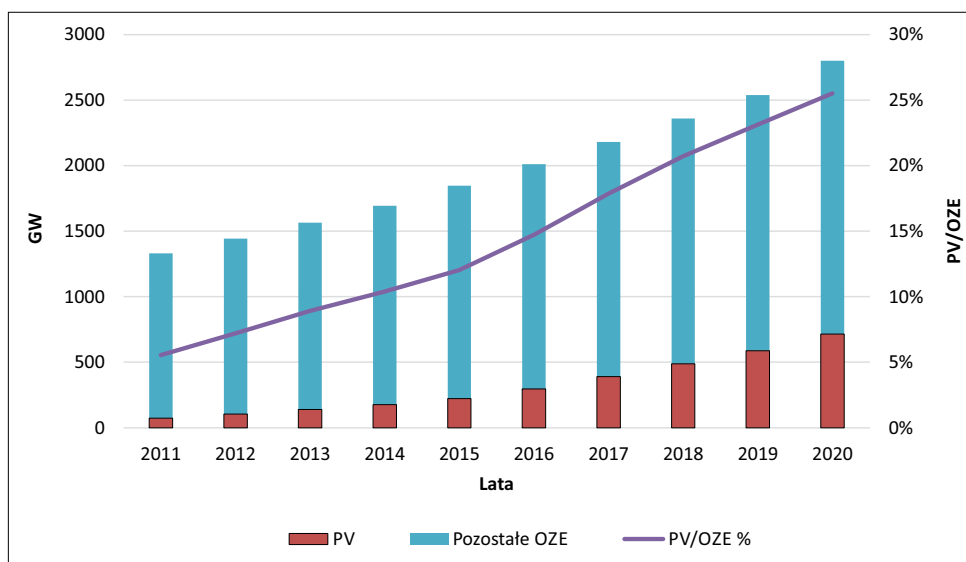
Źródło: opracowanie własne na podstawie raportów IRENA (IRENA 2020a, 2021)

Globalną produkcję energii elektrycznej, pochodzącej z fotowoltaiki, za lata 1999–2021, wraz z udziałem procentowym w całości wytwarzanej energii elektrycznej na świecie, przedstawiono na rysunku 20. Zauważyć tu można dynamiczny wzrost – o ile do roku 2010 udział PV w światowej produkcji energii elektrycznej wynosił ułamek procenta (przy produkcji do kilkudziesięciu terawatogodzin rocznie), o tyle kolejne lata przyniosły dynamiczny wzrost, przekraczając 1000 TWh energii, przy jednoczesnym udziale na poziomie bliskim 4% w całkowitej produkcji energii elektrycznej, w roku 2021.



Rys. 20. Globalna produkcja energii elektrycznej z PV (1999–2021)
 Źródło: opracowanie własne na podstawie: BP Statistical Review 2022

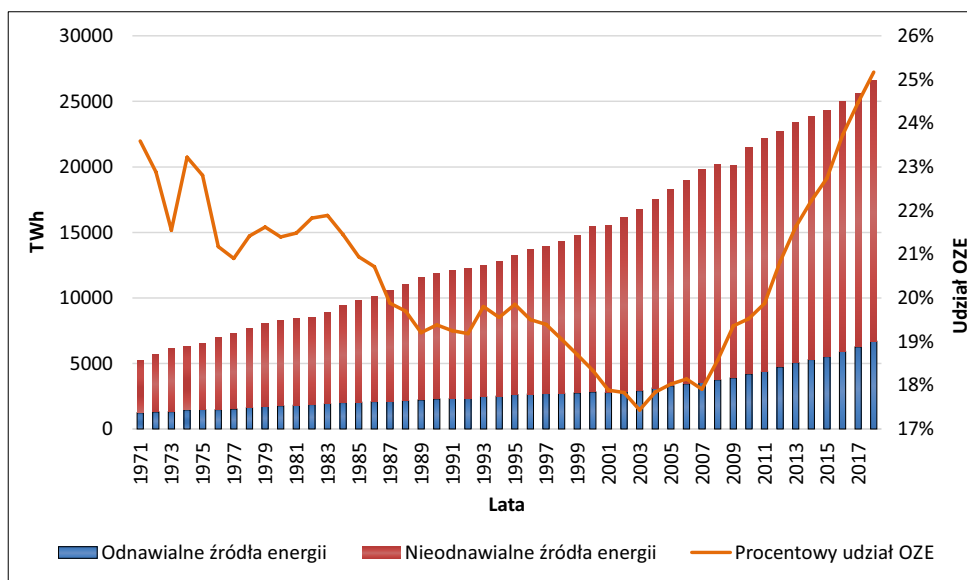
Z kolei na rysunku 21 zaprezentowano wykres ilustrujący wielkość zainstalowanych mocy instalacji elektrycznych w latach 2011–2020 – zarówno w ujęciu całościowym dla wszystkich odnawialnych źródeł energii elektrycznej, jak również procentowego udziału fotowoltaiki w samym OZE. Widoczny jest tutaj



Rys. 21. Zainstalowana moc energii elektrycznej z OZE i PV w latach 2011–2020
 Źródło: opracowanie własne na podstawie: IRENA 2021

przyrost mocy zarówno dla całego sektora OZE (w analizowanym okresie o niepełna 70% – z blisko 1,26 do prawie 2,09 TW), jak i dla PV. Przy czym wzrost ten był o wiele wyższy – z 0,074 aż do 0,714 TW, a więc blisko dziesięciokrotny. Udział PV w OZE w tym okresie wzrósł prawie pięciokrotnie – z 5,55% w 2011 roku aż do 25,51% w 2020 roku.

Rysunek 22 przedstawia rozkład odnawialnych oraz nieodnawialnych źródeł w wytwarzaniu energii elektrycznej w latach 1971–2018, wraz z procentowym udziałem OZE w globalnej produkcji energii elektrycznej w tym okresie.



Rys. 22. Udział odnawialnych i nieodnawialnych źródeł energii elektrycznej w latach 1971–2018
Źródło: opracowanie własne na podstawie: BP Statistical Review 2022

Znamienny jest fakt, że pomimo stale zwiększającej się produkcji „zielonej energii”, jej procentowy udział spadał od roku 1975 aż do 2003, a więc przez blisko trzy dekady. Spowodowane to było znacznie większym wzrostem produkcji energii elektrycznej z tradycyjnych źródeł – we wspomnianym okresie nastąpił przyrost z 5032 aż do 13 830 TWh, podczas gdy z OZE wzrósł z 1487 do 2920 TWh. Z kolei lata 2004–2018 to gwałtowny wzrost udziału odnawialnych źródeł – z ponad 17% do ponad 25%, tzn. w ciągu 15 lat nastąpił wzrost o 8 punktów procentowych. Jest to istotna zmiana, jednak należy uznać, że w kontekście przyjętych w ostatnich latach porozumień, ustaleń oraz deklaracji – konieczne będą jeszcze szybsze i realizowane na szerszą skalę działania, dotyczące intensyfikacji na rzecz zastępowania paliw kopalnych, wszelkimi możliwymi odnawialnymi źródłami energii. Jest to bardzo istotne, gdyż taki stan rzeczy naturalnie przełoży się na zwiększony popyt na instalacje OZE, a więc i surowce, niezbędne do ich produkcji. Ze względu na

pewną „bezwładność”, większość scenariuszy nie obejmuje ustaleń z ostatnich lat – zapewne zostaną one uwzględnione w pełni dopiero w tych, które pojawią się po roku 2021, aby mogły obejmować właśnie najnowsze ustalenia.

9.6. Wpływ czynników zewnętrznych na scenariusze energetyczne

Jak już zostało wspomniane, istnieje szereg modeli energetycznych, których scenariusze zawierają wyniki o znacznej rozpiętości danych. Spowodowane jest to m.in. przyjęciem odmiennych założeń dotyczących wpływu konkretnych czynników na zużycie energii w perspektywie kolejnych dekad, ale także uwzględnieniem lub pominięciem innych czynników, które w końcowym efekcie wpływają na finalny rezultat. W tym miejscu należy przypomnieć, że wszystkie scenariusze bazują również na danych historycznych. W zależności od tego, jak dany model oszacuje ich istotność i wpływ na przyszłość, jaki okres będzie analizowany, a także jakie zmienne wejdą w skład modelu, zależą otrzymane finalne wyniki. Można więc przyjąć, że każda prognoza, odnosząca się do przyszłego zapotrzebowania na energię, będzie zawierała określony zbiór czynników badanych dla okresu przyszłego, jak również analizie będzie podlegał ustalony obszar zmiennych, zawarty w danych historycznych.

W publikacji poświęconej analizie zapotrzebowania na energię w perspektywie do roku 2060, a bazującej na scenariuszach WEC (*World Energy Council*) z 2019 roku (WEC 2019) przedstawiono kilka najważniejszych czynników, które miały wpływ na kształtowanie się zapotrzebowania na energię w latach 1978–2018 (Kober i in. 2020). Były to między innymi: wzrost populacji z 4,3 do 7,63 mld, wzrost globalnego PKB z 26 301 do 82 635 mld USD (US\$2010), czy też globalny wzrost zużycia energii pierwotnej z 270,5 EJ do 580 EJ. Jednocześnie PKB per capita wzrósł o 77% z 6117 USD w 1978 r. do 10 830 USD (US\$2010) w 2018 r., a średnie zużycie energii pierwotnej przypadającej na jednego mieszkańca wzrosło o ponad 21% – z 62,8 GJ w 1978 r. do 76,2 GJ w 2018 r. Co istotne, globalne zużycie energii pierwotnej w przeliczeniu na jednostkę PKB zmniejszyło się w tymże okresie o 32% – z 10 300 GJ/mln USD (wartość USD z 2010 r.) do 7000 GJ/mln USD, co z kolei odpowiada rocznej poprawie energochłonności PKB o blisko 1%. Pozostałe dane dotyczyły m.in. udziału OZE w koszyku energetycznym, czy też emisji CO₂. W tejże publikacji uwzględniono trzy scenariusze:

- 1) WEC – Modern Jazz,
- 2) Unfinished Symphony,
- 3) Hard Rock.

Zaprezentowane w nich kryteria różnią się m.in. odmiennymi podejściami polityków do zmian klimatycznych, zrównoważonego rozwoju, ekologii czy też międzynarodowej współpracy w tym zakresie. Z drugiej strony scenariusze te opisują

także różny stopień wpływu pozostałych czynników – m.in. ekonomicznych, gospodarczych, politycznych czy też geograficznych, związanych z zasobami surowców. Wzięto w nich pod uwagę odmienne założenia dotyczące ludności, wzrostu PKB, cen emisji dwutlenku węgla, partycypacji OZE w energetyce czy też zmian dotyczących szerszego wdrażania koncepcji elektromobilności (tzn. zwiększenia udziału pojazdów elektrycznych w globalnym transporcie).

Ten ostatni aspekt jest szczególnie godny podkreślenia, gdyż, pomimo że fotowoltaika jest ogólnie kojarzona z wytwarzaniem energii elektrycznej, wielu analityków i dużych firm energetycznych przewiduje, że do połowy XXI wieku systemy fotowoltaiczne będą zaspokajać znaczną część światowego zapotrzebowania na energię, wykraczającą poza sektor energetyczny, w wyniku zastosowania nowych technologii przetwarzania energii elektrycznej na paliwo (Wilson i in. 2020).

Zastosowanie PV w celach innych niż wytwarzanie stricte energii elektrycznej może istotnie wpłynąć na kształt tego rynku, drastycznie zwiększając zapotrzebowanie na ten rodzaj zielonej energii. Szczególnie ma to znaczenie w przypadku masowego jego stosowania. Ze względu jednak na znaczną niepewność dotyczącą wielkości zapotrzebowania z tej strony, większość scenariuszy nie uwzględnia tego źródła popytu bądź też zachowawczo przyjmuje niewielkie jego wartości.

10. Prognozy popytu na srebro dla fotowoltaiki a zmiany w otoczeniu rynkowym

Otoczenie rynkowe składa się z wielu czynników o różnorodnym działaniu. Szacując wielkość popytu na srebro ze strony branży fotowoltaicznej, oprócz wymienionych wcześniej czynników, a odnoszących się zarówno do szeroko pojętego rynku energetycznego, jak i – w węższym ujęciu – rynku OZE oraz już samego udziału PV, niezbędne jest uwzględnienie tych czynników, które odnoszą się tylko i wyłącznie do wykorzystania tego surowca. Z tego też powodu, konieczne staje się uwzględnienie globalnego udziału OZE i fotowoltaiki w koszyku energetycznym, zgodnie z założonym scenariuszem, uwzględniającym określone zmienne.

Jednocześnie, aby uzyskać możliwie najbardziej prawdopodobny model zapotrzebowania na srebro ze strony tej branży, dodatkowo niezbędne jest uwzględnienie takich zagadnień jak:

- ▶ udział rozwiązań opartych na srebrze w całkowitej produkcji energii z PV (przykładowo, wg publikacji (Moreau i in. 2019) w roku 2030 zaledwie 10% rynku będą miały tzw. pozostałe technologie*);

* Inne niż z udziałem krzemu.

- sprawność modułów (która, jak wskazano, dość istotnie zmieniła się w ciągu ostatnich dekad);
- jednostkowy udział srebra (w przeliczeniu bądź to na panel, moduł, m², czy też wat uzyskanej mocy).

Także nie do pominięcia są takie czynniki jak:

- wielkość zasobów/rezerw,
- wielkość wydobycia,
- cena srebra,
- wielkość recyklingu tego surowca w ujęciu ogólnym,
- współczynnik jego recyklingu z paneli fotowoltaicznych, których cykl życia dobiegł końca (badania w publikacji (Moreau i in. 2019), także przyjmują kilka możliwych scenariuszy w tym zakresie).

Są one szczególnie istotne w kontekście faktu, że w najbliższych latach nastąpi znaczny przyrost liczby paneli, które według EOL* powinny zostać poddane utylizacji i – tu należy mieć nadzieję – recyklingowi.

Szczególnie ważnym czynnikiem jest technologia wytwarzania. Kwestia udziału konkretnych technologii, wielkości użytego srebra, sprawności paneli oraz recyklingu była także przedmiotem badań, opublikowanych w (Elshkaki i Graedel 2015). Przyjęto tam parametry, które ukazały się w innym artykule – z 2000 roku (Andersson i Jacobsson 2000). Obecnie jednak, przedstawione założenia są już zupełnie nieaktualne; przykładowo podana tam wartość użycia 52 g srebra na metr kwadratowy modułu fotowoltaicznego jest znacznie wyższa zarówno od obecnego użycia, jak i prognoz.

W publikacji poświęconej zapotrzebowaniu srebra przez sektor fotowoltaiczny (Grandell i Thorenz 2014), określono przedział 10–42 g tego surowca na 1 m², a do badań związanych z przyszłym popytem przyjęto dwie wielkości: 8,2 g/m² – jako wielkość referencyjna w momencie opublikowania artykułu (tj. 2014 roku) oraz 0,82 g/m² – jako wartość docelowa w roku 2020. Widać tutaj więc znaczny przedział wartości, które zostały uwzględnione w założeniach, a dotyczących zmian w stosunkowo krótkim okresie czasu. Istotne zmniejszenie udziału srebra jest zgodne m.in. z szacunkami *International Technology Roadmap for Photovoltaic* (ITRPV) – w dziewiątej edycji podtrzymano spadek wykorzystania tego metalu – do około 50 mg/komórkę w roku 2030 (International Technology).

Podobnie, dane te są zbieżne z raportem Silver Institute wskazującym, że nastąpi wzrost wydajności ogniw – z 4,5 W obecnie do 6 W w roku 2030, przy jednoczesnym spadku użytego srebra – do wielkości 10,5 mg/W (The Role of Silver 2018). Jednocześnie, w tym samym raporcie autorzy zaznaczają, że rok 2017 był prawdopodobnym szczytem zapotrzebowania na srebro ze strony fotowoltaiki

* EoL – *End of Life*; koniec życia produktu, zakończenie jego cyklu użyteczności (związany z pogorszeniem lub utratą jego właściwości, zastąpieniem nowym produktem czy też brakiem wsparcia przez producenta).

(ponad 100 Moz), a kolejne lata będą charakteryzowały się popytem w okolicach 70–80 Moz, aby następnie (w połowie lat dwudziestych) najpierw spaść do około 50–55 Moz, a potem ustabilizować się w okolicach 66 Moz (w roku 2030).

