

TEMAT LEKCJI:

Magazynowanie wodoru

POZIOM EDUKACYJNY: podstawowy

GRUPA DOCELOWA: uczniowie szkół podstawowych (10-14)

i ponadpodstawowych (15-19 lat)

CZAS ZAJĘĆ: 45 minut (jednostka lekcyjna)

PRZEDMIOT: fizyka, chemia, inne zajęcia związane z tematyką energetyki i infrastruktury



Projekt dofinansowany ze środków budżetu państwa,
przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach
Programu „Społeczna odpowiedzialność nauki II”

MNiSW



INFORMACJE DLA NAUCZYCIELA

Co musisz wiedzieć przed zrealizowaniem zajęć?

PRZEBIEG LEKCJI

CZĘŚĆ 1

OKOŁO 25 MINUT



1. Nauczyciel dzieli uczniów na grupy 4-5 osobowe i przekazuje elementy symulatora systemu elektroenergetycznego wraz z instrukcją.
2. Nauczyciel tłumaczy zasady gry.
3. Uczniowie zaczynają od energetyki konwencjonalnej (3-4 minuty, nie ma możliwości „zwycięstwa”).
4. Scenariusz z OZE + mały magazyn energii (około 10 minut, niewielkie szanse na „zwycięstwo”).
5. Scenariusz z OZE + duży magazyn energii (około 10 minut, duże szanse na „zwycięstwo”).

CZĘŚĆ 2

OKOŁO 10 MINUT



- Nauczyciel prowadzi dyskusję wykorzystując przykładowe pytania:
- Który model systemu elektroenergetycznego jest najbardziej stabilny?
 - Dlaczego energetyka odchodzi od paliw?
 - Jakie są największe wyzwania stojące przed OZE?
 - Jak duże musimy wybudować instalacje OZE, aby zaspokoić potrzeby miasta?
 - Jaką dużą rolę odgrywają magazyny energii?
 - Jak magazynować energię?
 - Jakie wyzwania stoją przed magazynowaniem energii?

CZĘŚĆ 3

OKOŁO 10 MINUT



Nauczyciel przeprowadza krótki wykład na bazie przygotowanej prezentacji, który pokazuje możliwości magazynowania energii w postaci wodoru.

GRUPA DOCELOWA:

uczniowie szkół podstawowych (10-14 lat) i ponadpodstawowych (15-19 lat)

CZAS ZAJĘĆ:

45 minut



PRZEDMIOT:

fizyka, chemia, inne zajęcia związane z tematyką energetyki i infrastruktury

CEL LEKCJI / EFEKTY EDUKACYJNE:

- uczniowie poznają różne modele systemu elektroenergetycznego,
- znają emisyjność modeli systemu elektroenergetycznego,
- rozumieją wyzwania dla systemu opartego o pogodozależne OZE,
- rozumieją znaczenie magazynowania energii,
- poznają możliwości magazynowania wodoru.

MATERIAŁY:

- plansze z warunkami pogodowymi
- plansze z modelami energetyki
- żetony energii/CO₂
- kostka do gry
- instrukcja symulatora
- prezentacja

METODY PRACY:

- praca w grupach
- dyskusja z nauczycielem
- wykład

UCZEŃ

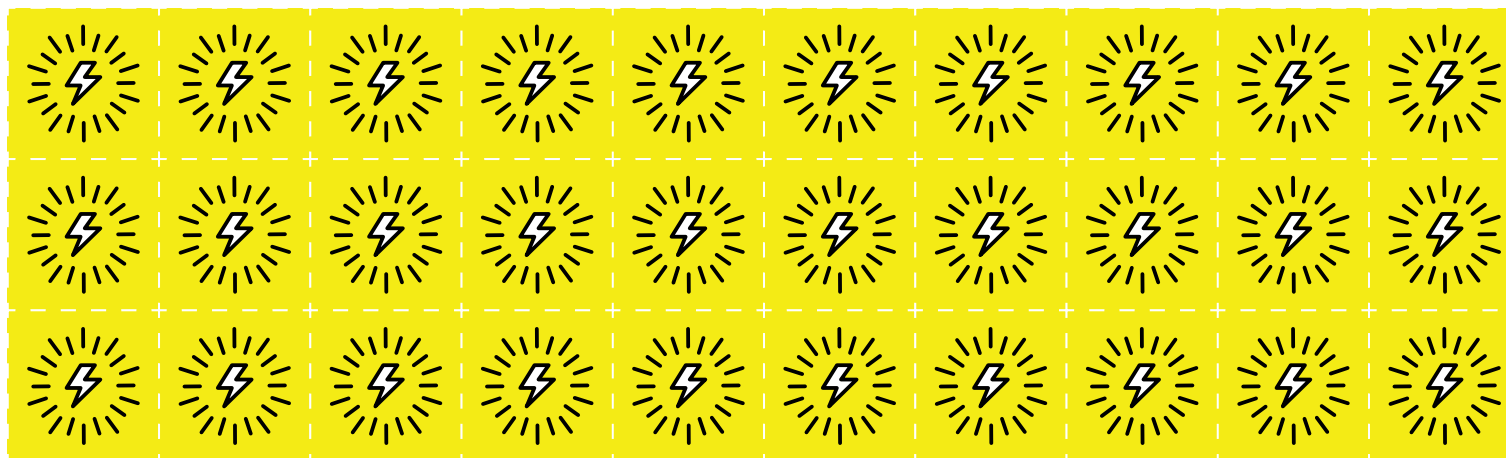
Zadania dla uczestników zajęć lekcyjnych

KARTA PRACY // Symulator systemu elektroenergetycznego

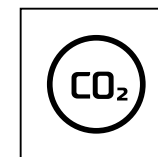
ZADANIE 1

Za chwilę zagrasz w grę „Symulator systemu elektroenergetycznego”.
Zacznij od wycięcia poniższych elementów, które będą Ci potrzebne do gry jako „żetony energii”. Drugą stronę żetonu podpisz każdorazowo symbolem dwutlenku węgla (CO₂). Przygotuj także kostkę do gry.

Elementy do wycięcia:



Rewers



KARTA PRACY // Symulator systemu elektroenergetycznego

ZADANIE 2

Przeczytaj uważnie zasady gry.

1. Rzuć kostką do gry i wylosuj numer z warunkami atmosferycznymi, w których będzie pracował Twój system. Każda wylosowana opcja pogodowa posiada dostępne zasoby energetyczne słońca i wiatru na różnym poziomie (wartości cyfrowe).
2. Bazując na dostępnym w danym scenariuszu systemie produkcji energii (PRODUKCJA), pobierz odpowiednią liczbę żetonów energii (ilość energii jest zależna od rodzaju i mocy elektrowni, ale też warunków atmosferycznych). Elektrownie konwencjonalne działają niezależnie od warunków pogodowych.
3. Miasto zużywa 4 jednostki energii na turę – przenieś żetony wyprodukowanej energii do miasta oraz do/z magazynu energii. Pamiętaj:
 - Jeżeli korzystasz z elektrowni konwencjonalnej, odwróć żetony na stronę CO₂ i zostaw w mieście.
 - Jeżeli korzystasz z instalacji OZE, odłóż żetony do późniejszego wykorzystania.
 - Jeżeli posiadasz nadwyżki energii (ponad konsumpcję energii), przenieś pozostałe żetony do magazynu energii.
 - Jeżeli brakuje Ci energii do zasilania miasta, skorzystaj z energii (żetonów) z magazynu.
4. Magazyn energii ma ograniczoną pojemność. Jeżeli zostaje Ci nadmiar energii, a magazyn jest pełen, odłóż żetony do późniejszego wykorzystania.
5. Jeżeli nie uda Ci się zasilić miasta w pełni – przegrywasz.
6. Jeżeli osiągniesz emisję na poziomie 30 jednostek CO₂ – przegrywasz.
7. Zakończ turę i wróć do punktu 1.

