



Politechnika Śląska w Gliwicach
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Rola magazynów energii w budowaniu bezpieczeństwa energetycznego regionu

Dr hab. inż. Leszek REMIORZ , prof. PŚ

Prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz



**Politechnika
Śląska**

www.kmiue.polsl.pl

Plan prezentacji

1. Dlaczego magazynujemy energię
2. Parametry opisujące zasobniki energii
3. Wybrane metody magazynowania energii
4. Jak nie wspomnieć o wodorze
5. Poszukiwanie synergii – stawy słoneczne
6. Podsumowanie



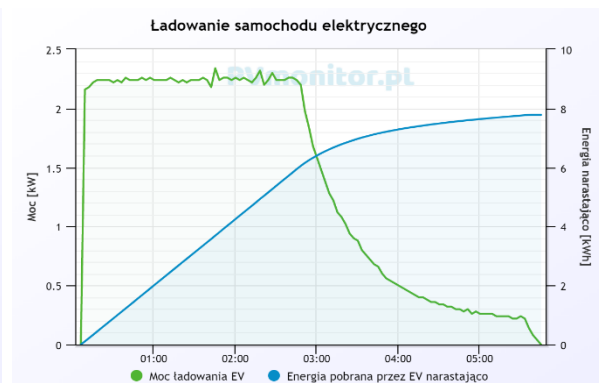
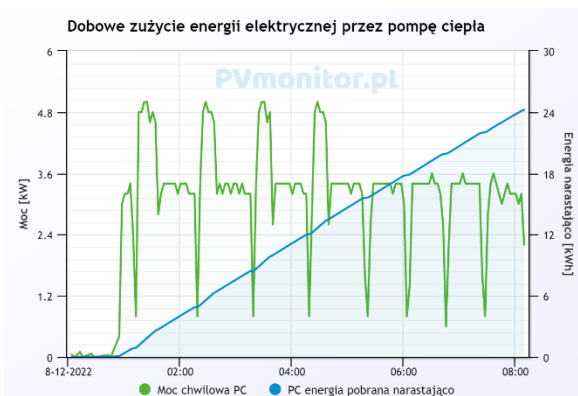
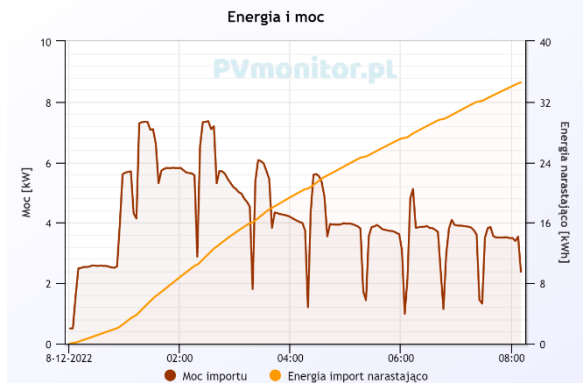
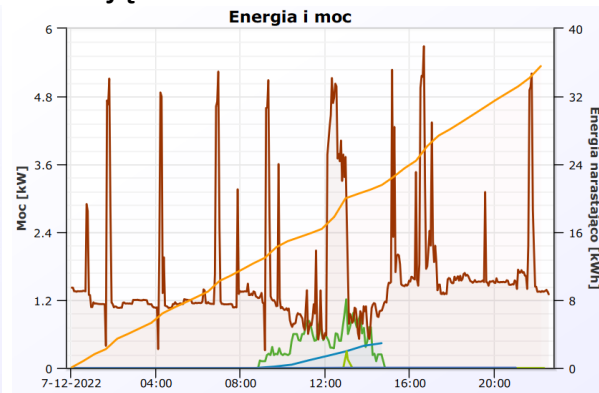
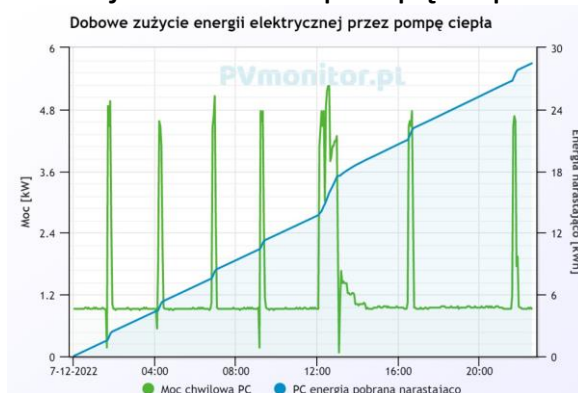
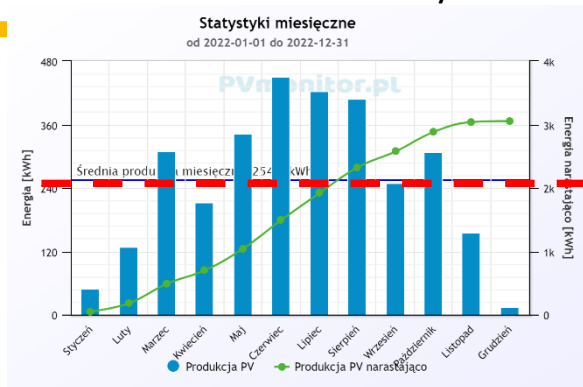
Dlaczego magazynujemy energię...