Z kolei eksperci uczestniczący w badaniu (Lo Piano i in. 2019) podkreślają, że ze względu na odległy horyzont czasowy, istnieje duży poziom niepewności związany z szacunkami dotyczącymi użycia srebrnej pasty do metalizacji w ogniwach PV. Z przeprowadzonego wywiadu wynika, że część z nich spodziewa się ekstrapolacji trendu ITRPV (*International Technology Roadmap*), kolejni zakładają całkowite zaprzestanie wykorzystania tego metalu w produkcji PV, a pozostali szacują konkretne wartości, mianowicie: 10 mg/komórkę, 20 mg/komórkę, spadek 5–7% w skali roku oraz 4–6% spadek w skali roku.

Z kolei w badaniu (Davidsson i Höök 2017) przyjęto wartość 35 600 kg srebra na każdy 1 GW zainstalowanej mocy fotowoltaiki, przy założeniach, że wykorzystanie tego surowca wynosi 0,13 g na ogniwo, tj. 5,34 g/m², przy założeniu standardowego nasłonecznienia 1000 W/m² i wydajności panelu równym 0,15. W kontekście wskazanych wcześniej danych historycznych, obecnego użycia srebra w PV oraz większości modeli szacujących przyszłe kształtowanie się jego wykorzystania, należy uznać, że te wartości są z jednej strony przeszacowane, gdyż opierają się na błędnych (starych) założeniach, a jednocześnie muszą ulegać znacznej redukcji w perspektywie najbliższych lat. W roku 2020 przyrost instalacji fotowoltaicznych osiągnął blisko 127 GW. Podstawiając powyższe dane (35 600 kg × 127 GW), oczekiwane zużycie srebra wynosi 4 521 200 kg, co oznacza około 159 480 600 oz, tj. blisko 160 Moz. Rzeczywiste wykorzystanie tego surowca przez sektor PV w roku 2020 to 101 Moz (World Silver Survey 2022). Wynika z tego różnica na poziomie prawie 60 Moz, która wskazuje na stopień rozbieżności w przyjmowanych założeniach.

Kończąc przegląd literatury tematu, warto wskazać inne podejście, które można zastosować w celu zbadania ograniczeń związanych z dostępnością surowców. Poniższa praca ma za cel oszacowanie wielkości popytu na srebro w perspektywie najbliższych 30 lat wraz ze wskazaniem możliwych ograniczeń w masowym wdrażaniu PV, a związanych z dostępnością tego metalu dla tego rynku (branży). Rozpatrując jednak problem od drugiej strony, można oszacować, jaki udział w globalnej produkcji energii może mieć fotowoltaika, przy określonych założeniach. Autorzy badania (Grandell i Thorenz 2014) przyjęli poziom rezerw srebra jako 540 000 Mg oraz cztery scenariusze, dla poniższych założeń:

- 2% wykorzystania tego metalu (w stosunku do rezerw), przy zużyciu 8,2 g tego surowca na metr kwadratowy;
- 2% przy 0,82 g/m²;
- 5% udziału w rynku przy 8,2 g/m²;
- 5% przy 0,82 g/m².

Pozostałe kryteria to: sprawność na poziomie 20% oraz nasłonecznienie wynoszące 2000 kWh/m²/rok. Przeprowadzone obliczenia skutkowały wynikami na

poziomie odpowiednio 10 800 Mg dla udziału 2% oraz 27 000 Mg przy udziale 5%. To z kolei pozwala oszacować wielkość produkcji energii dla pierwszej wartości na 530 TWh (dla 8,2 g/m²) i 5300 TWh (przy założeniu obniżenia zużycia srebra o rząd wielkości, tj. do poziomu 0,82 g/m²) i odpowiednio na 1310 TWh oraz 13 100 TWh przy założeniu zwiększonego, pięcioprocentowego udziału w rynku. Przyjęcie tak odmiennych wartości skutkowało dość szerokim zakresem uzyskanych wyników, kształtujących się pomiędzy 530 a 13 100 TWh. Powyższe wyniki przedstawiono w tabeli 14 (przy takich wspólnych założeniach: poziom rezerw srebra – 540 000 Mg, sprawność ogniwa – 20%, nasłonecznienie – 2000 kWh/m²/rok).

Tabela 14. Scenariusze maksymalnej produkcji energii elektrycznej z PV

Scenariusz	Udział srebra [%]	Użycie srebra [g/m ²]	Dostępna ilość srebra [Mg]	Produkcja energii elektrycznej [TWh]
I	2	8,20	10 800	530
II	2	0,82	10 800	5 300
III	5	8,20	27 000	1 310
IV	5	0,82	27 000	13 100

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Grandell i Thorenz 2014.

W przeprowadzonych tu badaniach rozpatrywany był pewien, kilkuletni okres czasu, w którym parametry te miały ulec zmianom, jednakże zauważyć można (na przytoczonym przykładzie), z jak dużym obszarem niepewności do czynienia należy się zmierzyć, a także jak szeroki zakres czynników może wpływać na końcowe szacunki.

11. Analiza wybranych scenariuszy energetycznych

Dla dalszych badań zostało wybranych kilka scenariuszy energetycznych spośród dużej liczby dostępnych modeli, których znikomy przekrój przedstawiono w poprzednich rozdziałach. Różnią się one od siebie zastosowaną metodyką, liczbą oraz istotnością przyjętych zmiennych, horyzontem czasowym, czy też ewentualnym zorientowaniem na konkretny aspekt (m.in. środowiskowy). Trzy główne scenariusze, na których bazują obliczenia w tym badaniu, to zlecone przez Greenpeace,

a przeprowadzone przez grupę Analiz Systemowych Instytutu Inżynierii Termodynamicznej, należącej do Niemieckiego Centrum Lotniczego (*Systems Analysis Group of the Institute of Engineering Thermodynamics, part of the German Aerospace Center – DLR*) (Greenpeace 2015). Dodatkowo, jako czwarty został dodany scenariusz, pochodzący z najnowszej publikacji (maj 2021) International Energy Agency (IEA) – *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector* (Net Zero 2021).

Choć modele te reprezentują szeroki przekrój możliwych zdarzeń, istnieje jednak znaczne prawdopodobieństwo ich realizacji w przyszłości, ponieważ są oparte na analizie przeszłych danych, których wpływ na rozwój energetyki został oszacowany jako istotny. Jak podkreślają sami autorzy, scenariusze te nie są próbą przewidywania przyszłości, a jedynie wskazują możliwe ścieżki rozwoju energetyki, które mogą być skutkiem realizacji konkretnych założeń. Dodatkowo, należy podkreślić, że wybór ich został dokonany ze względu na szczegółowość i transparentność, dzięki czemu w badaniu mogły być użyte te dane, które były niezbędne do jego realizacji.

Horyzont czasowy scenariuszy obejmuje rok 2050, jednocześnie uwzględniając niezbędne przedziały dziesięcioletnie, tj. lata: 2030 i 2040, traktując rok 2020 jako bazowy, czyli punkt odniesienia do pozostałych obliczeń. Uwzględniając fakt, że scenariusze Greenpeace pochodzą z publikacji, która ukazała się w roku 2015, a scenariusz IEA z 2021, w tych pierwszych przyjęto prognozy na rok 2020 jako dane odniesienia w danych scenariuszach. Z kolei w modelu IEA dane za rok 2020 są wartościami szacowanymi w momencie prac nad tą publikacją, co oznacza, że można przyjąć, że są one zbliżone do stanu faktycznego w roku 2020. Aby jednak nie ingerować w oryginalne scenariusze, pozostawiono wszystkie wartości bez zmian, tj. bez podstawienia rzeczywistych danych za rok 2020.

Oprócz powyższych czynników, wybór tych modeli był podyktowany pośrednio także faktem, że w perspektywie 2050 roku dane tam były prezentowane zarówno w GW mocy zainstalowanej, jak i w TWh mocy produkowanej, a które to dane były wymagane zarówno do weryfikacji założeń, jak i do realizowanych badań.

Scenariusze główne, tj. bazujące na trzech wariantach Greenpeace, to kolejno:

- Reference scenario (REF),
- Energy [R]evolution scenario (E[R]),
- Advanced Energy [R]evolution scenario (ADV E[R]) (Greenpeace 2015).

Wszystkie powyższe scenariusze bazują na obecnych trendach związanych z rozwojem globalnej energetyki, jak również biorą pod uwagę założenia dotyczące konieczności intensyfikacji związanej z wprowadzaniem zmian w zakresie ochrony środowiska, wpływu nieodnawialnych źródeł energii na zmiany klimatyczne, ale także uwzględniają nowoczesne technologie i możliwość użycia przyszłych rozwiązań, takich jak różnorodne źródła OZE, rozwój e-transportu, czy bardziej energooszczędne wykorzystanie posiadanych zasobów.

Istotne jest, że podkreślono w nich konieczność zwiększenia nakładów finansowych na rozwój energetyki odnawialnej, co oznacza, że w perspektywie 20 lat,

a nawet do roku 2050, środki te będą przeznaczone na niezbędne inwestycje – zarówno, jeżeli chodzi o same źródła zielonej energii, jak również w unowocześnienie lub wręcz stworzenie (w niektórych regionach) infrastruktury, takiej jak sieci przesyłowe, czy systemy zarządzania energią. Jest to nieuniknione ze względu na fakt, że część konsumentów będzie jednocześnie producentami energii (tzw. prosumenci), a dodatkowo zmieni się znacząco charakter sieci, w której będzie istniało znacznie więcej „hubów” obsługujących bardziej rozproszone źródła produkcji oraz dystrybucji energii.

Poza wspomnianymi aspektami ekonomicznymi i środowiskowymi, należy uwzględnić także aspekt polityczny, którego wpływ – jak podkreślono w scenariuszach – może również przybierać różne formy, od bardzo sprzyjających po skrajnie niekorzystne. Reforma rynku energii elektrycznej może napotkać przeszkodę w postaci sprzeciwu obecnych producentów, których rozwinięta infrastruktura zatrudnia miliony pracowników (tak jak przykładowo decyzja o zamknięciu kopalń węgla z całą pewnością nie przysporzy zwolenników partii rządzącej); a dotyczy to wszelkich surowców, pochodzących ze źródeł konwencjonalnych – niezależnie czy jest to węgiel (kamienny, brunatny), ropa naftowa czy gaz ziemny. Zrewidowane scenariusze Greenpeace zakładają w tym zakresie m.in. skrócenie eksploatacji elektrowni węglowych z 35 lat do zaledwie 20 lat, zastępując je różnymi źródłami energii odnawialnych.

11.1. Scenariusz odniesienia, Reference scenario (REF)

Bazowy scenariusz, traktowany jako referencyjny, opiera się na założeniach opublikowanych przez Międzynarodową Agencję Energii (IEA) w World Energy Outlook 2014 (WEO 2014) (World Energy Outlook), które uwzględniają istniejącą międzynarodową politykę energetyczną i środowiskową. Można przyjąć, że jest to kontynuacja obecnych trendów i działań. Główne czynniki, które będą miały wpływ na globalny rynek energii to m.in.:

- kontynuacja trwających reform,
- liberalizacja transgranicznego handlu energią,
- najnowsze polityki, dotyczące walki z zanieczyszczeniem środowiska.

Jednocześnie scenariusz ten nie uwzględnia dodatkowych działań, mających na celu zapobieganie zmianom klimatycznym.

Ze względu na to, że prognozy IEA sięgały roku 2040, scenariusz (REF) został przedłużony do roku 2050 za pomocą ekstrapolacji wskaźników makroekonomicznych i energetycznych. W przeciwieństwie jednak do poprzedniej wersji modelu (z roku 2012), omawiany model obejmuje zmianę niektórych czynników, takich jak wzrost liczby ludności, czy nowe trendy w OZE.

11.2. Scenariusz energetycznej m.in. ewolucji, Energy [R]evolution scenario (E[R])

Podobnie, jak scenariusz odniesienia, także i ten opiera się na głównych założeniach IEA (WEO 2014), a zarazem jest aktualizacją poprzedniej wersji z 2012 roku. Bazuje on jednocześnie na danych z lat 2009–2012 oraz modelach z roku 2014, a także uwzględnia zrewidowane wartości (w ujęciu liczbowym, takie jak: zapotrzebowanie na energię, liczba ludności, wzrost PKB etc.) oraz zmiany technologiczne, polityczne, ekonomiczne i środowiskowe. Kluczowym celem, który został zawarty w założeniach, jest redukcja emisji dwutlenku węgla, który jest emitowany podczas produkcji energii, do poziomu 4 miliardów Mg rocznie w roku 2050. Jest to niezbędne, aby utrzymać wzrost globalnej temperatury na planecie na poziomie niższym niż 2°C.

Dodatkowo, zakładane jest odejście w omawianym horyzoncie czasowym od energetyki jądrowej. Scenariusz nadto zakłada zaktualizowane podejście do wdrażania OZE, uwzględniając czas niezbędny do jego realizacji (m.in. związany z budową nowych elektrowni i infrastruktury). W efekcie przewidywany jest wyższy szczyt w zapotrzebowaniu na energię oraz adekwatny, wysoki udział paliw kopalnych w jej produkcji. Tym niemniej, zakładany jest nadal znaczący wysiłek wkładany w jak najszerze wdrażanie sprawdzonych rozwiązań z zakresu odnawialnych źródeł oraz jednoczesne wykorzystanie technologii pozwalających na redukcję zapotrzebowania na energię, poprzez poprawę efektywności energetycznej.

Reasumując, można stwierdzić, że scenariusz E[R] odzwierciedla obecne trendy, polityki i ścieżki, przyjmując optymistyczne, aczkolwiek nadal realne warianty działań, których głównym celem jest szeroka dekarbonizacja systemu energetycznego, w perspektywie do roku 2050.

11.3. Scenariusz zaawansowanej m.in. ewolucji energetycznej, Advanced Energy [R]evolution scenario (ADV E[R])

Ten wariant zakłada znaczne zwiększenie wysiłków, zmierzających do przekształcenia systemów energetycznych na całym świecie na systemy w 100% odnawialne. Przewidywane zapotrzebowanie na energię pozostaje na poziomie scenariusza E[R], jednak następuje jednocześnie znacznie szybsze i wdrożone na szerszą skalę wprowadzenie technologii odnawialnych, które prowadzą do całkowitej dekarbonizacji energetyki (elektrycznej i ciepłowniczej/chłodniczej), jak również sektora transportowego.

Podkreślony jest jednocześnie znaczny wzrost produkcji energii elektrycznej, który ma być głównym źródłem energii pierwotnej, wykorzystywanej we wszystkich powyższych sektorach. Istotną rolę w tym zakresie ma odgrywać także energia pochodząca z wodoru, której szczególny udział przewidywany jest w transporcie.

Pomimo że scenariusz ten wydaje się modelem bardzo optymistycznym, nadal jednak – przy spełnieniu szeregu warunków – jest realny. Szczególnie, w kontekście szybko następujących zmian klimatycznych i co za tym idzie, konieczności natychmiastowego wręcz działania w tym zakresie, a także biorąc pod uwagę najnowsze polityki, związane z porozumieniami i ustaleniami, wydaje się, że nie ma już innej możliwości, jak przyjęcie, że jest to jedyna możliwa opcja dla globalnej energetyki.

Oba scenariusze energetycznej m.in. ewolucji zakładają między innymi wzrost produkcji energii pochodzącej ze słońca (zarówno z fotowoltaiki, jak i pochodzącej z instalacji CSP, czyli skoncentrowanej energii słonecznej, *Concentrated Solar Power*), z jednoczesnym jej uzupełnieniem ze źródeł geotermalnych, elektrowni wodnych, a także wiatrowych. Przewidywane jest znaczne zmniejszenie udziału biomasy jako źródła energii, która to technologia ma zostać zastąpiona bardziej nowoczesnymi i wydajnymi alternatywami.

W sektorze transportowym prognozowane jest zastąpienie silników spaliniowych na rozwiązania oparte na wodorze (wytwarzanym przez elektrolizę, z wykorzystaniem energii pochodzącej z OZE), jak również pojazdy o napędzie stricte elektrycznym. Ze względu na badania wskazujące, że biopaliwa mogą mieć wyższy ślad emisji gazów cieplarnianych niż „tradycyjne” paliwa (olej napędowy czy benzyna), przewidywane jest zupełne odejście od tych rozwiązań w omawianej perspektywie czasowej.