Warunki zwycięstwa: Przetwaj 15 tur!

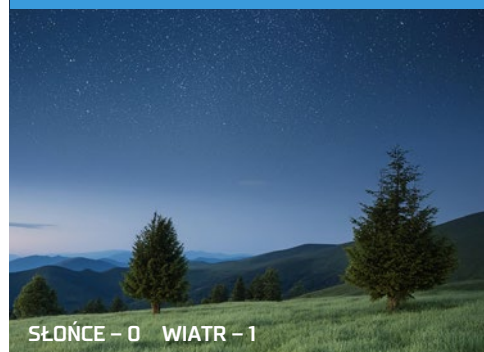
1. BEZWIETRZNY WIECZÓR



2. BURZOWE POPOŁUDNIE



3. CICHA, LETNIA NOC



4. JESIENNA NOC



5. MGLISTY PORANEK



6. SŁONECZNY I WIETRZNY DZIEŃ



System elektroenergetyczny oparty o jednostki konwencjonalne

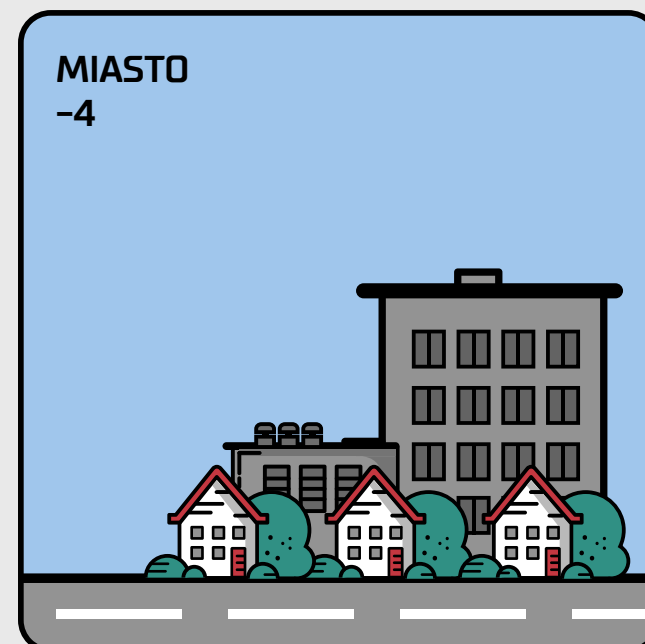
W tym scenariuszu bazujemy na elektrowni wykorzystującej paliwa kopalne. Scenariusz ten obciążony jest wysoką emisją gazów cieplarnianych oraz koniecznością importu surowców energetycznych. Umieść na start 2 jednostki energii w magazynie.



PRODUKCJA



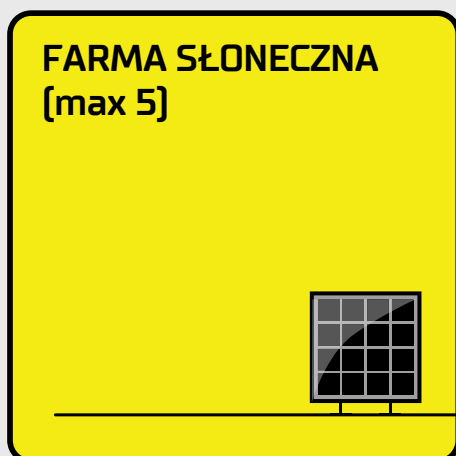
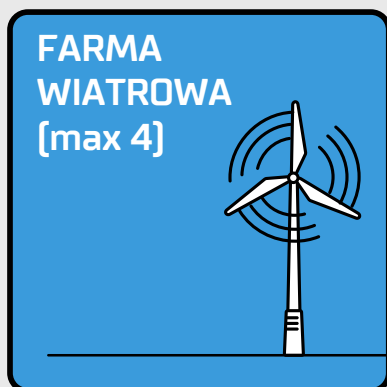
MAGAZYN



ZUŻYCIE

System elektroenergetyczny oparty całkowicie na OZE z dużym magazynem energii w postaci wodoru

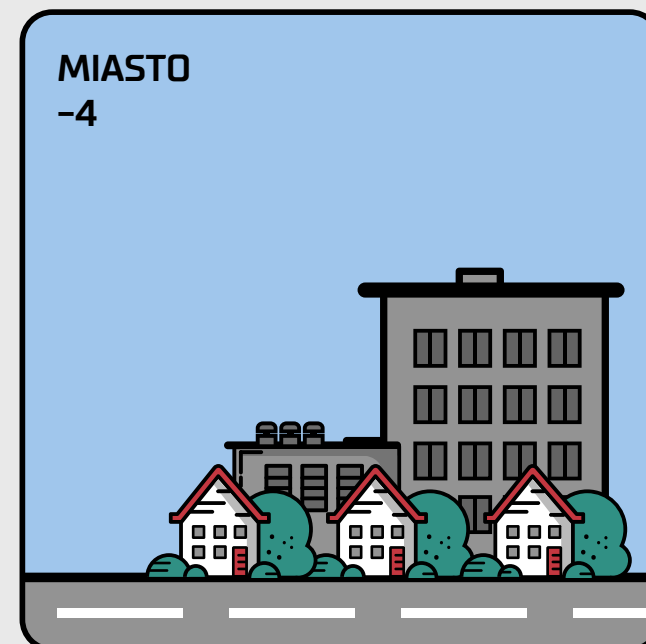
Umieść na start 2 jednostki energii w magazynie.