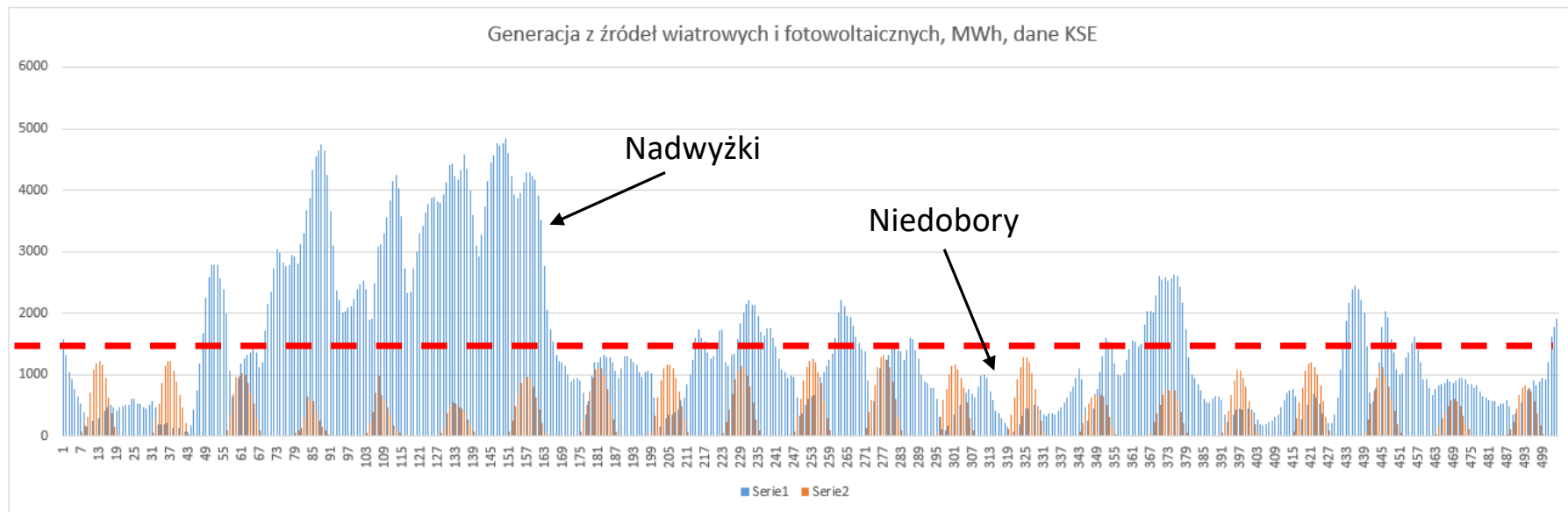
Uzasadnienie konieczności stosowania magazynów energii, skala mikro