Podobnie, w sektorze ciepłowniczym nastąpić ma przesunięcie w kierunku bezpośredniego wykorzystania energii elektrycznej pochodzącej z OZE (m.in. prognozowany jest znaczny wzrost wykorzystania w tym celu pomp ciepła), która dodatkowo może być uzupełniana o geotermalne i słoneczne systemy grzewcze. Jednocześnie, model ADV E[R] zakłada stopniowe zastępowanie gazu przez wódór – w 30–40% w roku 2040 oraz w 100% w 2050 roku.

Kolejnym wyzwaniem jest budowa, oprócz wspomnianych już sieci przesyłowych, niezbędnych do stabilnego działania systemu energetycznego: magazynów energii oraz systemów inteligentnego zarządzania i równoważenia (bilansowania) obciążenia. Przyjmuje się, że wszystkie te projekty będą realizowane w sposób spójny i niezakłócony przez bariery społeczne, ekonomiczne, polityczne czy pochodzące z innych źródeł.

11.4. Scenariusz od International Energy Agency (IEA) – Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector

Scenariusz IEA jest dokumentem, a właściwie raportem, który dzięki kompleksowym badaniom, wskazuje sposób przejścia na zerową emisję netto do 2050 roku, przy jednoczesnym zapewnieniu stabilnych i przystępnych cenowo dostaw energii, zapewnieniu powszechnego dostępu do energii i umożliwieniu silnego wzrostu

gospodarczego. Powyższy scenariusz jest jednym z wielu projektów planowanych do realizacji w 2021 r. nastawionych na wsparcie wysiłków na rzecz osiągnięcia globalnych celów w zakresie energii i klimatu. Scenariusz ten szczegółowo określa, jakie działania powinny podjąć rządy, przedsiębiorstwa, inwestorzy, ale również i sami obywatele, aby zupełnie zdekarbonizować sektor energetyczny. Jest to niezbędne, aby wprowadzić emisje na ścieżkę zgodną z założeniami ograniczenia efektu cieplarnianego. Powyższy dokument powstał przed szczytem klimatycznym ONZ COP-26, który odbył się w Glasgow w listopadzie 2021 roku, pod przewodnictwem Wielkiej Brytanii. Sektor energetyczny jest obecnie źródłem około 75% emisji gazów cieplarnianych – ich redukcja stanowi klucz do zapobiegania skutkom zmian klimatycznych, a które to obecnie są na poziomie nienotowanym nigdy wcześniej. Zmniejszenie globalnej emisji dwutlenku węgla (CO₂) do zera netto do 2050 roku jest zgodne z wysiłkami na rzecz ograniczenia długoterminowego wzrostu średnich temperatur na świecie do 1,5°C, które to z kolei jest kluczowe w zahamowaniu zmian klimatycznych.

Kolejne uzgodnienia klimatyczne dają nadzieję na zrozumienie przez decydentów o istotności wprowadzanych reform, podkreślić jednak należy, że wymaga to istotnych zmian w zakresie produkcji, transportu oraz zużycia energii. W dokumencie podkreślono także, że obecne uzgodnienia, zobowiązania oraz porozumienia, nawet jeśli zostaną w pełni dotrzymane, nie dają jednak gwarancji na ograniczenie wzrostu globalnej temperatury do 1,5°C (cel Międzypaństwowej Grupy m.in. Zmian Klimatu). Z tego też względu, niezbędny jest ogromny nakład pracy, aby założenia, wskazane w powyższym scenariuszu spełnić, na co także wskazują autorzy dokumentu. Podkreślono w nim, że nie ma miejsca na odpoczynek, wskazano 400 kamieni milowych, które należy przejść, aby udało się z powodzeniem zakończyć transformację energetyczną. Jednocześnie, raport jasno wskazuje, że nie ma innej możliwości – jeżeli mają zostać zatrzymane zmiany klimatyczne, należy liczyć się z koniecznością zdecydowanych działań, także kosztem wyrzeczeń, związanych z dużym nakładem środków finansowych, wykorzystania zasobów ludzkich, a także intensywną pracą, mającą na celu opracowywanie i wdrażanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych.

Scenariusz powyższy jest opisywany przez autorów jako preferowaną drogę do zera netto, to jest „najbardziej wykonalną technicznie, opłacalną i społecznie akceptowalną”. Jednocześnie, co istotne – wyznacza opłacalną i ekonomicznie wydajną ścieżkę, prowadzącą do czystej oraz odpornej gospodarki energetycznej, zdominowanej przez odnawialne źródła energii, takie jak energia słoneczna i wiatrowa, zamiast paliw kopalnych.

W scenariuszu określono także sektory i technologie, związane z przyszłymi zmianami – zostały wyznaczone cele oraz terminy, to znaczy: co musi się wydarzyć i kiedy. Kluczowe kamienie milowe w sektorze energii elektrycznej i ciepła obejmują m.in. wycofywanie elektrowni węglowych w rozwiniętych gospodar-

kach, jak również zaprzestanie inwestycji w nowe projekty dostaw paliw kopalnych. W sektorze motoryzacyjnym, od 2035 r. nie będą już sprzedawane nowe samochody osobowe z silnikiem spalinowym. W sektorze budownictwa, istotnego beneficjenta energetyki, oczekuje się, że powierzchnia użytkowa w ujęciu globalnym wzrośnie o 75% w latach 2020–2050, z czego 80% pochodzić będzie z rynków wschodzących i gospodarek rozwijających się. Pomimo wzrostu popytu, całkowite emisje dwutlenku węgla z tego sektora powinny spaść o ponad 95% – z blisko 3 miliardów Mg w 2020 r., do około 120 milionów Mg w 2050 r. Dekarbonizacja sektora budynków powinna opierać się na zwiększonej efektywności energetycznej i elektryfikacji, w tym na energooszczędnych urządzeniach, pompach ciepła i ulepszonych izolacjach budynków. Dodatkowo, wskazano, że znaczna część zapotrzebowania energetycznego budynku będzie pochodziła z lokalnych źródeł energii, takich jak panele fotowoltaiczne czy energia słońca wykorzystana jako źródło ciepła.

Scenariusz zakłada, że zapotrzebowanie na energię z paliw kopalnych w sektorze budowlanym spadnie do 30% w roku 2030, a następnie do 2% w roku 2050. Jednocześnie określono udział energii elektrycznej w miksie energetycznym na blisko 50% w 2030 roku i 66% w 2050 roku, w porównaniu z 33% w 2020 roku. Scenariusz zakłada także natychmiastowe i masowe wdrożenie wszystkich dostępnych czystych i wydajnych technologii energetycznych, połączone z silnym dążeniem do przyspieszenia innowacji. Ścieżka zakłada, że do 2030 roku średnie roczne przyrosty fotowoltaiki wyniosą 630 gigawatów, a energii wiatrowej 390 gigawatów, to jest łącznie 1020 GW nowych instalacji OZE, czyli czterokrotność poziomu z roku 2020.

Istotnym elementem scenariusza jest dążenie do zwiększenia efektywności energetycznej, w wyniku którego globalny wskaźnik poprawy efektywności energetycznej wynosić będzie średnio 4% rocznie do 2030 roku – około trzy razy więcej niż średnia w ciągu ostatnich dwóch dekad. Większość globalnych redukcji emisji dwutlenku węgla od chwili obecnej do 2030 roku w tej ścieżce pochodzić będzie z łatwo dostępnych obecnie technologii, jednak w 2050 roku blisko 50% redukcji pochodzić będzie z technologii, które obecnie znajdują się dopiero w fazie innowacji lub prototypu. Wymaga to od rządów oraz inwestorów szybkiej zmiany priorytetów, a co za tym idzie – znaczącego zwiększenia nakładów środków finansowych i inwestycji na badania i rozwój, umieszczając je w centrum polityki energetycznej i klimatycznej. Całkowite roczne inwestycje w energię mają wynieść do 5 bilionów dolarów do 2030 roku na ścieżce zerowej netto, co oznacza dodatkowe 0,4 punktu procentowego rocznie do wzrostu globalnego PKB.

Ponadto, scenariusz zakłada, że globalne zapotrzebowanie na energię w roku 2050 będzie o około 8% mniejsze niż obecnie, jednocześnie gospodarka w tym czasie wzrośnie dwukrotnie, a populacja zwiększy się o 2 miliardy ludzi. Prawie 90% produkcji energii elektrycznej pochodzić będzie ze źródeł odnawialnych, przy

czym prym będą wiodły energia wiatrowa i fotowoltaiczna – łącznie odpowiadając za blisko 70% produkcji energii. Większość pozostałej części energii będzie generowana przez energetykę jądrową. Energia słońca będzie w ujęciu globalnym, głównym źródłem całkowitego zaopatrzenia w energię. Udział paliw kopalnych spadnie z blisko 75% całkowitej podaży energii do nieco ponad 25%.

Jednocześnie pojawią się wyzwania w zakresie bezpieczeństwa energetycznego, które wynikać będą z rosnącego znaczenia energii elektrycznej, a które obejmować będą m.in. zmienność dostaw energii z niektórych rodzajów OZE, jak również zagrożenia niedoboru niektórych minerałów, wymaganych w kluczowych technologiach i infrastrukturze czystej energii. W takiej sytuacji pojawi się ryzyko wahań cen, czy też zakłóceń dostaw, które mogą utrudnić i opóźnić, bądź też nawet uniemożliwić transformację energetyki w kierunku OZE. Z tego też względu kluczowe jest, aby określić wielkość niezbędnych surowców w tym okresie, co może być szczególnie istotne w przypadku sektora fotowoltaicznego jako głównego beneficjenta tych zmian.

12. Prognozy na podstawie zbudowanego modelu

Na potrzeby badań został zbudowany model, który pozwolił na oszacowanie zapotrzebowania na srebro w sektorze fotowoltaicznym, dla określonych, przyjętych założeń. W modelu tym będą uwzględnione zarówno dane historyczne, niezbędne do określenia stanu obecnego oraz interpolacji niektórych kryteriów, jak również ww. scenariusze, które były istotnym punktem wyjściowym do określenia globalnego zapotrzebowania energetycznego, w analizowanym okresie, tj. do roku 2050.

Oprócz założeń dotyczących energetyki, udziału odnawialnych źródeł, jak i samej fotowoltaiki, w niniejszym badaniu niezbędne jest zdefiniowanie i oszacowanie także pozostałych czynników, które to mogą wpływać na popyt na srebro przez sektor PV. Zidentyfikowane tutaj, to m.in. wymienione: udział technologii opartych na srebrze w całym sektorze fotowoltaicznym, przyszła efektywność modułów PV czy udział srebra (na panel, powierzchnię lub wat). Jednocześnie, wpływ na wykorzystanie tego surowca będą miały: wielkość wydobycia, wielkość zasobów oraz rezerw, ilość srebra pochodzącego z recyklingu (zarówno całkowitego, jak i pochodzącego ze zużytych paneli fotowoltaicznych) oraz pochodna tych czynników, tzn. cena srebra.

12.1. Główne założenia modelu

Na podstawie przeglądu literatury, danych historycznych, a także analizy scenariuszy i modeli, zdecydowano się przyjąć tutaj następujące, główne założenia:

Założenie 1: W badaniu tym zostaną wykorzystane cztery scenariusze, omówione powyżej – trzy autorstwa Greenpeace, tzn. Reference scenario (REF), Energy [R]evolution scenario (E[R]) oraz Advanced Energy [R]evolution scenario (ADV E[R]) oraz jeden IEA, pochodzący z publikacji Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, oznaczony jako (IEA 2020).

Założenie 2: Dla każdego okresu porównawczego, tj. dla roku: 2030, 2040 oraz 2050 zostały przypisane trzy wartości udziału modułów fotowoltaicznych monokrystalicznych c-Si (wykonane z krystalicznego krzemu) w całkowitej produkcji mocy z technologii fotowoltaicznych. Dla każdego scenariusza (A, B, C) ilości te są zmienne w czasie. Oznacza to macierz danych wejściowych 3*3, zaprezentowaną w tabeli 15.

Tabela 15. Udział technologii PV opartych na srebrze

Scenariusze	Udział technologii opartych na srebrze w latach		
	2030	2040	2050
A	95%	90%	80%
B	80%	60%	40%
C	60%	40%	20%

Źródło: opracowanie własne.

Założenie 3: Dla powyższych okresów, zostały przyjęte trzy wartości wykorzystania srebra [Mg/GW]. Wielkości te są zmienne w czasie dla każdego scenariusza [a, b, c]. Matryca danych wejściowych ma wielkość 3*3 i została zaprezentowana w tabeli 16.

Tabela 16. Intensywność udziału srebra w trzech scenariuszach

Scenariusze	Intensywność udziału srebra [mg/W Mg/GW] w latach		
	2030	2040	2050
A	14	12	10
B	11	9	7
C	9	7	5

Źródło: opracowanie własne.

Założenie 4: Ze względu na stosunkowo stałą podaż srebra w ostatnich 10 latach (na poziomie około 1000 Moz), a także znaczny jej wzrost w ciągu 30 lat (1990–2020) – z poziomu niespełna 600 Moz na początku tego okresu, zdecydowano się na przyjęcie wartości 1200 Moz, jako punktu odniesienia na kolejny taki horyzont czasowy, tj. 30 lat. Wielkość ta zakłada z jednej strony dalszy wzrost podaży, tak jak wskazują na to dane historyczne, a z drugiej strony – przewidywany przyrost ma znacznie mniejszą amplitudę, zgodnie z obserwacjami tych danych z ostatniej dekady.

Założenie 5: Biorąc pod uwagę, że popyt na srebro ze strony sektora fotowoltaiki, po ogromnych wzrostach ustabilizował się na poziomie około 100 Moz, można przyjąć, że dalsze wzrosty musiałyby skutkować zmniejszeniem dostaw do innych branż (inwestycyjnej, przemysłu, jubilerstwa etc.). Z tego względu w badaniu przyjęto trzy poziomy graniczne – minimalny (MIN), referencyjny (REF) oraz maksymalny (MAX). Poziom minimalny stanowi 5% wartości odniesienia, czyli 1200 Moz, co oznacza przyjęcie 60 Moz jako dolnej granicy dostaw do tego sektora. Sytuacja taka może mieć miejsce na skutek działania różnych czynników, m.in. poprzez wzrost popytu ze strony pozostałych sektorów kosztem PV, bądź też kształtowanie się ceny srebra na wysokim poziomie, w konsekwencji czego nastąpi zmniejszenie wykorzystania tego surowca przez sektor fotowoltaiki (zastępując ten metal alternatywnymi rozwiązaniami, bądź ograniczając produkcję). Poziom maksymalny zdecydowano się przyjąć jako 20% wartości odniesienia, tj. 240 Moz. Oznacza to, że scenariusz, który by wystąpił, byłby odwrotny do wersji MIN, a mianowicie to właśnie do tego sektora nastąpiłoby przesunięcie części dostępnego srebra. Taka sytuacja mogłaby mieć miejsce m.in. na skutek działania czynników przeciwnych, do wymienionych przy poziomie MIN. Poziom referencyjny REF będzie stanowić wartość 10% – jest to średni poziom obserwowany w ostatnich latach, który wydaje się ulec (czasowej) stabilizacji.

Założenie 6: Przyjęto również, że wielkość poziomu recyklingu pozostanie bez zmian. Wprawdzie widoczny jest zauważalny spadek ilości odzyskiwanego srebra ze strony fotografii, który z czasem będzie zbliżał się do zera, ze względu na spadek wykorzystania tego surowca w branży fotograficznej, co jest związane z przejściem na fotografie cyfrowe. To z kolei oznacza, że w perspektywie najbliższych lat dodatkowo około 30 Moz będzie można „przesunąć” do innych sektorów, w tym właśnie do PV. Jednocześnie należy pamiętać, że będzie też wzrastać ilość srebra odzyskiwanego z paneli fotowoltaicznych, poddawanych recyklingowi. Aby nie wprowadzać dodatkowych zmiennych, zdecydowano się przyjąć, że będą to wartości zbliżone do obecnego odzysku z fotografii. Oznacza to, że sumarycznie nie wpłynie to na zakładane wartości związane z ilością srebra w podaży.

Założenie 7: Przyrost zainstalowanych mocy podano dla lat: 2030, 2040 oraz 2050. Z kolei za rok bazowy wybrano rok 2020. Obliczone w ten sposób przyrosty mocy (ΔGW) dla kolejnych dekad, zostały podzielone przez 10, aby określić roczną wartość ΔGW , niezbędną do obliczenia wymaganej ilości srebra w ujęciu rocznym.