PRODUKCJA



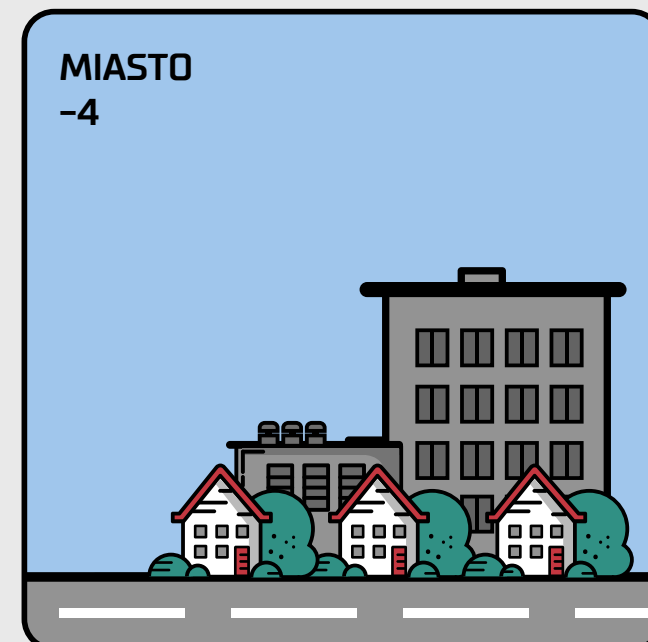
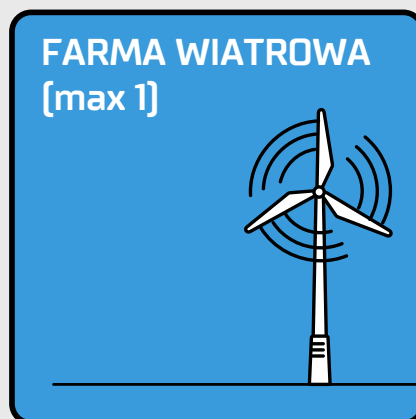
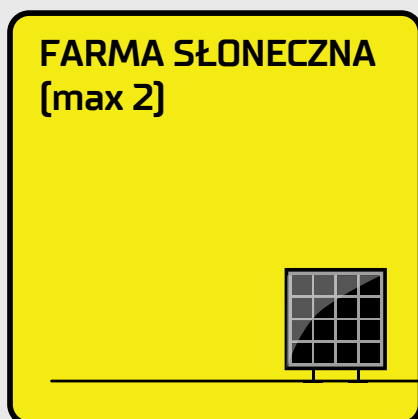
MAGAZYN



ZUŻYCIE

System elektroenergetyczny oparty o elektrownię konwencjonalną + OZE + bateryjny magazyn energii

Połowa mocy wytwórczej elektrowni konwencjonalnej została zastąpiona przez OZE oraz mały magazyn bateryjny do stabilizowania dostaw energii. Umieść na start 2 jednostki energii w magazynie.



PRODUKCJA

MAGAZYN

ZUŻYCIE

KARTA PRACY // Symulator systemu elektroenergetycznego

TURA NUMER
1.

Przykład rozgrywki dla scenariusza elektrowni konwencjonalnej + OZE + magazyn bateryjny energii

1.

LOSOWANIE WARUNKÓW

Na kostce wypadło liczba 2
– wybierz „Burzowe popołudnie”.

2.

PRODUKCJA

Weź 4 jednostki energii:
– 1 żeton z farmy słonecznej (osiągnięto limit warunków pogodowych),
– 1 żeton z farmy wiatrowej (osiągnięto limit wielkości elektrowni wiatrowej),
– 2 żetony z elektrowni konwencjonalnej.

3.

ZUŻYCIE ENERGII

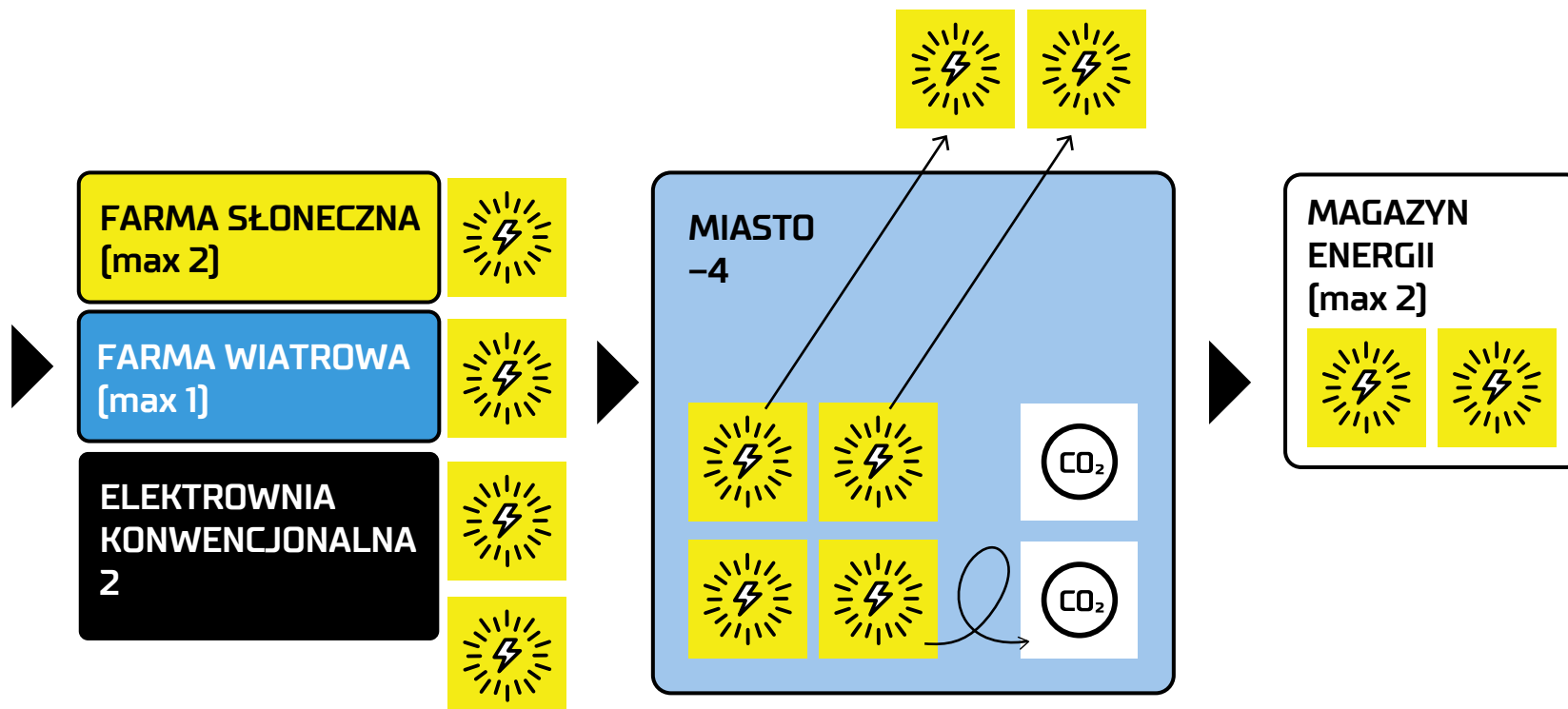
– przenieś 4 żetony energii do miasta
– odwróć 2 żetony na stronę CO₂ (pochodzą z elektrowni konwencjonalnej)
– odłóż 2 żetony z powrotem do stosu z żetonami – (pochodzą z OZE).

4.

MAGAZYN

Poziom energii w magazynie pozostaje bez zmian. Miasto jest zasilane, gra toczy się dalej. Miasto ma 2 jednostki CO₂
– to mniej niż limit, gra toczy się dalej.

Zakończ turę i wróć do punktu 1.