Źródło: pvmonitor.pl
<https://www.ure.gov.pl/pl/oze>

Przykładowa instalacja domowa z pompą ciepła i instalacją PV



Dane dostępne na stronach PSE



Seria 1 – produkcja z turbin wiatrowych, seria 2 – produkcja PV

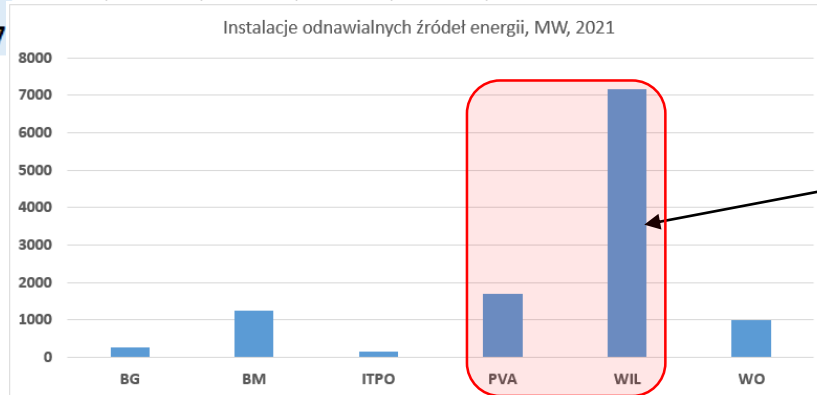
Instalacje odnawialnych źródeł energii wg stanu na dzień 31 grudnia 2021 r.

<https://www.ure.gov.pl/pl/oze/>

Etykiety wierszy	Moc [MW]	2020	2019	
⊕ BG	257.3	255.7	245.4	Biogaz
⊕ BM	1 248.9	1 512.1	1 492.0	Biomasa
⊕ ITPO	169.8	?	?	Termicznego przekształcanie odpadów
⊕ PVA	1 693.2	887.0	477.0	Promieniowanie słoneczne
⊕ WIL	7 159.0	6 347.1	5 917.0	Turbiny wiatrowe
⊕ WO	990.5	976.0	973.0	Hydroenergia
Sumaryczna zainstalowana moc, MW	11 518.7			



Błędy prognoz dla sieci systemowej - ponad 30% błędu wynika z wpływu OZE, przekłada się to na problemy techniczne, kłopotliwe prognozowanie, wzrost kosztów zakupów bieżących...



Wartości dominujące to energetyka wiatrowa i PV

Generacja z PV oraz turbin wiatrowych znacząco wpływa na system



Obecnie wyznaczone cele klimatyczne nie jesteśmy w stanie zrealizować bez szerokiego rozwoju magazynów energii



W kontekście poprzednich zestawień można stwierdzić, że:

- a) magazynowanie energii jest koniecznością
- b) istnieje potrzeba magazynowania energii zarówno w perspektywie krótkoterminowej jak i długoterminowej (magazyny sezonowe)
- c) wraz z rozwojem źródeł odnawialnych drastycznie wzrasta ich wpływ na sieć systemową, bez magazynowania jest to niekorzystne zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia
- d) odnawialne źródła energii nie są dyspozycyjne



<https://strefaenergii.com/energia-magazynowana-w-sieci-energetycznej/>



Istnieją również inne przesłanki do stosowania magazynów energii...

- a) lepsze dopasowanie do istniejących taryf handlowych
- b) stosowanie inteligentnych, oszczędnych systemów zarządzania

W kontekście bezpieczeństwa...