12.2. Dane wejściowe do modelu

Model składa się z takich etapów: dla każdego scenariusza energetycznego jest wyliczany przyrost zainstalowanej mocy w fotowoltaice, następnie dla każdego scenariusza zużycia srebra jest wyliczany iloczyn przyrostu mocy oraz dwóch pozostałych czynników, tj. intensywności srebra oraz udziału technologii c-Si w sumarycznej produkcji PV. Uzyskany wynik jest dzielony przez 10 (jako że okres pomiędzy kolejnymi scenariuszami jest 10-letni), oraz przeliczany na jednostki – Moz. W ten sposób uzyskujemy macierz danych wyjściowych zakładanego rocznego zużycia srebra w sektorze PV (tab. 20).

W tabeli 17 przedstawiono najważniejsze dane, które zostały użyte do przeprowadzenia obliczeń. Z kolei tabela 18 zawiera kalkulację przyrostu zainstalowanej mocy z udziałem fotowoltaiki. Intensywność udziału technologii opartych na srebrze podana została dla każdego scenariusza (A, B, C) w tabeli 15, a wyniki obliczeń zaprezentowane w tabeli 18 stanowią iloczyn procentowego udziału technologii c-Si oraz przyrostu zainstalowanej mocy w fotowoltaice ogółem (tab. 17).

Tabela 17. Najistotniejsze dane wejściowe użyte w badaniu

Rodzaj danych	Rok	j.m.	Nazwa scenariusza			
			Greenpeace Reference Scenario (REF)	Greenpeace Energy [R] evolution Scenario (E[R])	Greenpeace Advanced Energy [R] evolution Scenario (ADV E[R])	IEA 2020 (IEA)
Produkcja energii elektrycznej z PV	2020	TWh	408	942	1 090	821
	2030	TWh	630	3 844	5 067	6 970
	2040	TWh	832	7 054	9 442	17 031
	2050	TWh	1096	9 914	13 613	23 469
Produkcja energii elektrycznej ogółem	2020	TWh	24639	23 246	23 540	26 778
	2030	TWh	32169	28 497	31 733	37 316
	2040	TWh	39767	37 019	46 121	56 553
	2050	TWh	45752	43 831	61 524	71 164
Udział PV w globalnej produkcji energii elektrycznej	2020	%	1,66	4,05	4,63	3,07
	2030	%	1,96	13,49	15,97	18,68
	2040	%	2,09	19,06	20,47	30,12
	2050	%	2,40	22,62	22,13	32,98

Rodzaj danych	Rok	j.m.	Nazwa scenariusza			
			Greenpeace Reference Scenario (REF)	Greenpeace Energy [R] evolution Scenario (E[R])	Greenpeace Advanced Energy [R] evolution Scenario (ADV E[R])	IEA 2020 (IEA)
Zainstalowana moc z PV	2020	GW	332	732	844	737
	2030	GW	494	2 839	3 725	4 956
	2040	GW	635	4 988	6 678	10 980
	2050	GW	803	6 745	9 295	14 458
Zainstalowana moc ogółem	2020	GW	7 343	7 492	7 645	7 795
	2030	GW	9 130	11 521	13 146	14 933
	2040	GW	10 747	16 112	19 951	26 384
	2050	GW	12 033	19 469	25 835	33 415
Procentowy udział PV w zainstalowanej mocy	2020	%	4,52	9,77	11,04	9,45
	2030	%	5,41	24,64	28,34	33,19
	2040	%	5,91	30,96	33,47	41,62
	2050	%	6,67	34,64	35,98	43,27
Przyrost produkcji energii elektrycznej z PV	2030	TWh	222	2 902	3 977	6 149
	2040	TWh	202	3 210	4 375	10 061
	2050	TWh	264	2 860	4 171	6 438
Przyrost produkcji energii elektrycznej ogółem	2030	TWh	7 530	5 251	8 193	10 538
	2040	TWh	7 598	8 522	14 388	19 237
	2050	TWh	5 985	6 812	15 403	14 611
Przyrost zainstalowanej mocy z PV	2030	GW	162	2 107	2 881	4 219
	2040	GW	141	2 149	2 953	6 024
	2050	GW	168	1 757	2 617	3 478
Przyrost zainstalowanej mocy ogółem	2030	GW	1 787	4 029	5 501	7 138
	2040	GW	1 617	4 591	6 805	11 451
	2050	GW	1 286	3 357	5 884	7 031

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Greenpeace 2050; Net Zero by 2050.

Tabela 18. Przyrost zainstalowanej mocy w PV

Scenariusze		Przyrost mocy [GW] w latach		
		2030	2040	2050
Scenariusz A	(REF)	153,90	126,90	134,40
	(E[R])	2 001,65	1 934,10	1 405,60
	(ADV E[R])	2 736,95	2 657,70	2 093,60
	IEA	4 008,05	5 421,60	2 782,40
Scenariusz B	(REF)	129,60	84,60	67,20
	(E[R])	1 685,60	1 289,40	702,80
	(ADV E[R])	2 304,80	1 771,80	1 046,80
	IEA	3 375,20	3 614,40	1 391,20
Scenariusz C	(REF)	97,20	56,40	33,60
	(E[R])	1 264,20	859,60	351,40
	(ADV E[R])	1 728,60	1 181,20	523,40
	IEA	2 531,40	2 409,60	695,60

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych własnych oraz: Greenpeace 2050; Net Zero by 2050.

12.3. Wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu

W kolejnych tabelach przedstawiono wyniki przeprowadzonych obliczeń dla wszystkich wariantów scenariuszy. W tabeli 19 zamieszczono uzyskane sumy ilości srebra, niezbędnych dla każdego wariantu. Dane te są obliczone jako iloczyn udziału technologii c-Si, udziału srebra oraz przyrostu zainstalowanej mocy, według scenariusza. Ponieważ krok w tych modelach obejmuje okres 10 lat, to wyniki prezentowane są w ujęciu dziesięcioletnim, a jednostką miary jest Mg. W kolejnym kroku przeliczone zostały jednostki miary (Mg na oz, przyjmując 1 Mg = 35 273,96 oz) oraz obliczono wartości w ujęciu rocznym, dzieląc uzyskany wynik przez 10.

Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 20. Zgodnie z założeniami, otrzymano znaczny przedział wartości, obejmujący ilość od 0,59 do 229,49 Moz zapotrzebowania na srebro, w ujęciu rocznym. Najniższe wyniki prognozowane są dla scenariusza odniesienia (REF). Należy jednak zaznaczyć, że jest to model, który zakłada bardzo zachowawcze działania dotyczące OZE, a dane, które zostały wykorzystane do budowy tego scenariusza, nie obejmowały jeszcze okresu gwałtownego wzrostu zainstalowanych instalacji fotowoltaicznych. Diametralnie różne pod tym względem

Tabela 19. Prognozowana ilość srebra niezbędna w danym wariancie scenariusza w ujęciu dziesięcioletnim

Scenariusze		Ilość srebra [Mg] w latach		
		2030	2040	2050
Scenariusz Aa	(REF)	2 154,60	1 522,80	1 344,00
	(E[R])	28 023,10	23 209,20	14 056,00
	(ADV E[R])	38 317,30	31 892,40	20 936,00
	IEA	56 112,70	65 059,20	27 824,00
Scenariusz Ab	(REF)	1 692,90	1 142,10	940,80
	(E[R])	22 018,15	17 406,90	9 839,20
	(ADV E[R])	30 106,45	23 919,30	14 655,20
	IEA	44 088,55	48 794,40	19 476,80
Scenariusz Ac	(REF)	1 385,10	888,30	672,00
	(E[R])	18 014,85	13 538,70	7 028,00
	(ADV E[R])	24 632,55	18 603,90	10 468,00
	IEA	36 072,45	37 951,20	13 912,00
Scenariusz Ba	(REF)	1 814,40	1 015,20	672,00
	(E[R])	23 598,40	15 472,80	7 028,00
	(ADV E[R])	32 267,20	21 261,60	10 468,00
	IEA	47 252,80	43 372,80	13 912,00
Scenariusz Bb	(REF)	1 425,60	761,40	470,40
	(E[R])	18 541,60	11 604,60	4 919,60
	(ADV E[R])	25 352,80	15 946,20	7 327,60
	IEA	37 127,20	32 529,60	9 738,40
Scenariusz Bc	(REF)	1 166,40	592,20	336,00
	(E[R])	15 170,40	9 025,80	3 514,00
	(ADV E[R])	20 743,20	12 402,60	5 234,00
	IEA	30 376,80	25 300,80	6 956,00
Scenariusz Ca	(REF)	1 360,80	676,80	336,00
	(E[R])	17 698,80	10 315,20	3 514,00
	(ADV E[R])	24 200,40	14 174,40	5 234,00
	IEA	35 439,60	28 915,20	6 956,00
Scenariusz Cb	(REF)	1 069,20	507,60	235,20
	(E[R])	13 906,20	7 736,40	2 459,80
	(ADV E[R])	19 014,60	10 630,80	3 663,80
	IEA	27 845,40	21 686,40	4 869,20
Scenariusz Cc	(REF)	874,80	394,80	168,00
	(E[R])	11 377,80	6 017,20	1 757,00
	(ADV E[R])	15 557,40	8 268,40	2 617,00
	IEA	22 782,60	16 867,20	3 478,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych własnych oraz: Greenpeace 2050; Net Zero by 2050.

Tabela 20. Zakładane roczne zużycie srebra w sektorze PV

Scenariusze		Zużycie srebra [Moz] w latach		
		2030	2040	2050
Scenariusz Aa	REF	7,60	5,37	4,74
	E[R]	98,85	81,87	49,58
	ADV E[R]	135,16	112,50	73,85
	IEA	197,93	229,49	98,15
Scenariusz Ab	REF	5,97	4,03	3,32
	E[R]	77,67	61,40	34,71
	ADV E[R]	106,20	84,37	51,69
	IEA	155,52	172,12	68,70
Scenariusz Ac	REF	4,89	3,13	2,37
	E[R]	63,55	47,76	24,79
	ADV E[R]	86,89	65,62	36,92
	IEA	127,24	133,87	49,07
Scenariusz Ba	REF	6,40	3,58	2,37
	E[R]	83,24	54,58	24,79
	ADV E[R]	113,82	75,00	36,92
	IEA	166,68	152,99	49,07
Scenariusz Bb	REF	5,03	2,69	1,66
	E[R]	65,40	40,93	17,35
	ADV E[R]	89,43	56,25	25,85
	IEA	130,96	114,74	34,35
Scenariusz Bc	REF	4,11	2,09	1,19
	E[R]	53,51	31,84	12,40
	ADV E[R]	73,17	43,75	18,46
	IEA	107,15	89,25	24,54
Scenariusz Ca	REF	4,80	2,39	1,19
	E[R]	62,43	36,39	12,40
	ADV E[R]	85,36	50,00	18,46
	IEA	125,01	102,00	24,54
Scenariusz Cb	REF	3,77	1,79	0,83
	E[R]	49,05	27,29	8,68
	ADV E[R]	67,07	37,50	12,92
	IEA	98,22	76,50	17,18
Scenariusz Cc	REF	3,09	1,39	0,59
	E[R]	40,13	21,23	6,20
	ADV E[R]	54,88	29,17	9,23
	IEA	80,36	59,50	12,27

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych własnych oraz: Greenpeace 2050; Net Zero by 2050.

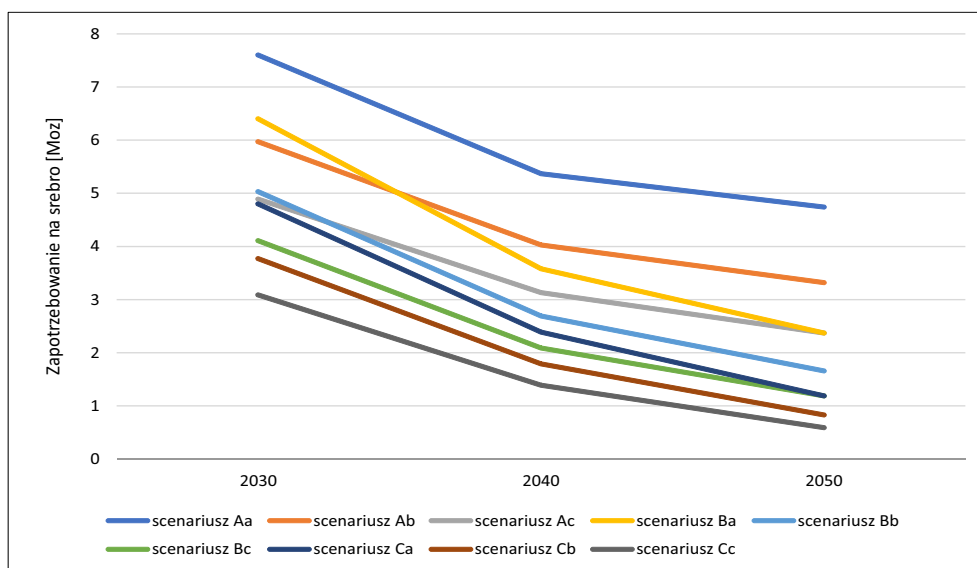
są oba scenariusze (r)ewolucji. Pomimo że pochodzą one z tego samego okresu, zakładają jednak olbrzymi wzrost znaczenia OZE, w tym PV. O ile w scenariuszu (REF) na rok 2050 zakładana moc fotowoltaiki to zaledwie 803 GW, o tyle w (E[R]) już 6745 GW, a w (ADV E[R]) – aż 9295 GW.

Jeszcze wyższe wartości występują w przypadku modelu IEA – w roku 2050 prognozowana moc PV ma wynosić 14 458 GW.

12.4. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników – dla różnych scenariuszy

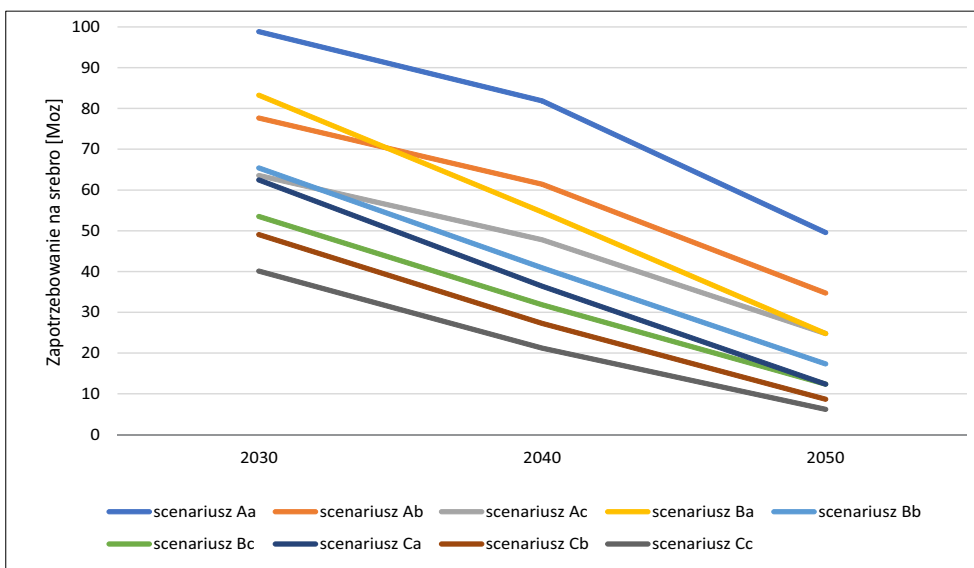
Dla większej czytelności otrzymanych wyników, na kolejnych wykresach (rys. 23–32) zaprezentowano kształtowanie się popytu na srebro, w zależności od wybranego kryterium.

Wykresy z rysunków 23–26 przedstawiają ilości srebra niezbędne do zaspokojenia popytu na ten surowiec, w zależności od przyjętego scenariusza. Analizując te wykresy, można dostrzec, że występują nie tylko rozbieżności w ilości potrzebnego srebra, ale także związane ze szczytem popytu, który w części scenariuszy wypada w roku 2030, w innych zaś – w roku 2040. Jednakże, we wszystkich modelach przewidziano spadek zapotrzebowania w ostatniej dekadzie analizowanego okresu, jednocześnie wskazując, że w roku 2050 zapotrzebowanie na ten metal będzie mniejsze niż w roku 2030 oraz 2040, oczywiście w odniesieniu do tego samego scenariusza.