KARTA PRACY // Symulator systemu elektroenergetycznego

Przykład rozgrywki dla scenariusza elektrowni konwencjonalnej + OZE + magazyn bateryjny energii

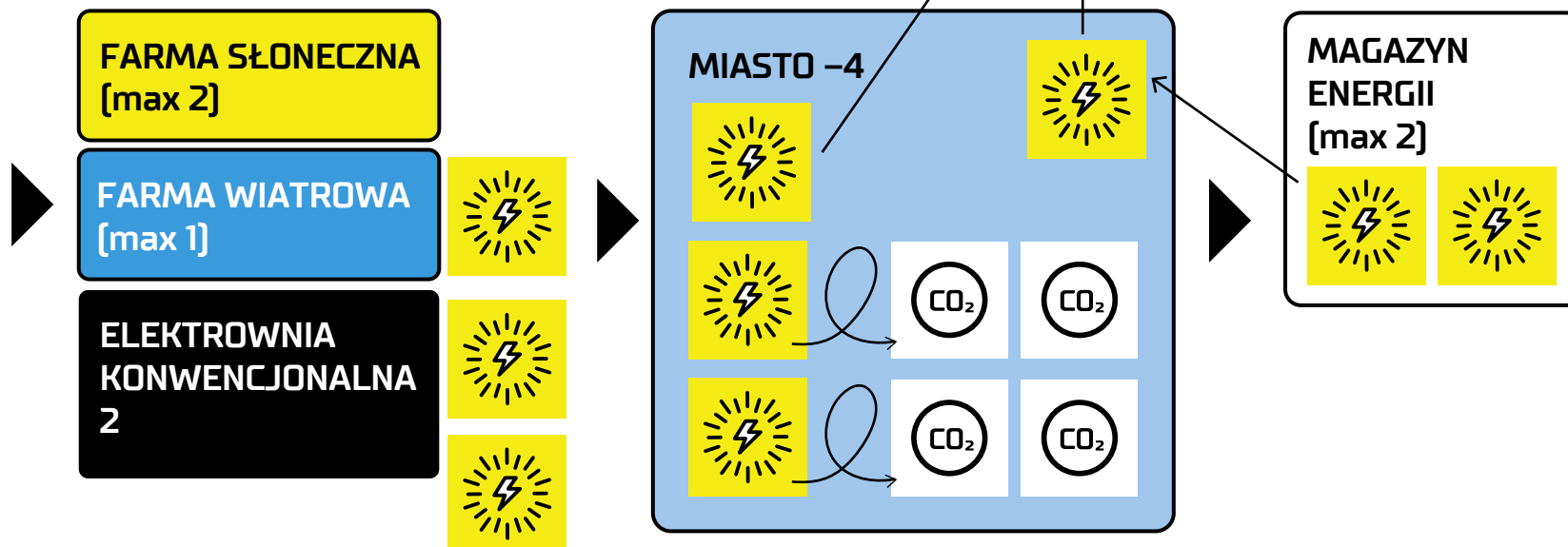


1. LOSOWANIE WARUNKÓW
na kostce wypadło liczba 4
– wybierz „Jesienna noc”.

2. PRODUKCJA
Weź 3 jednostki energii:
– 0 żetonów z farmy słonecznej (nie osiągnięto limitu warunków pogodowych),
– 1 żeton z farmy wiatrowej (osiągnięto limit wielkości elektrowni wiatrowej),
– 2 żetony z elektrowni konwencjonalnej.

3. ZUŻYCIE ENERGII
Przenieś 3 żetony energii do miasta, odwróć 2 żetony na stronę CO₂ (pochodzą z elektrowni konwencjonalnej), odłóż 1 żeton z powrotem do stosu z żetonami – (pochodzi z OZE).

4. MAGAZYN
Brakuje energii, dobierz jeden żeton z magazynu. Miasto jest zasilane, gra toczy się dalej. Miasto ma 4 jednostki CO₂ – to mniej niż limit, gra toczy się dalej.
Zakończ turę i wróć do punktu 1.



KARTA PRACY // Symulator systemu elektroenergetycznego

TURA NUMER
3.

Przykład rozgrywki dla scenariusza elektrowni konwencjonalnej + OZE + magazyn bateryjny energii

1.

LOSOWANIE WARUNKÓW

na kostce wypadło liczba 6
– wybierz „Słoneczny i wietrzny dzień”.

2.

PRODUKCJA

Weź 5 jednostek energii:
– 2 żetony z farmy słonecznej (osiągnięto limit wielkości farmy słonecznej),
– 1 żeton z farmy wiatrowej (osiągnięto limit wielkości elektrowni wiatrowej),
– 2 żetony z elektrowni konwencjonalnej.

3.

ZUŻYCIĘ ENERGII

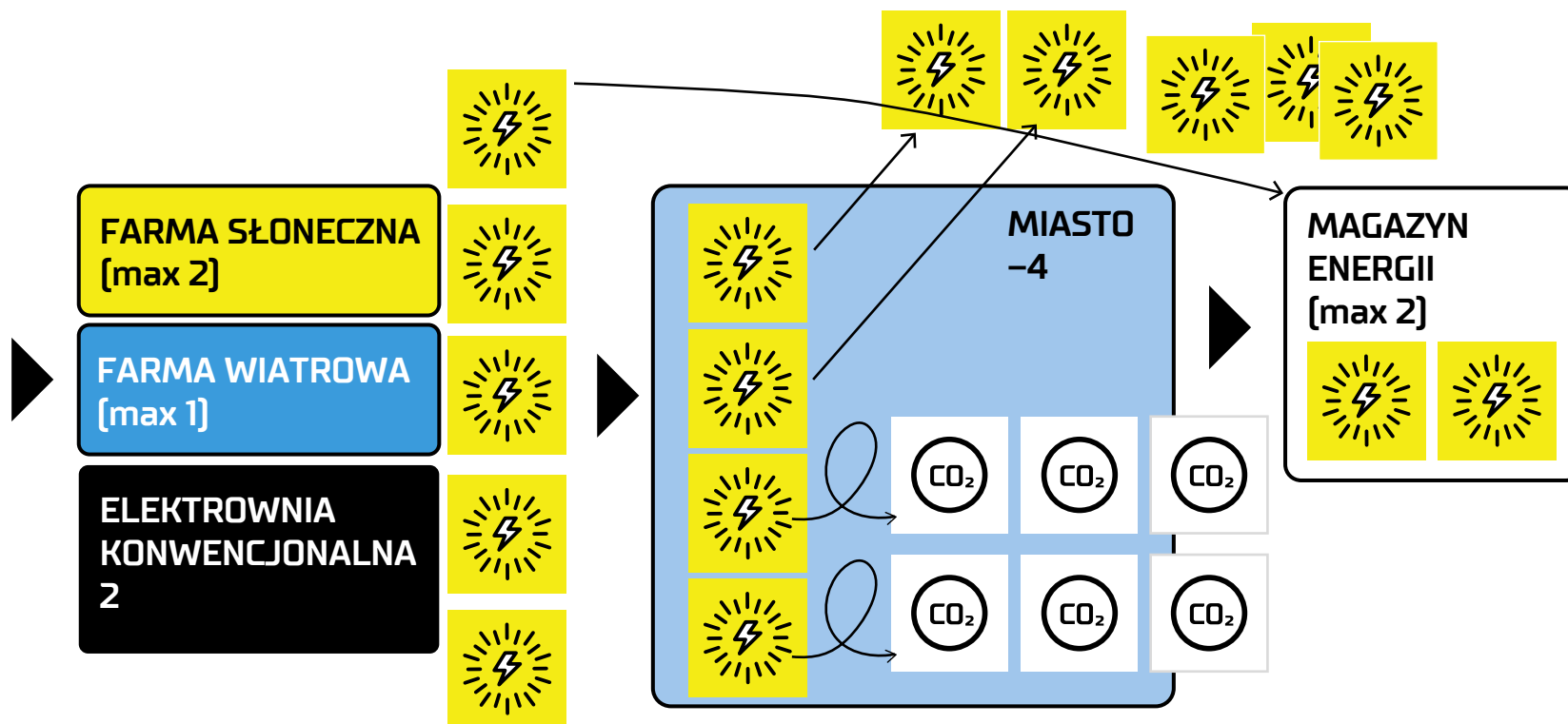
Przenieś 4 żetony energii do miasta, odwróć 2 żetony na stronę CO₂ (pochodzą z elektrowni konwencjonalnej), odłóż 2 żetony z powrotem do stosu z żetonami (pochodzi z OZE). Nadmiar energii.

4.

MAGAZYN

Przenieś jeden żeton energii do magazynu. Miasto jest zasilane, gra toczy się dalej. Miasto ma 6 jednostek CO₂ – to mniej niż limit, gra toczy się dalej.

Zakończ turę i wróć do punktu 1.



NAUCZYCIEL

Materiały z informacjami dla nauczyciela o wodorze. *Slajdy można zaprezentować uczniom w trakcie zajęć.*

KARTA WIEDZY //

Elektryfikacja w transformacji energetyki a magazyny

Jednym z celów społeczeństwa w XXI wieku jest złagodzenie skutków kryzysu klimatycznego. Rozwiązaniem jest ograniczenie emisji szkodliwych zanieczyszczeń do atmosfery, w tym dwutlenku węgla (CO_2). Coraz więcej państw stopniowo odchodzi od konsumpcji paliw kopalnych w energetyce, ale także w procesach przemysłowych. Możliwe jest to poprzez wykorzystanie energii elektrycznej produkowanej w sposób bezemisyjny. Jednym z filarów transformacji gospodarczej jest elektryfikacja gospodarki i energetyki, co wiąże się z procesem tzw. sector couplingu (łączenie sektorów).

Wyzwaniem elektryfikacji kolejnych gałęzi gospodarki jest zapewnienie wystarczającego wolumenu energii elektrycznej, która w większości będzie pochodzić z OZE, czyli niestabilnych i pogodozależnych źródeł energii. Odpowiedzią są technologie magazynowania energii. Rozwiązania te powinny się cechować następującymi parametrami:

- korzystanie z tanich i łatwo dostępnych materiałów,
- wysoka gęstość energetyczna (pojemność baterii),
- niski lub zerowy ślad węglowy,
- możliwie jak najdłuższy czas magazynowania energii,
- żywotność magazynu (liczba cykli ładowania-rozładowania magazynu).

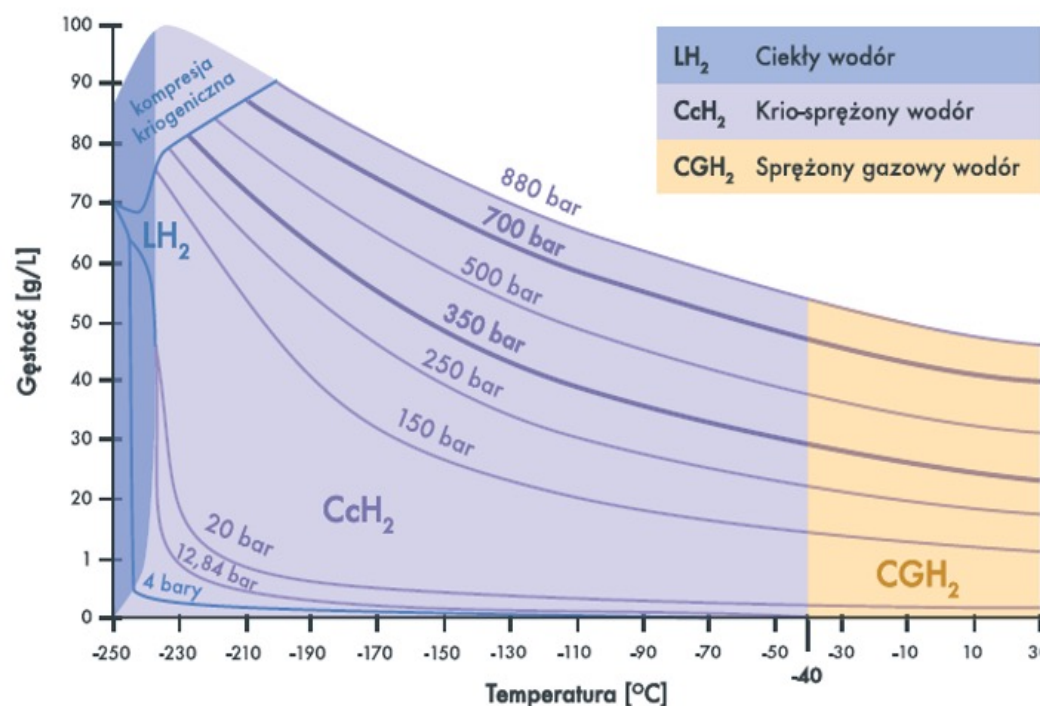
Jedną z odpowiedzi na stawiane warunki jest wodór, dzięki któremu można magazynować bezemisyjną energię, co umożliwia przesunięcie jej konsumpcji w czasie.

KARTA WIEDZY //

Magazynowanie wodoru – ograniczenia fizyczne

Wodór, jako najlżejszy pierwiastek we Wszechświecie, cechuje się bardzo korzystnym stosunkiem gęstości energii do jego masy. Oznacza to, że jest wydajnym nośnikiem energii. Z drugiej strony gęstość energii w porównaniu do objętości pozostaje na niskim poziomie. Te parametry teoretycznie wymagają stosowania wyjątkowo dużych zbiorników w celu uzyskania tej samej ilości energii, jak w przypadku paliw kopalnych. Aby temu zapobiec, konieczne jest zastosowanie co najmniej jednego z następujących parametrów: wysokie ciśnienie, niska temperatura lub materiały, które oddziałują z wodorem (chemicznie lub fizycznie).