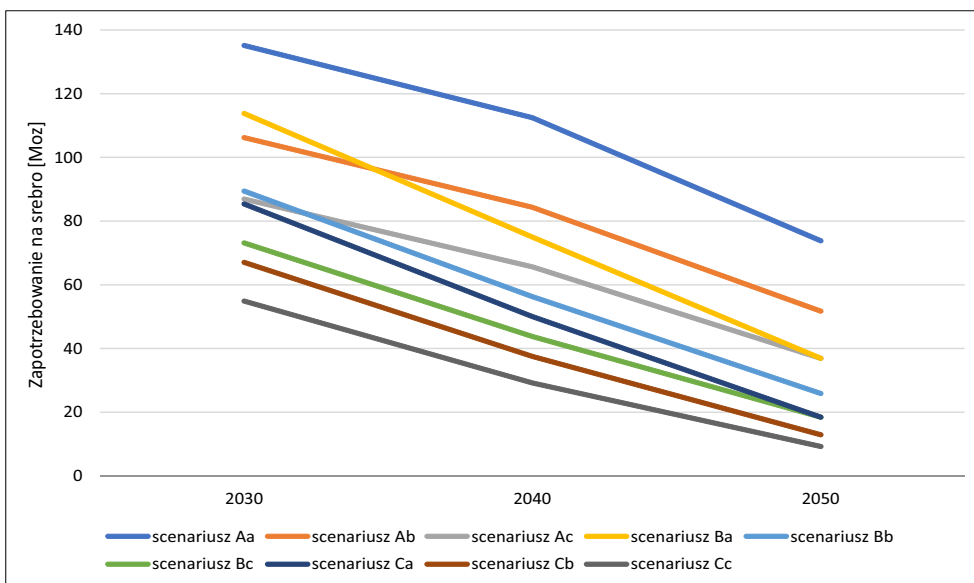
Rys. 23. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach odniesienia (REF)

Źródło: opracowanie własne



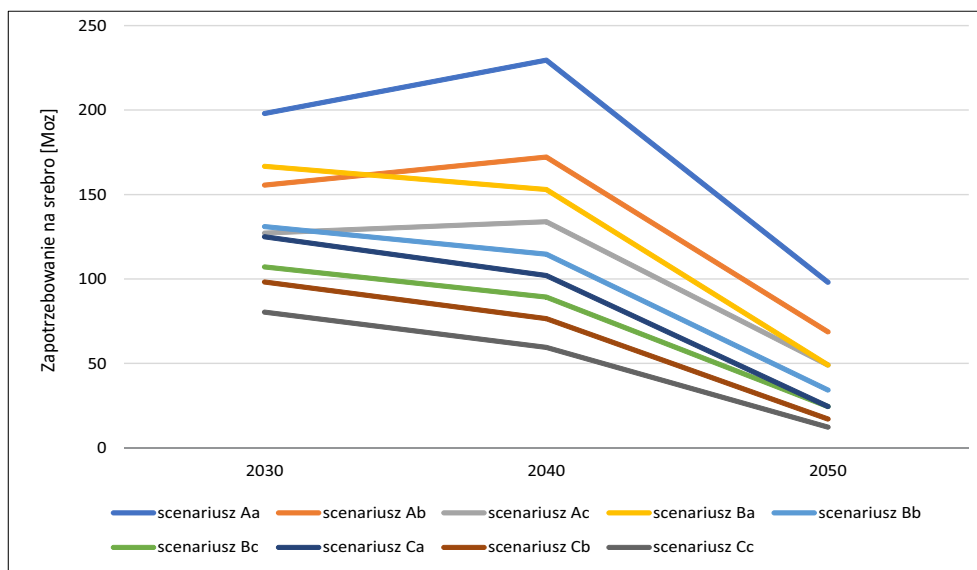
Rys. 24. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach (r)ewolucji (E[R])

Źródło: opracowanie własne



Rys. 25. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach zaawansowanej (r)ewolucji (ADV E[R])

Źródło: opracowanie własne



Rys. 26. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach IEA 2020 (IEA)

Źródło: opracowanie własne

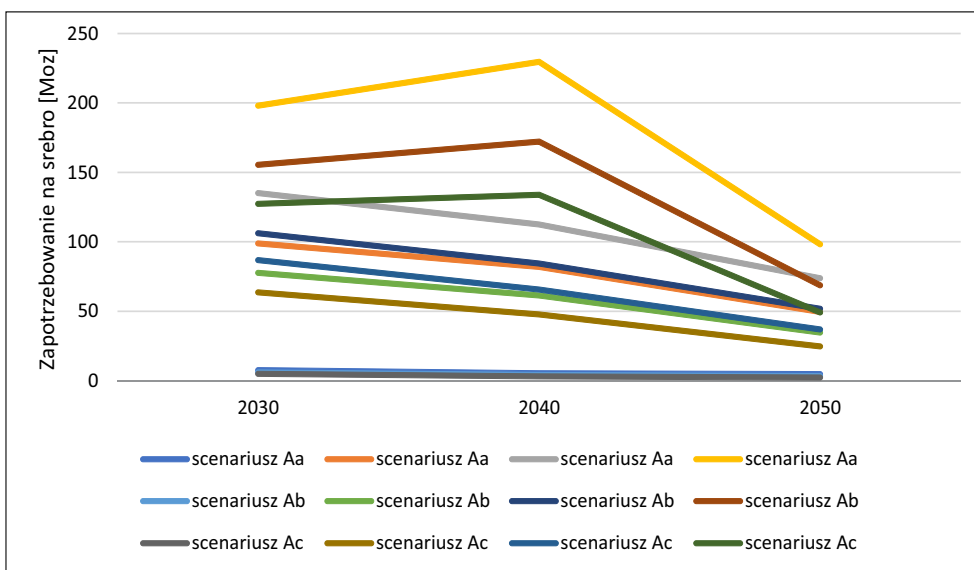
12.5. Prezentacja graficzna otrzymanych wyników – dla wybranych determinant

Z kolei wykresy z rysunków 27–32 prezentują wpływ determinantów na kształtowanie się zapotrzebowania na srebro. Widoczne tu są różnice, wynikające z udziału technologii opartych na srebrze (kolejne determinanty: A, B, C wskazują na stopień wspomnianego udziału, zgodnie z tabelą 15) oraz wielkości użytego srebra na każdą jednostkę zainstalowanej mocy, tzn. wat – zgodnie z tabelą 16 (kolejne determinanty: a, b, c).

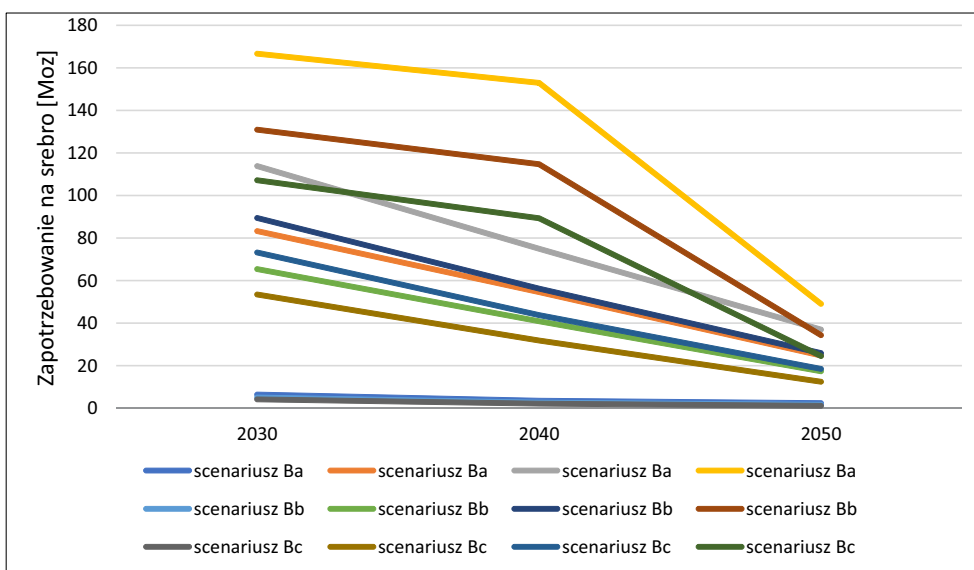
Analiza tych wykresów pozwala stwierdzić, które czynniki mają największy wpływ na rozkład popytu, a także jak kształtuje się zapotrzebowanie na srebro, w zależności od przyjętych założeń, tj.: rodzaju scenariusza, ilości użytego w ogniwach srebra oraz wielkości udziału technologii c-Si w całej fotowoltaice.

12.6. Zestawienie otrzymanych wyników

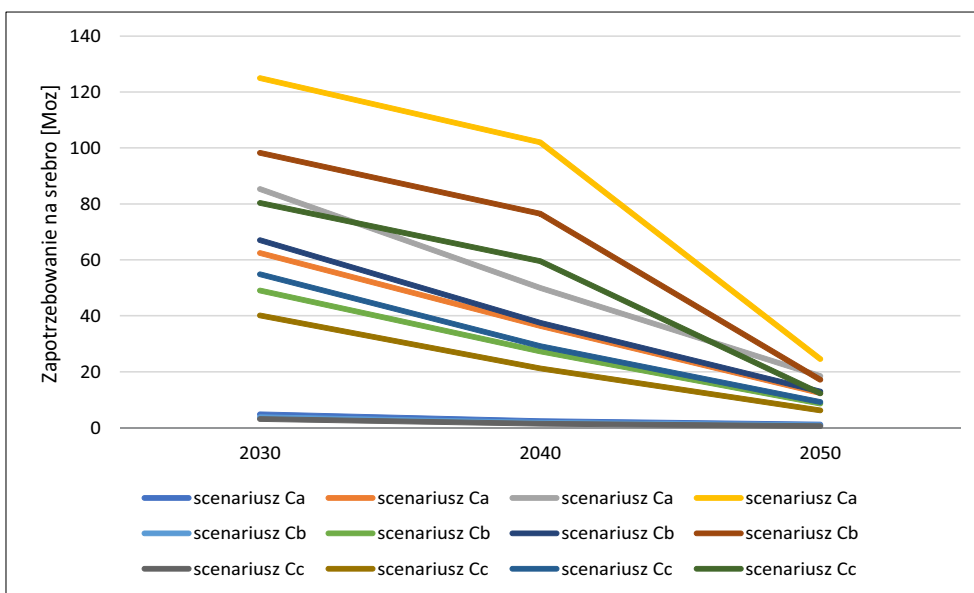
Tabela 21 jest końcowym etapem modelu, w którym uzyskuje się dane wyjściowe. Kolorem jasnoszarym zostały zaznaczone wartości MIN, czyli od 60,00 do 119,99 Moz. Jest to, zgodnie z założeniami, pierwszy próg ostrzegawczy, który



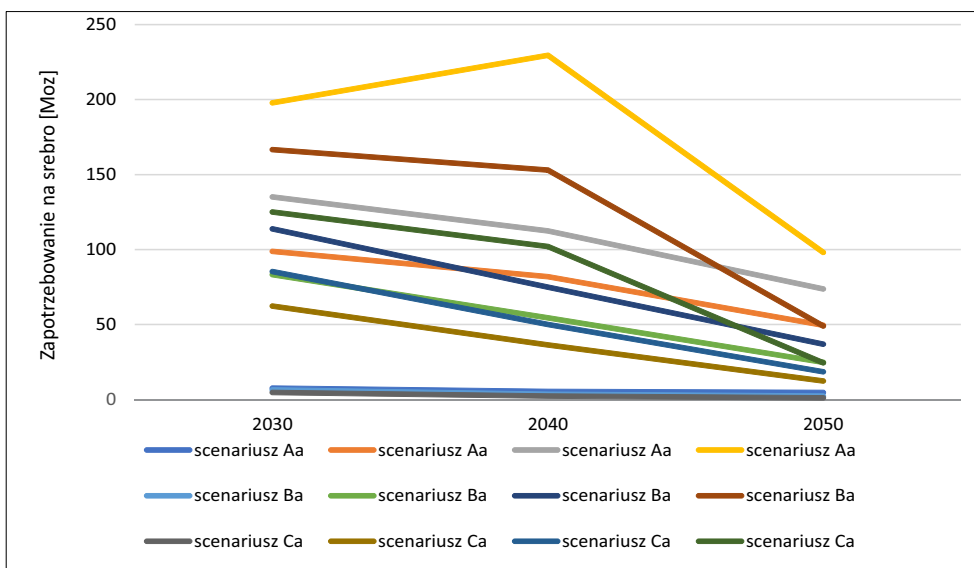
Rys. 27. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta A
Źródło: opracowanie własne



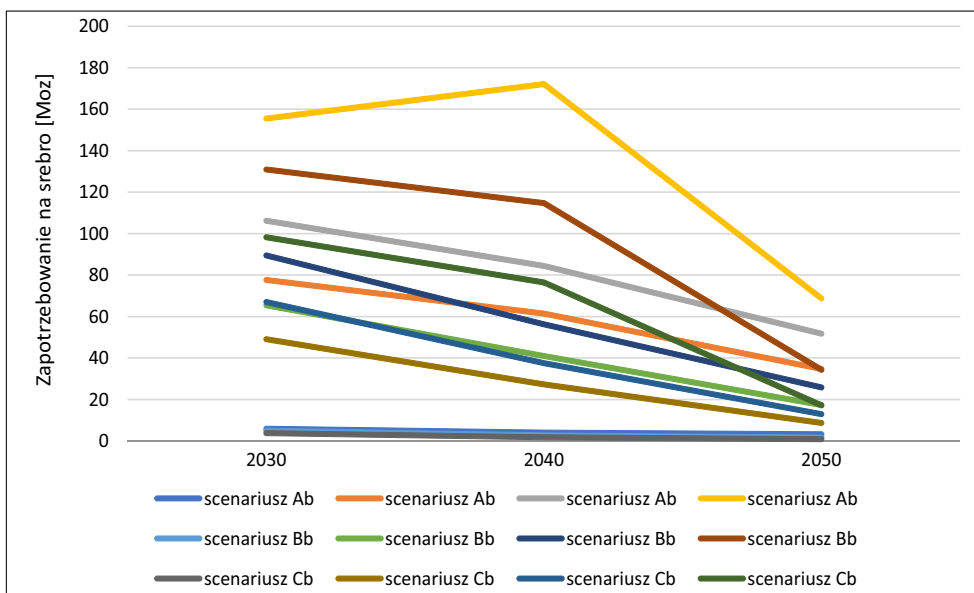
Rys. 28. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta B
Źródło: opracowanie własne



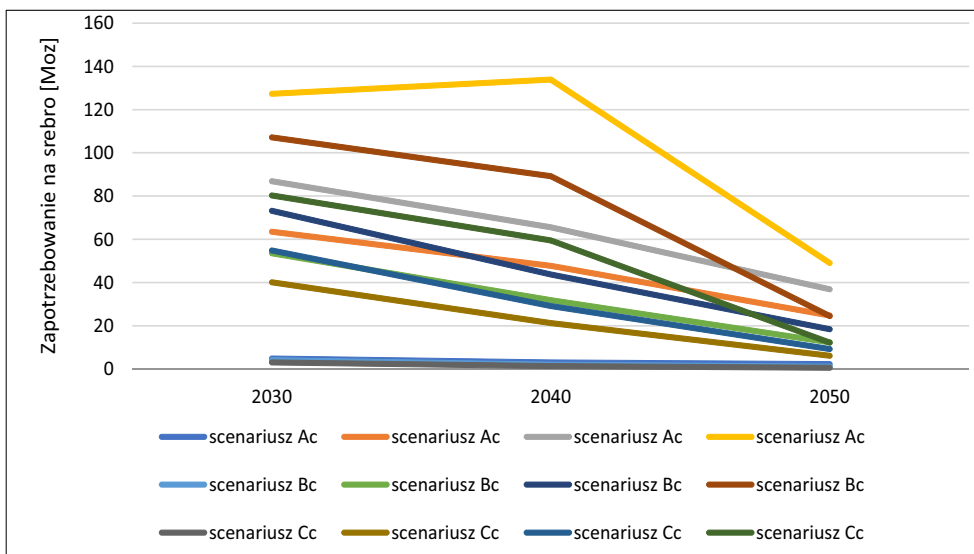
Rys. 29. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta C
Źródło: opracowanie własne



Rys. 30. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta A
Źródło: opracowanie własne



Rys. 31. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta b
Źródło: opracowanie własne



Rys. 32. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta c
Źródło: opracowanie własne

Tabela 21. Zapotrzebowanie na srebro w ujęciu rocznym (Moz) oraz wartości ostrzegawcze

Scenariusze		2030	2040	2050
Scenariusz Aa	(REF)	7,60	5,37	4,74
	(E[R])	98,85	81,87	49,58
	(ADV E[R])	135,16	112,5	73,85
	IEA	197,93	229,49	98,15
Scenariusz Ab	(REF)	5,97	4,03	3,32
	(E[R])	77,67	61,40	34,71
	(ADV E[R])	106,2	84,37	51,69
	IEA	155,52	172,12	68,7
Scenariusz Ac	(REF)	4,89	3,13	2,37
	(E[R])	63,55	47,76	24,79
	(ADV E[R])	86,89	65,62	36,92
	IEA	127,24	133,87	49,07
Scenariusz Ba	(REF)	6,40	3,58	2,37
	(E[R])	83,24	54,58	24,79
	(ADV E[R])	113,82	75,00	36,92
	IEA	166,68	152,99	49,07
Scenariusz Bb	(REF)	5,03	2,69	1,66
	(E[R])	65,40	40,93	17,35
	(ADV E[R])	89,43	56,25	25,85
	IEA	130,96	114,74	34,35
Scenariusz Bc	(REF)	4,11	2,09	1,19
	(E[R])	53,51	31,84	12,40
	(ADV E[R])	73,17	43,75	18,46
	IEA	107,15	89,25	24,54
Scenariusz Ca	(REF)	4,8	2,39	1,19
	(E[R])	62,43	36,39	12,40
	(ADV E[R])	85,36	50,00	18,46
	IEA	125,01	102,00	24,54
Scenariusz Cb	(REF)	3,77	1,79	0,83
	(E[R])	49,05	27,29	8,68
	(ADV E[R])	67,07	37,50	12,92
	IEA	98,22	76,50	17,18
Scenariusz Cc	(REF)	3,09	1,39	0,59
	(E[R])	40,13	21,23	6,20
	(ADV E[R])	54,88	29,17	9,23
	IEA	80,36	59,50	12,27

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych własnych oraz: Greenpeace 2050; Net Zero by 2050.

może sugerować niedobór srebra w przypadku, gdyby ilość tego surowca w fotowoltaice mogła sięgać nie więcej, niż 5% wartości odniesienia, czyli 1200 Moz. Z kolei kolorem ciemnoszarym wskazano przekroczenie drugiego progu – REF, czyli 10% wartości odniesienia. Przedział ten określony został, zgodnie z założeniami przedstawionymi wcześniej, pomiędzy 120 a 239,99 Moz.

Przekroczenie 120 Moz oznacza, że przyjmując powyższe założenia, mogą wystąpić braki metalu dla sektora fotowoltaicznego, gdyby mogła ona liczyć na 10-procentowy udział w globalnej podaży. Próg trzeci – MAX, zdefiniowany jako 20%, tj. 240 Moz, w żadnym ze scenariuszy nie został osiągnięty, aczkolwiek w przypadku modelu Aa IEA, a więc zakładającego zarówno największy wzrost zainstalowanej mocy z PV, a jednocześnie charakteryzującego się istotnym udziałem technologii c-Si ze stosunkowo dużą intensywnością srebra (na wat), wartość ta oscyluje w jego pobliżu i wynosi blisko 230 Moz.

Naturalnie, w scenariuszach o najwyższych wartościach czynników, które zostały uwzględnione w badaniu (a więc przede wszystkim Aa, w mniejszym stopniu: Ab, Ba) występuje największa ilość przekroczonych wartości ostrzegawczych. Z kolei modele Cc oraz – w mniejszym stopniu Cb i Bc – to stosunkowo nieliczne pola jasnoszare, sygnalizujące przekroczenie progu ostrzegawczego, z zerową ilością osiągniętych wartości drugiego progu, na poziomie 120 Moz (pola ciemnoszare).

Posumowanie i wnioski

Wyczerpalność paliw kopalnych staje się coraz większym problemem dla ludzkości. Aby utrzymać dotychczasowy poziom życia, musimy zadbać o zmianę technologii na bardziej oszczędne surowcowo i energetycznie. Dobrym rozwiązaniem wspomnianego problemu jest recykling surowców, który zmniejszy zapotrzebowanie na ich wydobycie. Jednak nie dotyczy to surowców energetycznych, których nie da się odzyskać. W tym przypadku dobrym rozwiązaniem jest pozyskanie energii z surowców, które się odnawiają w sposób naturalny (biomasa, odpady organiczne) lub nie wyczerpują (energia słońca, wody i wiatru). Energia pochodząca z OZE ma dodatkową zaletę – jej produkcja nie powoduje emisji gazów cieplarnianych. Jednak instalacje do pozyskiwania energii z OZE zawierają w sobie wiele cennych surowców kopalnych, które szybko ulegają wyczerpaniu. Dlatego tak ważne jest zbadanie problemu przyszłego zapotrzebowania na surowce, które mogą być użyte do produkcji instalacji OZE, zapewnienie bowiem wystarczającej ilości surowców jest kluczowe dla realizacji założeń zawartych zarówno w krajowych, jak i unijnych celach, zmierzających do zeroemisyjnej energetyki, opartej na czystej, w pełni odnawialnej energii. Z tego powodu już teraz niezbędne jest wyznaczenie wartości przyszłego zapotrzebowania ze strony OZE, w tym fotowoltaiki, na poszczególne surowce, ze szczególnym uwzględnieniem tych, których pozyskanie jest szczególnie wrażliwe.

Przeprowadzone badanie poświęcono rynkowi srebra, które odgrywa istotne znaczenia dla sektora fotowoltaiki, który podlega ciągłym procesom transformacji, jednak nie ulega wątpliwości, że nabiera coraz większego znaczenia nie tylko jako źródło czystej (zielonej) energii, ale także zajmuje coraz istotniejsze miejsce w całym koszyku energii elektrycznej w ujęciu globalnym. Uwzględniając konieczność jeszcze większego zaangażowania ludzkości w produkcję zielonej energii w kontekście przyspieszających zmian klimatycznych i środowiskowych, wydaje się, że nie ma już odwrotu od masowego wdrażania fotowoltaiki na całym świecie. Szczególnie należy uwzględnić w tym przypadku fakt, że kraje znajdujące się na ścieżce dynamicznego rozwoju będą zgłaszały szybko rosnące zapotrzebowanie na energię. Widać to na przykładzie Chin, które już teraz są głównym beneficjentem tych zmian (jednakże dopiero na początkowym etapie, biorąc pod uwagę całkowitą liczbę ludności, obszar oraz PKB per capita), Indii (jeszcze wcześniejszy etap),

a w przyszłości do tych krajów prawdopodobnie dołączą także inne, jak np. kraje Afryki. Rozwój gospodarczy w tych regionach, z wymienionych powyżej względów (miliardowe społeczeństwa na ogromnym terytorium, które obecnie zużywają nieznaczne ilości energii) może osiągnąć ogromne rozmiary, powodując wręcz lawinowy wzrost zużycia energii elektrycznej, niezbędnej do dalszego rozwoju. Z drugiej strony, kraje te mogą od razu inwestować w infrastrukturę opartą na odnawialnych źródłach energii, które – jak wspomniano – już obecnie, na etapie budowy nowych elektrowni, są tylko nieznacznie droższe od tych opartych na paliwach kopalnych. W przyszłości te różnice mogą się zatrzeć, bądź też nawet zmienić na korzyść nowych uruchomień, opartych na OZE. Taki scenariusz oznacza, że przyrost zapotrzebowania na nowe instalacje OZE (zarówno w kontekście nowych uruchomień, jak i wymiany tych opartych na surowcach nieodnawialnych) może osiągnąć tak duże wartości, że nie zostanie on w pełni zaspokojony ze względu na ograniczenia produkcyjne i/lub surowcowe.

Dodatkowo, nie wolno pominąć krajów i regionów, w których wprawdzie nie występuje już tak dynamiczny wzrost zapotrzebowania na energię, jednak może to się zmienić z kilku względów. Po pierwsze, zmiany klimatyczne powodują, że rośnie zużycie energii w celu zapewnienia komfortu termicznego, to jest klimatyzacji, zarówno w regionach, które już wcześniej korzystały z takich rozwiązań, jak też i na obszarach, które pod wpływem zmian klimatycznych, także coraz częściej są narażone na wysokie, a nawet ekstremalne temperatury. Po drugie, ze względu na nowe zasady polityki energetycznej (zarówno w ramach uzgodnień globalnych, jak i regionalnych), coraz więcej rozwiązań z zakresu ogrzewania, opartych jest na energii elektrycznej. Są to zarówno tradycyjne grzejniki elektryczne i klimatyzatory mające funkcję ogrzewania, jak i ostatnio przeżywające ogromny wzrost zainteresowania – pompy ciepła. Takich rozwiązań może być jeszcze więcej, gdyż gospodarka zeroemisyjna zorientowana jest na wyeliminowanie kopalni w celach grzewczych, na rzecz rozwiązań takich, jak właśnie np. pompa ciepła, połączona ze źródłami OZE.

Ostatnią kwestią, ale nie najmniej istotną, jest także (wprawdzie stopniowa, jednakże sukcesywna, a w przyszłości zapewne znacznie przyspieszająca, ze względu na konieczność wypełnienia uzgodnień klimatycznych, jak również podyktowana bezpieczeństwem energetycznym) wymiana elektrowni opartych na surowcach nieodnawialnych (głównie węgla), zarówno tych, których okres użytkowania już dobiega końca, jak i prawdopodobnie także tych, które jeszcze mają planowane kilka dekad eksploatacji, jednak z wymienionych względów (środowiskowo-klimatycznych, połączonych z wysokimi cenami i/bądź dostępnością kopalni) ich dalsze użytkowanie nie będzie możliwe bądź opłacalne. Wszystkie te zmiany wpłyną w znaczący sposób na przyszłe instalacje energetyczne. Odwrót od rozwiązań opartych na źródłach odnawialnych jest już niemożliwy, a jedynym pytaniem jest, jak szybkie będą to zmiany.

Tak istotne zwiększenie zainstalowanej mocy, przy jednoczesnych zmianach w kierunku „zielonych” rozwiązań, zgodnie z opisanymi w powyższym badaniu scenariuszami oraz założeniami, budzi obawy o wystarczającą ilość surowców, koniecznych do budowy instalacji elektrycznych i elektrowni opartych na OZE. W przypadku fotowoltaiki, krytycznym metalem będzie prawdopodobnie srebro, które jest niezbędne do produkcji paneli, a jednocześnie ilość tego surowca jest ograniczona – zarówno ze względu na dostępność ze źródeł pierwotnych (to jest wydobywania), jak również ze względu na popyt ze strony innych sektorów – czy to innych gałęzi przemysłu, czy też poprzez zapotrzebowanie sektora inwestycyjnego, jubilerskiego i innych. Zatem ograniczenia związane z dostępnością tego metalu, mogą spowodować zmniejszenie wielkości produkcji nowych instalacji, co może z kolei doprowadzić do spowolnienia procesu przechodzenia na energetykę zeroemisyjną.

Z przeprowadzonych badań wynika, że takie zagrożenia występują dla części przyjętych scenariuszy oraz założeń, co oznaczać może, że w pewnych warunkach, tzn. przy jednoczesnym wystąpieniu wyższych wartości determinantów, nastąpi ograniczenie dostępności srebra dla sektora fotowoltaicznego. W szczególności, zauważyć należy, że gwałtowne zwiększenie instalowanych mocy w krótkim okresie (np. jednej dekadzie), powiązane z nieznaczną poprawą efektywności ogniw (charakteryzujących się w tym przypadku ilością srebra w przeliczeniu na jednostkę mocy) oraz pozostaniem przy znacznym udziale technologii opartych na tym surowcu, skutkować może skokowym przyrostem zapotrzebowania, które przekroczy dostępne (dla PV) ilości.

Z wymienionych wcześniej względów, to jest przyspieszonego przejścia na odnawialne źródła energii przez kraje i regiony rozwinięte – między innymi Europę, USA – oraz rozwój gospodarczy pozostałych regionów (a co za tym idzie, znaczne zwiększenie zapotrzebowania na energię elektryczną, zapewne przy nowych uruchomieniach elektrowni, głównie opartych już na OZE), z dużym prawdopodobieństwem można założyć, że najbliższe 10–15 lat może być kluczowe pod względem nowych instalacji, a co za tym idzie – krytyczne pod względem zapewnienia wystarczającej ilości surowców, w tym – dla fotowoltaiki – surowca najbardziej narażonego na niedobór, to jest srebra.

Przeprowadzona analiza wpływu determinantów, wraz z innymi wątkami badania prowadzą do następujących wniosków:

1. Istnieje niebezpieczeństwo ograniczenia produkcji paneli fotowoltaicznych, związane z dostępnością srebra, niezbędnego do ich produkcji. Ryzyko to jest tym większe, im bardziej będzie rosło zapotrzebowanie na energię w ujęciu globalnym, jak również na energię pozyskiwaną ze źródeł OZE. Kształtowanie się tych czynników będzie odgrywało istotną rolę, w skrajnych wypadkach doprowadzając (przy gwałtownym wzroście zużycia energii na świecie, przyspieszonej transformacji w kierunku „zielonej energii”) do niedoborów tego metalu, a przeznaczonego dla sektora PV.

2. Zalecana jest intensyfikacja badań oraz wdrożenie rozwiązań, ograniczających lub eliminujących srebro w ogniwach PV, opartych o rozwiązania c-Si. Obecne badania wskazują, że następuje ciągły proces udoskonalania procesu wytwarzania modułów fotowoltaicznych opartych na krzemie. Dotyczy to także między innymi srebra, którego zużycie, dzięki rozwojowi procesów technologicznych produkcji, jest stale zmniejszane (w przeliczeniu zarówno na jednostkę mocy, ale także na jednostkę powierzchni modułu). Przy czym podkreślić należy, że spadek ten jest coraz powolniejszy, a ograniczenia fizyczne i chemiczne powodują, że w pewnym momencie może nastąpić zatrzymanie tego procesu, stabilizując na określonym poziomie wykorzystanie tego metalu (w przeliczeniu na wat lub metr kwadratowy modułu). Na obecnym etapie nie znaleziono substytutów, które mogłyby zastąpić srebro, jednak prowadzone badania wskazują, że przyjęcie pewnych kompromisów może doprowadzić do znalezienia rozwiązania, które pozwoli na bądź to całkowite wyeliminowanie srebra z modułów fotowoltaicznych typu c-Si, bądź też jego ograniczenie i zminimalizowanie do jedynie niezbędnych zastosowań.
3. Zalecana jest intensyfikacja badań oraz wdrożenie rozwiązań, skutkujących masowym użyciem innych technologii, niż oparte na c-Si. Jak wskazano, obecnie produkowane i stosowane na masową skalę rozwiązania, bazują w ogromnej większości (tj. w ponad 90%) na rozwiązaniach opartych na krzemie, a więc wykorzystujących srebro. Z drugiej strony, w warunkach laboratoryjnych uzyskiwane są obiecujące wyniki, związane z modułami opartymi na zupełnie innych rozwiązaniach, które nie wymagają użycia srebra, a przewyższenie ograniczeń, które obecnie nie pozwalają na wdrożenie ich do masowej produkcji (np. wysoka podatność na czynniki atmosferyczne, powodujące ich szybką degradację, czy krótka żywotność/trwałość), może spowodować pełne przejście na nowe technologie, co spowoduje całkowity spadek zapotrzebowania na ten surowiec.
4. W przypadku, gdy moduły PV nadal będą oparte na „klasycznych” rozwiązaniach c-Si, zalecane jest rozłożenie produkcji w czasie, aby – w miarę możliwości – uniknąć szczytu zapotrzebowania, który mógłby przekroczyć dostępność srebra na rynku globalnym. Niestety, jest to o tyle trudne do zrealizowania, gdyż z jednej strony nie jest znany przyszły popyt na ten rodzaj OZE (który musiałby być prognozowany z dużym prawdopodobieństwem przynajmniej na najbliższe 2–3 dekady), a z drugiej – jest mało prawdopodobne, aby któryś podmiot (np. kraj, region, ewentualnie producent fotowoltaiki czy inny, powiązany z PV) dobrowolnie zrezygnowałby z zakupu bądź produkcji, mając na względzie długoterminowe zrównoważenie popytu i podaży na rynku srebra. W takim wypadku, należałoby wprowadzić inne rozwiązania, np. systemowe, aby odgórnie określić możliwe wielkości zużycia, produkcji, czy też instalacji fotowoltaicznych, opartych na modułach krzemowych. Wydaje się to jednak mało realne, w związku z czym należy dążyć, aby taka konieczność nie nastąpiła, właśnie poprzez realizację dwóch powyższych punktów.