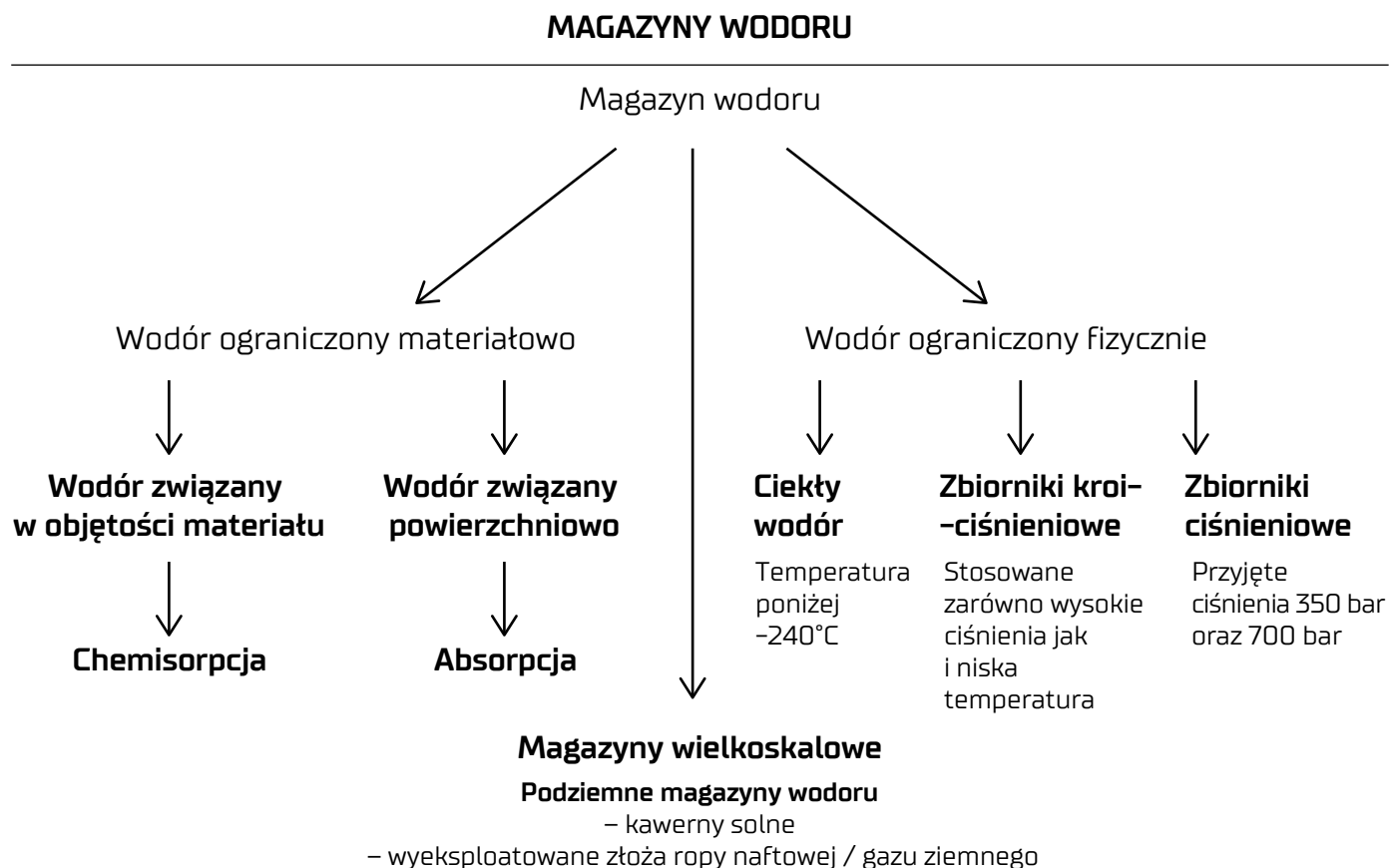
Gęstość wodoru w zależności od ciśnienia i temperatury



KARTA WIEDZY //

Magazynowanie energii

Jednym z filarów transformacji energetycznej jest bezemisyjna produkcja energii z wykorzystaniem magazynów energii. Ważnym elementem tego procesu jest produkcja tzw. zielonego wodoru, otrzymywanego w procesie elektrolizy wody. Istotnym celem stawianym magazynom energii jest możliwość szerokiego zastosowania po stronie konsumpcji energii. Specyfikacja magazynu energii w postaci wodoru będzie zależała od skali zapotrzebowania energii i przeznaczenia energii. Liczba rozwiązań nie świadczy o skomplikowaniu technologii magazynowania energii, a o szerokich możliwościach zastosowania technologii wodorowej. Szczegóły przedstawia wykres obok.



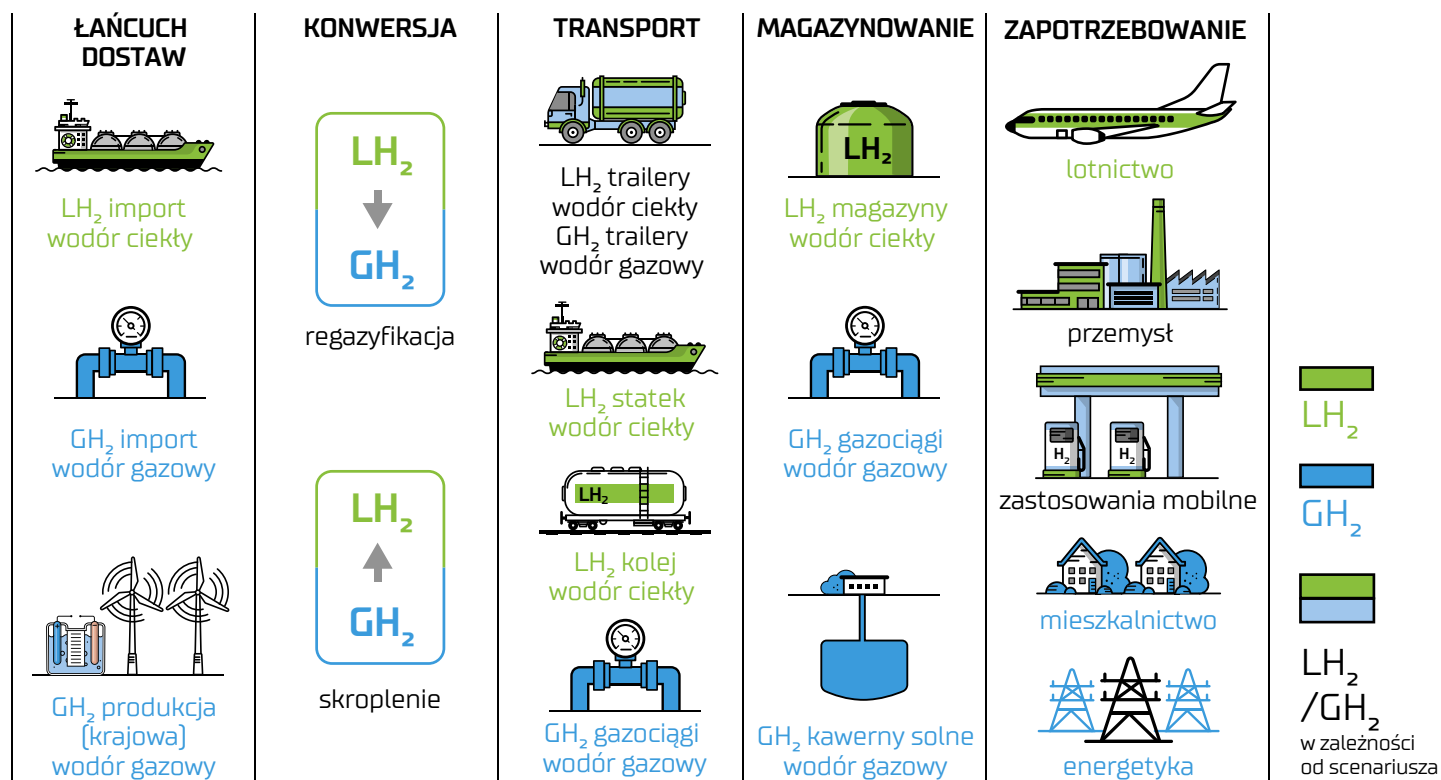
KARTA WIEDZY //

Magazynowanie wodoru zależy od zastosowań

Sposób przesyłu i magazynowania zależy od wielu czynników:

- końcowego odbiorcy,
- zastosowania wodoru,
- ilości magazynowania wodoru,
- odległości od producenta wodoru,
- istniejącej infrastruktury,
- częstotliwości dostaw.

Ta różnorodność nie świadczy o skomplikowaniu systemu, a o licznych zastosowaniach wodoru, a także o potencjale rozwoju gospodarki wodorowej.



KARTA WIEDZY //

Gazowy wodór skompresowany (CGH_2)

Najczęściej wykorzystywaną metodą przechowywania wodoru jest jego magazynowanie pod wysokim ciśnieniem w zbiornikach, które operują w standardach 35 MPa [250 bar] oraz 70 MPa [700 bar]. Kształt tych zbiorników jest podobny do typowych butli gazowych i wymagają specjalnych materiałów i powłok. Wodór, oprócz surowych wymagań dotyczących szczelności, wywołuje także zwiększoną kruchość stali, co staje się istotnym wyzwaniem przy budowie zarówno magazynów wodoru, jak i rurociągów do przesyłu gazu. Z kolei przechowywanie wodoru pod wysokim ciśnieniem wymaga spełnienia odpowiednich norm wytrzymałościowych. Dodatkowo, projektując zbiorniki, należy optymalizować ich konstrukcję pod kątem minimalizacji masy – grubsze powłoki zwiększają wytrzymałość, zwiększają też wagę. Zbiorniki ciśnieniowe przeznaczone do przechowywania sprężonego gazu są podzielone na 4 rodzaje.

TYP I

To zbiorniki ciśnieniowe wykonane w całości z metalu. Z reguły są wykonane z aluminium lub stali. Jest to najtańsza technologia, ale jednocześnie zbiorniki są najcięższe. Pozwalają na przechowywanie wodoru pod ciśnieniem 50 MPa [500 bar].

TYP II

Zbiorniki metalowe pokryte warstwą kompozytu z włókna szklanego. Są podobne do zbiorników typu I, ale warstwa metalu jest wzmocniona kompozytem, na przykład aluminium z włóknem szklanym lub stal z aramidem. Dzięki temu masa całego zbiornika jest zmniejszona o około 30–40%, a jednocześnie zwiększona jest jego wytrzymałość na ciśnienie.





TYP III

Składa się głównie z włókna węglowego, które odpowiada za wytrzymałość struktury. W zbiornikach tych stosuje się metalową wkładkę zapewniającą szczelność. Rozwiązanie to jest około dwukrotnie lżejsze od typu II

TYP IV

To zbiorniki w pełni wykonane z kompozytu. Wkładka uszczelniająca wykonana jest z polimeru, zazwyczaj z polietylenu wysokiej gęstości. Takie rozwiązanie jest najlżejsze i umożliwia przechowywanie wodoru pod ciśnieniem 100 MPa [1000 bar]. Jest to rozwiązanie stosowane w komercyjnie produkowanych pojazdach z napędem wodorowym.

BUDOWA ZBIORNIKÓW

V1	V2	V3	V4
			
zbiornik metalowy	metalowa wkładka otoczona kompozytem z włókna szklanego i polimerową osnową [GFRP]	metalowa wkładka otoczona kompozytem z włókna węglowego i polimerową osnową [CFRP]	polimerowa wkładka otoczona kompozytem z włókna węglowego i polimerową osnową [CFRP]

Źródło: Y. Su, Review of the Hydrogen Permeability of the Liner Material of Type IV On-Board Hydrogen Storage Tank, World Electr. Veh. J. 2021, 12(3), 130; <https://doi.org/10.3390/wevj12030130>

KARTA WIEDZY //

Wodór skroplony (LH₂)

Wodór można doprowadzić do fazy ciekłej poprzez schłodzenie go do temperatury 20 K (-253°C) przy ciśnieniu atmosferycznym. Poprawia to zdecydowanie gęstość energii, co ułatwia przechowywanie wodoru w mniejszym zbiorniku. Proces schładzania wymaga jednak dużych nakładów energii, które pochłaniają do 30% energii magazynowanego wodoru. Ponadto, konieczne jest utrzymywanie cały czas niskich temperatur oraz stała kontrola ciśnienia zbiornika. Odparowanie wodoru powoduje zwiększenie ciśnienia.

Wodór skroplony może być transportowany w termicznie izolowanych zbiornikach (na tankowcach lub w cysternach) lub dedykowaną siecią rurociągów. Rozwiązanie skroplonego wodoru używa się zazwyczaj przy potrzebie dostępu dużych wolumenów wodoru np. w transporcie morskim lub przemyśle kosmicznym.

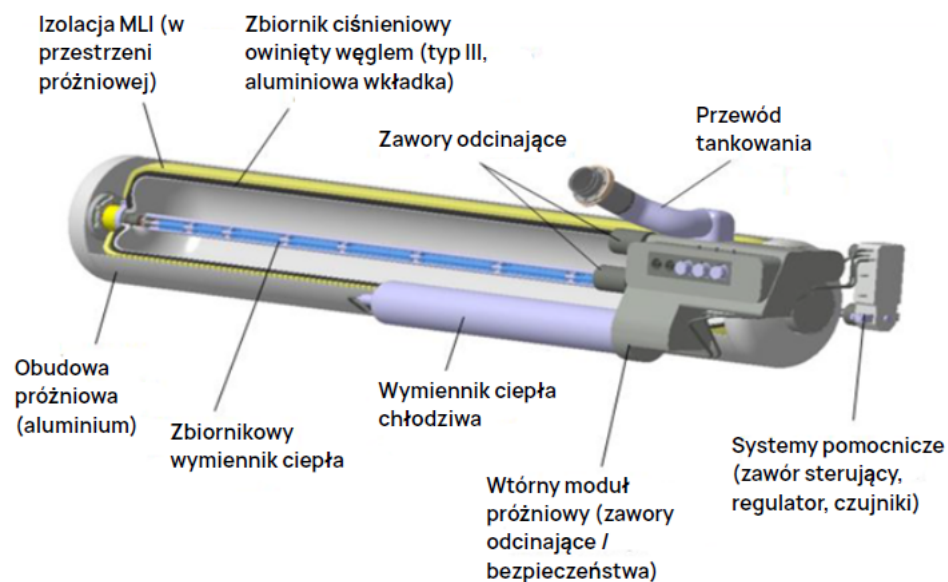
KARTA WIEDZY //

Wodór krio-sprężony (CcH_2)

W gospodarce wodorowej rozwijane są technologie zbiorników, łączące wysokie ciśnienie z niską temperaturą. Wodór schładzany jest do temperatury $-233^{\circ}C$ i utrzymywany w stanie gazowym. Pozwala to osiągnąć gęstość magazynowania na poziomie 80 g/l, co daje kilkukrotnie większą gęstość energii niż w zbiornikach ciśnieniowych. Utrzymanie wodoru w stanie gazowym zapewnia szybkie kompresowanie. Zbiorniki do magazynowania wodoru w stanie krio-ciśnieniowym są zbiornikami typu III z metalową wyściółką.