Reasumując, ze względu na fakt, że rynek OZE, w tym fotowoltaiki, jest obecnie na etapie intensywnego rozwoju i transformacji, należy wziąć pod uwagę fakt szybkich przemian, jakie zachodzą i będą zachodziły w tym obszarze. Scenariusze, które zostały użyte w powyższych badaniach, jak wskazano, ulegają ciągłym ewolucjom, uwzględniając zmiany, które stale mają miejsce i wpływają na te prognozy.

Należy pamiętać, że zarówno całkowite zapotrzebowanie na energię w ujęciu globalnym, jak i wielkość OZE w miksie energetycznym, jak również udział PV w OZE, a w końcu – partycypacja technologii fotowoltaicznych opartych na krzemie w całkowitej produkcji tego rodzaju OZE, powodują, że przewidywanie przyszłego popytu na srebro przez sektor fotowoltaiki, to równanie z wieloma niewiadomymi, które zmieniają się w czasie. Horyzont czasowy powyższych badań, obejmujący 30 lat, jest odległy, co oznacza, że niezbędny może okazać się okresowy przegląd scenariuszy z uwzględnieniem zachodzących zmian.

Bibliografia

- Adamczyk, G. 2022. Emisje w 2021 roku wróciły na poziom sprzed pandemii. Naukowcy mieli rację – 2020 był wyjątkiem, 14.01.2022, <https://swiatoze.pl/emisje-w-2021-roku-wrocily-na-poziom-sprzed-pandemii-naukowcy-mieli-racje-2020-byl-wyjatkciem/> [dostęp: 28.03.2022].
- Adamiak, B. 2021. O dwóch takich, co chcieli zawładnąć rynkiem srebra. Historia braci Hunt, <https://goldenmark.com/pl/mysaver/bracia-hunt/> [dostęp: 18.07.2020].
- Allen, L. 2009. *The Encyclopedia of Money*, ABC-CLIO, Santa Barbara.
- Andersson, B.A. i Jacobsson, S. 2000. Monitoring and assessing technology choice: the case of solar cells. *Energy Policy*, 28(14), s. 1037–1049, DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00090-2.
- AON, <https://aon.mediaroom.com/2022-01-25-Aon-343-Billion-in-Global-Weather-,Catastrophe-Related-Economic-Losses-Reported-in-2021,-Up-From-297-Billion-in-2020> [dostęp: 9.04.2022].
- Apergis, I. i Apergis, N. 2019. Silver prices and solar energy production. *Environmental Science and Pollution Research* 26(9), s. 8525–8532, DOI: 10.1007/S11356-019-04357-1.
- Baran, J. 2020. Analiza czynników kształtujących ceny surowców na rynkach światowych. Praca dyplomowa magisterska, niepublikowana. WZ AGH.
- Benedict, B.A. 2017. Benefits of Scenario Planning Applied to Energy Development. *Energy Procedia* 107, s. 304–308, DOI: 10.1016/J.EGYPRO.2016.12.157.
- BP Statistical Review of World Energy, 2022. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> [dostęp: 14.08.2022].
- Carrington, G. i Stephenson, J. 2018. The politics of energy scenarios: Are International Energy Agency and other conservative projections hampering the renewable energy transition? *Energy Research & Social Science*, 46, s. 103–113, DOI: 10.1016/J.ERSS.2018.07.011.
- Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Brutschin, E. i Sovacool, B. 2018. Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Research and Social Science* 37, s. 175–190, DOI: 10.1016/j.erss.2017.09.015.
- Chowdhury, M., Rahman, K.S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., Tiong, S.K., Sopian, K. i Amin, N. 2020. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*. 27, DOI: 10.1016/j.esr.2019.100431.
- CIRE.PL, Centrum Informacji o Rynku Energii, Fit for 55 zablokowany w Parlamencie Europejskim, 3 projekty odesłane do komisji, <https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/parlament-europejski-odrzucl-sprawozdanie-o-rewizji-unijnego-systemu-handlu-emisjami> [dostęp: 9.06.2022].
- Clark, J. 2019. Is the Gold/Silver Ratio Headed to 100? Three Questions to Answer, <https://goldsilver.com/blog/is-the-goldsilver-ratio-headed-to-100-three-questions-to-answer/> [dostęp: 16.07.2020].
- COP-27, <https://cop27.eg/#/> [dostęp: 26.09.2022].
- Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J. i Vignati, E. 2019. Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries, EUR 29849 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, DOI: 10.2760/687800, JRC117610.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Olivier, J.G.J., Grassi, G., Rossi, S. i Vignati, E. 2021. GHG emissions of all world countries –

- 2021 Report, EUR 30831 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, DOI: 10.2760/173513, JRC126363.
- Cyrzan, M. 2013. Perspektywa powrotu do standardu złota Stanów Zjednoczonych Ameryki w kontekście kryzysu z 2007 roku, Uniwersytet Gdański.
- Davidsson, S. i Höök, M. 2017. Material requirements and availability for multi-terawatt deployment of photovoltaics. *Energy Policy* 108, s. 574–582, DOI: 10.1016/j.enpol.2017.06.028.
- Davies, A., Castan Broto, V. i Hügel, S. 2021. Editorial: Is There a New Climate Politics? *Politics and Governance* 9, s. 1–7, DOI: 10.17645/pag.v9i2.4341.
- Decyzja Rady UE 2016/590 z 11 kwietnia 2016 r., w sprawie podpisania, w imieniu Unii Europejskiej, porozumienia paryskiego. *Dz.Urz. UE L 103* z 19 kwietnia 2016 r.
- Deng, R., Chang, N., Monteiro Lunardi, M., Dias, P., Bilbao, J., Ji, J. i Chong, C. 2020. Remanufacturing end-of-life silicon photovoltaics: Feasibility and viability analysis. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 29, DOI: 10.1002/pip.3376.
- EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research, 2021 report, European Commission, https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2021 [dostęp: 18.09.2022].
- Elshkaki, A. 2019. Materials, energy, water, and emissions nexus impacts on the future contribution of PV solar technologies to global energy scenarios. *Sci Rep.* 9(1), DOI: 10.1038/s41598-019-55853-w.
- Elshkaki, A. i Graedel, T.E. 2015. Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply. *Applied Energy* 158, s. 167–177, DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.066.
- EPA, United States Environmental Protection Agency, Global Greenhouse Gas Emissions Data, <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> [dostęp: 11.09.2022].
- FACT SHEET: President Biden’s Leaders’ Summit on Climate, 23.04.2021, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/04/23/fact-sheet-president-bidens-leaders-summit-on-climate/> [dostęp: 27.07.2022].
- Feltrin, A. i Freundlich, A. 2008. Material considerations for terawatt level deployment of photovoltaics. *Renewable Energy* 33(2), s. 180–185, DOI: 10.1016/j.renene.2007.05.024.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> [dostęp: 06.06.2021].
- Fry, C. 2008. Świat największe wyzwania ekologiczne, Poznań: Wydawnictwo Elipsa.
- Gadzała, Ł. 2020. Grenlandia będzie sprzedawać wodę z topniejących lodowców? 21.02.2020, <https://www.euractiv.pl/section/energia-i-srodowisko/news/grenlandia-bedzie-sprzedawac-wode-z-topniejacych-lodowcow/> [dostęp: 9.04.2022].
- García-Olivares, A. 2015. Substituting silver in solar photovoltaics is feasible and allows for decentralization in smart regional grids. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 17, s. 15–21, DOI: 10.1016/j.eist.2015.05.004.
- Ghasemian, S., Faridzad, A., Abbaszadeh, P., Taklif, A., Ghasemi, A. i Hafezi, R. 2020. An overview of global energy scenarios by 2040: identifying the driving forces using cross-impact analysis method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, s. 1–24, DOI: 10.1007/s13762-020-02738-5.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M.D., Wagner, N. i Gorini, R. 2019. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews* 24, s. 38–50, DOI: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- Glunz, S., Preu, R. i Biro, D. 2012. Crystalline Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and Future Developments. *Comprehensive Renewable Energy*, Vol. 1, Ch 1.16, DOI: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00117-7.
- GOLDCO, Piotr Kowalski S.K.A., <https://goldco.pl/blog/popyt-i-podaz-srebra-czyli-kto-kupuje-i-kto-sprzedaje-srebro/> [dostęp: 18.07.2020].
- Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T. i Toro, L. 2014. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 123, s. 239–248, DOI: 10.1016/j.solmat.2014.01.012.
- Grandell, L; Thorenz, A. 2014. Silver supply risk analysis for the solar sector. *Renewable Energy* 69, pp. 157–165, DOI: 10.1016/j.RENENE.2014.03.032.

- Grandell, L. i Höök, M. 2015. Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability* 7, s. 11818–11837, DOI: 10.3390/su70911818.
- Greenpeace, 2015. Energy [r]evolution, a sustainable world energy outlook 2015. https://www.greenpeace.de/publikationen/greenpeace_energy-revolution_erneuerbare_2050_20150921.pdf [dostęp: 21.08.2022].
- Greenpeace 2050, https://www.duesseldorf.greenpeace.de/sites/www.duesseldorf.greenpeace.de/files/greenpeace_energy-revolution_erneuerbare_2050_20150921.pdf [dostęp: 21.10.2021].
- Haye, s A. 2022, What Is the Gold Reserve Act of 1934?, <https://www.investopedia.com/terms/g/gold-reserve-act-1934.asp> [dostęp: 12.07.2020].
- Historia Srebra i Srebro jako waluta 2020, GOLDCO Piotr Kowalski S.K.A., <https://goldco.pl/blog/historia-srebra-i-srebro-jako-waluta-infografika/> [dostęp: 16.07.2020].
- IEA, Greenhouse Gas Emissions from Energy: Overview, Data explorer, <https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy-overview/data-explorer>.
- Infografika: Emisje gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej, <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20180301STO98928/infografika-emisje-gazow-cieplarnianych-w-unii-europejskiej> [dostęp: 28.03.2022].
- International Technology Roadmap for Photovoltaic 2020, ITRPV Ninth Edition, https://pv.vdma.org/documents/105945/26776337/ITRPV%20Ninth%20Edition%202018%20including%20maturity%20report%2020180904_1536055215523.pdf/a907157c-a241-ee0-310d-fd76f1685b2a [dostęp: 15.10.2021].
- IPCC, Global Warming of 1,5°C, <https://www.ipcc.ch/sr15/> [dostęp: 25.09.2022].
- IRENA, International Renewable Energy Agency, <https://www.irena.org/> [dostęp: 18.09.2022].
- IRENA 2016, End-of-life Management. Solar Photovoltaic Panels, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf [dostęp: 04.08.2022].
- IRENA 2019. Global Energy Transformation, A roadmap to 2050 (2019 edition), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf [dostęp: 09.08.2022].
- IRENA 2020. Renewable Power Generation costs in 2019, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf [dostęp: 06.09.2021].
- IRENA 2020a, Renewable Energy Statistics 2020, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2020.pdf [dostęp: 09.08.2022].
- IRENA 2021, Renewable Capacity Statistics 2021, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf [dostęp: 09.08.2022].
- Iwaszczuk, N., Orłowska-Puzio, J., Łamasz, B. i Wzorek, A. 2015. Kluczowe ryzyka gospodarcze w dobie globalizacji. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- Katastrofy naturalne w 2019 kosztowały 232 mld USD, 29.01.2020, <https://www.egospodarka.pl/161595-Katastrofy-naturalne-w-2019-kosztowaly-232-mld-USD,1,39,1.html> [dostęp: 9.04.2022].
- Kavлак, G., Mcnerney, J., Jaffe, R. i Trancik, J. 2014. Metals Production Requirements for Rapid Photovoltaics Deployment. SSRN Electronic Journal, DOI: 10.2139/ssrn.2539350.
- Kober, T., Schiffer, H.W., Densing, M. i Panos, E. 2020. Global energy perspectives to 2060 – WEC’s World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100523, DOI: 10.1016/j.ESR.2020.100523.
- Kolany K. 2018, Jak Roosevelt obrabował Amerykanów ze złota, Bankier.pl, <https://www.bankier.pl/wiadomosc/Jak-Roosevelt-obrabowal-Amerykanow-ze-zlota-7581409.html> [dostęp: 12.07.2020].
- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów Europejski Zielony Ład, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=PL> [dostęp: 27.09.2022].
- Kożuchowski, K. 2011. Klimat Polski. Nowe spojrzenie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Krajowy Plan Działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych, Ministerstwo Gospodarki, 2011, https://www.senat.gov.pl/gfx/senat/userfiles/_public/k7/komisje/2011/kgn/288/288-1.pdf [dostęp: 7.10.2022].

- Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030, Ministerstwo Aktywów Państwowych, 2019, <https://www.gov.pl/web/klimat/krajowy-plan-na-rzecz-energii-i-klimatu> [dostęp: 7.10.2022].
- Kuczyńska-Łażewska, A., Klugmann-Radziemska, E., Sobczak, Z. i Klimczuk, T. 2018. Recovery of silver metallization from damaged silicon cells. *Solar energy materials and solar cells*. Vol. 176, pp.190–195, DOI: 10.1016/j.solmat.2017.12.004.
- Kundzewicz, Z. 2013. *Cieplejszy świat. Rzecz o zmianach klimatu*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowe PWN.
- Kundzewicz, Z.W. i Kowalczak, P. 2008. *Zmiany klimatu i ich skutki*, Poznań: Wydawnictwo Kurpisz.
- Latunussa, C., Mancini, L., Blengini, G., Ardent, e F. i Pennington, D. 2016a. Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. EUR 27797. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union.
- Latunussa, C.E.L., Ardent, F., Blengini, G.A. i Mancini, L. 2016b. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, s. 101–111, DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2016.03.020.
- L'Ecluse C. i Attwood J. 2020. The afterlife of solar panels, <https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/the-afterlife-of-solar-panels/> [dostęp: 04.08.2022].
- Lo Piano, S., Saltelli, A. i van der Sluijs, J.P. 2019. Silver as a Constraint for a Large-Scale Development of Solar Photovoltaics? Scenario-Making to the Year 2050 Supported by Expert Engagement and Global Sensitivity Analysis. *Frontiers in Energy Research* 7, 56, DOI: 10.3389/FENRG.2019.00056.
- Louwen, A., Van Sark, W., Schropp, R. i Faaij, A. 2016. A cost roadmap for silicon heterojunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 147, s. 295–314, DOI: 10.1016/j.solmat.2015.12.026.
- Low, S. i Boettcher, M. 2020. Delaying decarbonization: Climate governmentalities and sociotechnical strategies from Copenhagen to Paris. *Earth System Governance* 5, DOI: 10.1016/j.esg.2020.100073.
- Mace, M.J. 2016. Mitigation Commitments Under the Paris Agreement and the Way Forward, *Climate Law* 6(1–2), s. 21–39, DOI: 10.1163/18786561-00601002.
- Markert, E., Çelik, I. i Apul, D. 2020. Private and Externality Costs and Benefits of Recycling Crystalline Silicon (c-Si) Photovoltaic Panels. *Energies* 13, DOI: 10.3390/en13143650.
- Mathur, N., Singh, S. i Sutherland, J.W. 2020. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. *Resources, Conservation and Recycling* 155, DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2019.104649.
- MCS 2021, Silver, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-silver.pdf> [dostęp: 16.06.2021].
- Mihm, S. 2015, Jak srebro zrujnowało Chiny, <https://forsal.pl/artykuly/890369,jak-srebro-zrujnowalo-chiny.html> [dostęp: 12.07.2020].
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Polityka energetyczna Polski do 2040 r., 2.02.2021, <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski> [dostęp: 28.09.2022].
- Minx, J.C., Lamb, W.F., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Crippa, M., Döbbling, N., Forster, P.M., Guizzardi, D., Olivier, J., Peters, G.P., Pongratz, J., Reisinger, A., Rigby, M., Saunio, M., Smith, S.J., Solazzo, E. i Tian, H. 2021. A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019, *Earth Syst. Sci. Data* 13, s. 5213–5252, DOI: 10.5194/essd-13-5213–2021.
- Monteiro Lunardi, M., Alvarez-Gaitan, J., Bilbao, J. i Corkish, R. 2017. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules [W:] *Solar Panels and Photovoltaic Materials*, ed. Beddiaf Zaidi, 9.11.2017, DOI: 10.5772/intechopen.74390.
- Moreau, V., Dos Reis, P.C. i Vuille, F. 2019. Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System. *Resources* 8, 29, DOI: 10.3390/resources8010029.
- Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector, International Energy Agency, Special Report, May 2021, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4719e321-6d3d-41a2-bd6b-461ad-2f850a8/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf> [dostęp: 21.08.2022].
- Oberbeck, L., Alvino, K., Baljeet G. i Jubault, M. 2020. IPVF's PV technology vision for 2030. *Progress in photovoltaics*, 28(11), s. 1207–1214, DOI: 10.1002/pip.3305.