Przechowywanie wodoru w stanie krio-sprężonym pozwala uniknąć wyzwań związanych z parowaniem wodoru oraz zwiększyć gęstość energii. Z drugiej strony stosowane są niższe ciśnienia (poniżej 300 barów), co nie wymaga stosowania zbiorników IV typu i zmniejsza potrzebę stosowania kompozytów z włókna węglowego.

BUDOWA ZBIORNIKA TYPU III Z METALOWĄ WYŚCIOŁKĄ



KARTA WIEDZY //

Wodorki metali

Alternatywą dla przechowywania wodoru w jego czystej, niezwiązanej postaci, są metody oparte na zdolności wodoru do absorpcji. Wodór może być przechowywany na powierzchni materiału poprzez proces adsorpcji w postaci molekularnej lub jednoatomowej. Może również ulec dysocjacji na atomy, które są wchłaniane przez ciało stałe i magazynowane w sieci krystalicznej, na przykład w wodorkach metali. Inne metody obejmują tworzenie silnych wiązań chemicznych przez atomy wodoru, co prowadzi do powstania związków chemicznych, takich jak złożone i chemiczne wodorki.

Wodorki metali powstają w wyniku reakcji niektórych metali z gazem wodorowym. Najbardziej praktyczne wodorki metali reagują w temperaturze pokojowej pod ciśnieniem wodoru wynoszącym 500 kPa. Przykłady wodorków metali to m.in. wodorek palladu [PdH], wodorek magnezu [MgH₂] oraz wodorek lantanu i niklu [LaNi₅Hx]. Proces absorpcji wodoru przez takie metale jest egzotermiczny, natomiast desorpcja jest procesem endotermicznym, co oznacza, że do uwolnienia wodoru wymagana jest energia cieplna.

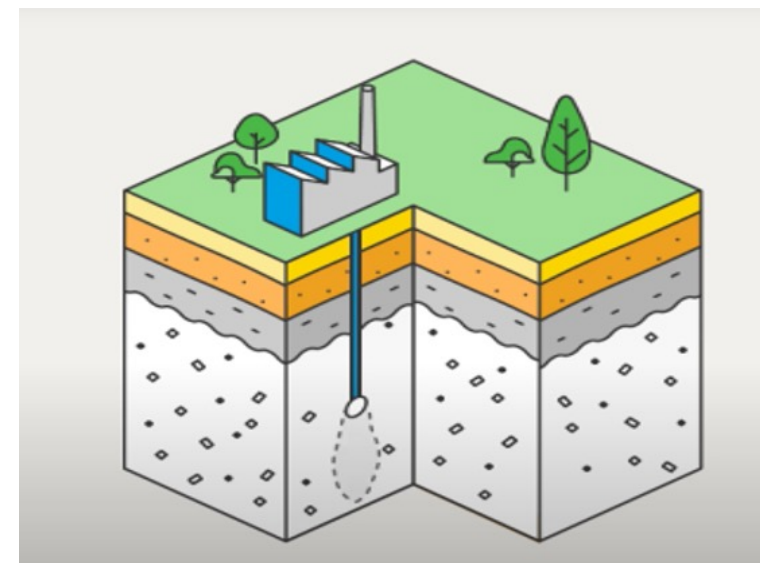
KARTA WIEDZY //

Magazyny wielkoskalowe

Wodór może być magazynowany w dużych ilościach pod ziemią, w jaskiniach, kawernach solnych i wyeksploatowanych polach naftowych i gazowych.

Wodór, ze względu na swój mały rozmiar cząsteczkowy, łatwo dyfunduje i wymaga zbiorników o wysokiej szczelności. Najlepiej w tym celu sprawdzają się groty solne, ponieważ sól nie wchodzi w reakcje z wodorem i jest gazoszczelna. Metoda ta pozwala magazynować duże wolumeny wodoru, natomiast sprawność szacowana jest na poziomie 30%, co stanowi duże wyzwanie ekonomiczne dla przedsięwzięć tego typu. Sytuacja może ulec zmianie wraz z rozwojem gospodarek wodorowych i szerszym, komercyjnym użyciem wodoru.

Na całym świecie jest wiele lokalizacji wielkoskalowego składowania wodoru. Przykładem jest jaskinia solna ICI w Teesside w Anglii, w której znajduje się 95% czystego wodoru i 3 – 4% CO₂.



Źródło: <https://www.hystock.nl/en/about-hystock/demonstration-hydrogen-storage-a8>

ŹRÓDŁA DANYCH

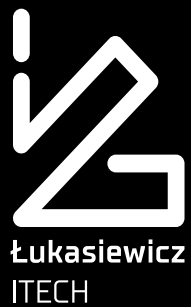
1. D. Kis, A review on the factors of liner collapse in type IV hydrogen storage vessels, *International Journal of Hydrogen Energy* 50 (2024)
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.316>
2. T. Bush, The role of liquid hydrogen in integrated energy systems—A case study for Germany, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 99 (2023)
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.308>
3. Y. Su, Review of the Hydrogen Permeability of the Liner Material of Type IV On-Board Hydrogen Storage Tank, *World Electr. Veh. J.* 2021, 12(3), 130;
<https://doi.org/10.3390/wevj12030130>
4. Strona DEEP.KBB <https://deep-kbb.de/>

MATERIAŁY UZUPEŁNIAJĄCE

1. Magazynowanie energii, *Academia*, 65 (2021), s. 34–40
2. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis, *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (2019) 12254–12269
3. Large-scale storage of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (2019). 11901–11919

MATERIAŁY UZUPEŁNIAJĄCE WIEDZĘ O WODORZE

1. Strategia Bezpieczeństwa Technologii Wodorowych w Polsce na lata 2023–2030
<https://itech.lukasiewicz.gov.pl/wp-content/uploads/2024/03/Strategia-bezpieczenstwa-technologie-wodorowych-w-polsce-na-lata-2023-2030.pdf>
 2. Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych
<https://itech.lukasiewicz.gov.pl/2023/10/11/bezpieczenstwo-w-technologiach-wodorowych-w-8-raportach/>
 3. H₂: Opinie i preferencje Polek i Polaków
<https://itech.lukasiewicz.gov.pl/2023/05/10/h2-opinie-i-preferencje-polek-i-polakow/>
 4. Wodór w Polsce w perspektywie 2030+ <https://itech.lukasiewicz.gov.pl/2023/06/09/wodor-polsce-w-perspektywie-2030/>
-



POPH2
Wiesz więcej!



Projekt dofinansowany ze środków
budżetu państwa, przyznanych przez
Ministra Edukacji i Nauki w ramach
Programu „Społeczna odpowiedzialność
nauki II”

MNiSW