- Officer, L.H. 2018, Gold Reserve Act of 1934, <https://www.encyclopedia.com/history/united-states-and-canada/us-history/gold-reserve-act-1934> [dostęp: 12.07.2020].
- Oleszko-Pyka, B. 2021. 5 razy więcej katastrof naturalnych w ciągu 50 lat. To efekt zmian klimatu [Raport ONZ], 3.09.2021, <https://swiatoze.pl/5-razy-wiecej-katastrof-naturalnych-w-ciagu-50-lat-to-zmiany-klimatu-raport-onz/> [dostęp: 9.04.2022].
- Our World in Data 2022, <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices> [dostęp: 09.08.2022].
- Ostrowski, P. 2010. Procesy termiczne i chemiczne w recyklingu ogniw i modułów fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydział Chemiczny, Katedra Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego. Gdańsk.
- Pakiet „Gotowi na 55”, Biuro Analiz Sejmowych, Biuletyn Europejski nr 3(45), 2022, s.1-4, [http://orka.sejm.gov.pl/WydBAS.nsf/0/897CE040E89D255AC12587F3002C4B73/\\$file/BE_045_NS_006.pdf](http://orka.sejm.gov.pl/WydBAS.nsf/0/897CE040E89D255AC12587F3002C4B73/$file/BE_045_NS_006.pdf) [dostęp: 28.09.2022].
- PEP2040, Polityka Energetyczna Polski do 2040 r., Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021, <https://www.gov.pl/web/ia/polityka-energetyczna-polski-do-2040-r-pep2040> [dostęp: 28.09.2022].
- Photovoltaics Report 2021, Fraunhofer ISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> [dostęp: 30.07.2021].
- Photovoltaics Report 2022, Fraunhofer ISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> [dostęp: 29.07.2022].
- Piórko, J. 2020. Raport: katastrofy pogodowe 2020 roku spowodowane zmianami klimatu, 28.12.2020, <https://swiatoze.pl/raport-katastrofy-pogodowe-2020-roku-spowodowane-zmianami-klimatu/> [dostęp: 9.04.2022].
- Pregger, T., Simon, S., Naegler, T. i Teske, S. 2019. Main Assumptions for Energy Pathways [W:] Achieving the Paris Climate Agreement Goals, Teske S. (eds). Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-05843-2_5.
- Pursiheimo, E., Holttinen, H. i Koljonen, T. 2019. Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system. *Renewable Energy* 136, s. 1119–1129, DOI: 10.1016/j.renene.2018.09.082.
- Renewables Global Futures Report: Great Debates Towards 100% Renewable Energy, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris: REN 21, 2017, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/06/GFR-Full-Report-2017_webversion_3.pdf [dostęp: 09.08.2022].
- Ritchie, H. i Roser, M. 2017. Air Pollution, Our World in Data, October 2017, <https://ourworldindata.org/air-pollution> [dostęp: 27.07.2022].
- Rogała, B. 2020. Nie tylko pandemia. W 2020 kryzys klimatyczny spowodował katastrofy, które pochłonęły miliardy dolarów, 28.12.2020, <https://300gospodarka.pl/300klimat/nie-tylko-pandemia-w-2020-kryzys-klimatyczny-spowodowal-katastrofy-ktore-pochlonely-miliardy-dolarow> [dostęp: 12.04.2022].
- Sherman Silver Purchase Act, Encyclopedoa.com, 23.05.2018, <https://www.encyclopedia.com/history/united-states-and-canada/us-history/sherman-silver-purchase-act> [dostęp: 11.07.2020].
- Silver Prices – 100 Year Historical Chart, Macrotrends, <https://www.macrotrends.net/1470/historical-silver-prices-100-year-chart> [dostęp: 16.07.2020].
- Silver’s Important Role in Solar Power, Market Trend Report, 2020, https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2020/06/SilverSolarPower_CRU2020.pdf [dostęp: 31.07.2022].
- Skibińska, R. 2021. Katastrofy naturalne powodują coraz wyższe straty, 16.02.2021, <https://www.obserwatorfinansowy.pl/tematyka/rynki-finansowe/bankowosc/katastrofy-naturalne-powoduja-coraz-wyzsze-straty/> [dostęp: 9.04.2022].
- Skwirowski, P. 2019. 10 najdroższych katastrof klimatycznych 2018 r. Straty idą w miliardy, 5.01.2019, <https://www.parkiet.com/gospodarka-swiatowa/art20287691-10-najdrozszych-katastrof-klimatycznych-2018-r-straty-ida-w-miliardy> [dostęp: 9.04.2022].
- Sobieraj, K. 2017. Wpływ Porozumienia paryskiego na zmianę polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej i unijnych regulacji prawnych w tym zakresie. *Ruch Prawniczy, Ekonomiczny i Socjologiczny*, s. 177–190, DOI: 10.14746/rpeis.2017.79.4.14.

- Stanaway, J.D., Afshin, A., Gakidou, E., Lim, S.S., Abate, D., Abate, K.H. i Murray, C.J.L. 2018. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet* 392(10159), s. 1923–1994, DOI: 10.1016/S0140-6736(18)32225-6.
- Stooq, <https://stooq.pl/> [dostęp: 30.07.2022].
- Taylor, N. i Jäger-Waldau, A. 2020. *Photovoltaics Technology Development Report 2020*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, DOI: 10.2760/827685.
- The Role of Silver in the Green Revolution, Prepared for The Silver Institute, CRU International, July 2018, https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2018/07/Role_of_Silver_Green_Revolution_28Jun2018.pdf [dostęp: 01.08.2021].
- The United States Geological Survey <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-silver.pdf> [dostęp: 16.06.2021].
- Tokimatsu, K., Höök, M., McLellan, B., Wachtmeister, H., Murakami, S., Yasuoka, R. i Nishio, M. 2018. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: Exploring metal requirements and the well-below 2°C target with 100 percent renewable energy. *Applied Energy* 225, s. 1158–1175, DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.047.
- Tous, L. 2014. *Nickel/Copper Plated Contacts as an Alternative to Silver Screen Printing for the Front Side Metallization of Industrial High Efficiency Silicon Solar Cells*. Rozprawa doktorska. KU Leuven – Faculty of Engineering, https://www.researchgate.net/publication/292980323_NickelCopper_Plated_Contacts_as_an_Alternative_to_Silver_Screen_Printing_for_the_Front_Side_Metallization_of_Industrial_High_Efficiency_Silicon_Solar_Cell [dostęp: 21.07.2021].
- Trading View, <https://pl.tradingview.com/> [dostęp: 31.07.2022].
- Trancik, J.E. 2013. Cross-Call D. Energy technologies evaluated against climate targets using a cost and carbon trade-off curve. *Environ Sci Technol.* 18; 47(12), s. 6673–6680, DOI: 10.1021/es304922v.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development, <https://sdgs.un.org/2030agenda> [dostęp: 27.09.2022].
- United Nations Treaty Collection, https://treaties.un.org/Pages/ViewDetailsIII.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7&chapter=27&Temp=mtdsg3&clang=_en [dostęp: 23.09.2022].
- van Winkoop, H. 2012. *Short-run and long-run determinants of the price of silver*. Master Thesis, Tilburg University, Tilburg.
- Wade, A., Sinha, P., Drozdziak, K. i Brutsch, E. 2017. Beyond waste – the fate of end-of-life photovoltaic panels from large scale PV installations in the EU the socio-economic benefits of high value recycling compared to re-use. Conference: 33rd EU PVSECA: Amsterdam, The Netherlands.
- WEC 2013, *World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050*, Project Partner Paul Scherrer Institute (PSI), Switzerland, 2013, https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Scenarios_Composing-energy-futures-to-2050_Executive-summary.pdf [dostęp: 07.08.2022].
- WEC 2019, *World Energy Council. 2019. World Energy Scenarios 2019 – Exploring Innovation Pathways to 2040*, in Collaboration with Accenture Strategy and Paul Scherrer Institute, London (2019), September 2019, https://www.worldenergy.org/assets/downloads/2019_Scenarios_Full_Report.pdf [dostęp: 07.08.2022].
- Wernio, M. 2022. Na wschodniej Antarktydzie zawałił się lodowiec szelfowy dwa razy większy od Warszawy, 28.02.2022, <https://noizz.pl/ekologia/na-wschodzie-antarktydy-zawalil-sie-lodowiec-szefowy-wielkosci-nowego-jorku/k809rfw> [dostęp: 28.03.2022].
- Wernio, M. 2020a, Padł rekord ciepła na Antarktydzie. Kontynent rozpływa się na naszych oczach, 7.02.2020, <https://noizz.pl/ekologia/rekord-ciepła-na-antarktydzie-183-stopnie-celsjusza-na-stacji-esperanza/70tb1me> [dostęp: 30.03.2022].
- Wernio M. 2020b, Grenlandia się roztopia. Topnienie lodu przekroczyło punkt bez powrotu, 16.08.2020, <https://noizz.pl/ekologia/topnienie-lodu-na-grenlandii-przekroczylo-punkt-krytyczny/6jgee52> [dostęp: 30.03.2022].

- Wilson, G.M. et. all. 2020. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics* 53, art. 493001, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ab9c6a> [dostęp: 14.08.2022].
- World Bank, <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf> [dostęp: 03.06.2021].
- World Energy Assessment, *Energy and the Challenge of sustainability*, 2000, https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/2423World_Energy_Assessment_2000.pdf [dostęp: 07.08.2022].
- World Energy Outlook, International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2014> [dostęp: 12.01.2022].
- World Silver Survey 2015, <https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2017/10/2015WorldSilverSurvey.pdf> [dostęp: 30.07.2022].
- World Silver Survey 2018, <https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2018/04/2018WorldSilverSurvey.pdf> [dostęp: 16.06.2021].
- World Silver Survey 2021, <https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2021/04/World-Silver-Survey-2021.pdf> (lata 2013–2022) [dostęp: 30.07.2022].
- World Silver Survey, 2022, <https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2022/04/World-Silver-Survey-2022.pdf> [dostęp: 29.07.2022].
- XAGUSD 2020, <https://pl.tradingview.com/symbols/XAGUSD/> [dostęp: 16.07.2020].
- Zabielski, K. 2005. *Finanse międzynarodowe*, PWN, Warszawa.
- Załącznik do Komunikatu Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów Europejski Zielony Ład, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_2&format=PDF [dostęp: 27.09.2022].
- Zuser, A. i Rechberger, H. 2011. Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics. *Resources, Conservation and Recycling* 56(1), s. 56–65, DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.09.004.

Spis tabel

- Tabela 1. Wybrane punkty krytyczne spowodowane globalnym ociepleniem
- Tabela 2. Dziesięć najbardziej tragicznych kataklizmów na świecie w okresie 1970–2019
- Tabela 3. Dziesięć największych kataklizmów z okresu 1970–2019 według strat ekonomicznych
- Tabela 4. Dziesięć największych katastrof, które dotknęły Ziemię w 2020 roku (chronologicznie)
- Tabela 5. Dziesięć najkosztowniejszych katastrof naturalnych w 2021 roku
- Tabela 6. Zawartość metali w amerykańskich monetach na mocy Coinage Act z 1792 roku
- Tabela 7. Zestawienie podaży i popytu na srebro w latach 2013–2022
- Tabela 8. Skład masowy 1000 kg odpadów fotowoltaicznych
- Tabela 9. Główne czynniki, wpływające na rynek srebra
- Tabela 10. Porównanie scenariuszy World Energy Council z roku 2013 i z 2019
- Tabela 11. Projekcja możliwych kosztów nowych instalacji w latach 2015–2050 (Europa)
- Tabela 12. Projekcja możliwych kosztów nowych instalacji w latach 2030 i 2050 (świat)
- Tabela 13. Scenariusze globalnego zużycia energii w roku 2040
- Tabela 14. Scenariusze maksymalnej produkcji energii elektrycznej z PV
- Tabela 15. Udział technologii PV opartych na srebrze
- Tabela 16. Intensywność udziału srebra w trzech scenariuszach
- Tabela 17. Najistotniejsze dane wejściowe użyte w badaniu
- Tabela 18. Przyrost zainstalowanej mocy w PV
- Tabela 19. Prognozowana ilość srebra niezbędna w danym wariantcie scenariusza w ujęciu dziesięcioletnim
- Tabela 20. Zakładane roczne zużycie srebra w sektorze PV
- Tabela 21. Zapotrzebowanie na srebro w ujęciu rocznym (Moz) oraz wartości ostrzegawcze

Spis rysunków

- Rys. 1. Udział poszczególnych kategorii katastrof w 2020 roku
- Rys. 2. Gold-Silver Ratio w latach 1920–2020
- Rys. 3. Cena srebra w latach 1920–2020, wyrażona w dolarach amerykańskich
- Rys. 4. Cena srebra w latach 1973–1981
- Rys. 5. Cena srebra w latach 1972–2022 [USD/oz]
- Rys. 6. Wskaźnik Gold-Silver Ratio w latach 1972–2022
- Rys. 7. Budowa typowej komórki krzemowego ogniwa fotowoltaicznego
- Rys. 8. Grupy materiałów wykorzystywanych w produkcji ogniw fotowoltaicznych
- Rys. 9. Procentowy udział głównych technologii PV w rocznej produkcji energii elektrycznej
- Rys. 10. Kształtowanie się cen oraz popytu na srebro przez sektor fotowoltaiczny w latach 2005–2022
- Rys. 11. Zmiany ceny srebra oraz jego zużycia na jedno ogniwo w latach 2009–2024
- Rys. 12. Zużycie srebra w ogniwach fotowoltaicznych w przeliczeniu na wat
- Rys. 13. Maksymalna sprawność ogniw PV uzyskana laboratoryjnie (1993–2021)
- Rys. 14. Maksymalna sprawność komercyjnych ogniw PV opartych na krzemie (2010–2030)
- Rys. 15. Teoretyczna wartość surowców możliwych do recyklingu z krzemowego panelu PV wyprodukowanego w roku 2019
- Rys. 16. Porównanie scenariuszy World Energy Council, pochodzących z roku 2013 oraz 2019
- Rys. 17. Koszt modułu PV (2019 US\$/W) w latach 1976–2019
- Rys. 18. Udział poszczególnych kosztów w instalacji PV
- Rys. 19. Roczny przyrost zainstalowanej mocy PV w latach 2011–2020
- Rys. 20. Globalna produkcja energii elektrycznej z PV (1999–2021)
- Rys. 21. Zainstalowana moc energii elektrycznej z OZE i PV w latach 2011–2020
- Rys. 22. Udział odnawialnych i nieodnawialnych źródeł energii elektrycznej w latach 1971–2018
- Rys. 23. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach odniesienia (REF)
- Rys. 24. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach (r)ewolucji (E[R])
- Rys. 25. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach zaawansowanej (r)ewolucji (ADV E[R])
- Rys. 26. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach IEA 2020 (IEA)
- Rys. 27. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta A
- Rys. 28. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta B
- Rys. 29. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta C
- Rys. 30. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta a
- Rys. 31. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta b
- Rys. 32. Rozkład zapotrzebowania na srebro w scenariuszach: determinanta c

IGSMiE PAN – Wydawnictwo

Nakład 25 egz.

Objętość ark. wyd. 11,2; ark. druk. 16,00 (×8)

Druk i oprawa: Drukarnia Eikon Plus

ul. Wybickiego 46; 31-302 Kraków



ISBN 978-83-964234-6-7
eISBN 978-83-964234-7-4