- a) zasobniki energii poprawiają niezawodność systemu i ciągłość zasilania
- b) umożliwiają pracę niezależną, wyspową
- c) mogą zapewnić lokalne zasilanie przy niedostępnej sieci systemowej i zagrożeniach zewnętrznych
- d) umożliwiają lokalne zagospodarowanie energii odpadowej



Komercyjny piaskowy (100 ton) magazyn ciepła działający na terenie elektrowni Vatajankoski, Finlandia

<https://swiatoze.pl/pierwszy-na-swiecie-komercyjny-piaskowy-magazyn-ciepła-100-ton/>



Jakimi więc parametrami opisujemy zasobniki energii?



Główne parametry charakteryzujące magazyny energii to:

- Moc znamionowa, W
- Pojemność magazynu, Wh
- Czas rozładowania, s
- Czas odpowiedzi, s
- Współczynnik samorozładowania, %
- Efektywność magazynowania, %
- Wolumetryczna i grawimetryczna gęstość energii i mocy, W/kg, Wh/kg...
- Temperatura pracy, K
- Trwałość, żywotność
- Aspekty środowiskowe
- Efekt pamięci
- Wymagania konserwacyjne
- Zdolność recyklingu
- Dojrzałość technologiczna
- Koszty



Metody magazynowania energii...



Metody magazynowania energii:

1. **Termiczne** - akumulacja ciepła jawnego/utajonego, zasobniki wodne, przemiana fazowa
2. **Elektrochemiczne** (akumulatory i baterie ładowalne)
3. **Mechaniczne** – wirująca masa, sprężone gazy ...
4. **Chemiczne**
5. **Elektryczne magazyny energii** - superkondensatory, nadprzewodniki
6. **W polu elektrycznym, magnetycznym**
7. **I inne**



Zasobnik budynkowy

https://ppte2050.pl/platforma/bzep/static/uploads/Polski_Instalator_Staroscik_NS03.pdf



Termiczne magazyny energii (TES)

Podział ze względu na temperaturę pracy:

- a) niskotemperaturowe, do 120°C
- b) średniotemperaturowe, do 120-500°C
- c) wysokotemperaturowe, powyżej 500 °C

Podział ze względu na czas magazynowania

- a) krótkoterminowe (godziny, doby)
- b) średnioterminowe (tygodniowe, miesięczne)
- c) długoterminowe (sezonowe)



Piaskowy zasobnik ciepła zintegrowany z układem energetycznym

Termiczne magazyny energii (TES)

Podział ze względu na zjawisko fizyczne:

- a) Ciepło właściwe
- b) Przemiana fazowa (PCM)
- c) Przemiana chemiczna



Długoterminowy magazyn energii cieplnej wykorzystujący „gorące skały”

Technologia	Pojemność, kWh/t	Moc, MW	Sprawność ogólna, %	Koszt energii EUR/kWh
Ciepło właściwe	10-50	0.001-10	50-90	0.1-10
Przemiana fazowa	50-150	0.001-1	75-90	10-50
Reakcja chemiczna	120-250	0.01-1	75-95	8-100

Źródło: <https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemowe/119630-magazynowanie-ciepla-rodzaje-magazynow>



Magazynowanie elektrochemiczne, akumulatory

Magazyny elektrochemiczne uzyskują sprawności 85%. Wymagają dalszych badań ze względu na wysoką cenę i ograniczona żywotność. W trakcie pracy najczęściej następuje stopniowa degradacja jakości elektrolitu.



<https://globenergia.pl/najwiekszy-elektrochemiczny-magazyn-energii-pge-zdradza-szczegoly-inwestycji/>

Baterijny Magazyn Energii Elektrycznej (BMEE) w Żarnowcu



Schemat systemu magazynowego w Żarnowcu.

Źródło: PGE



Magazyny mechaniczne, grawitacyjne

[Journal of Energy Storage](#)
Volume 44, Part B, 15 December 2021, 103397

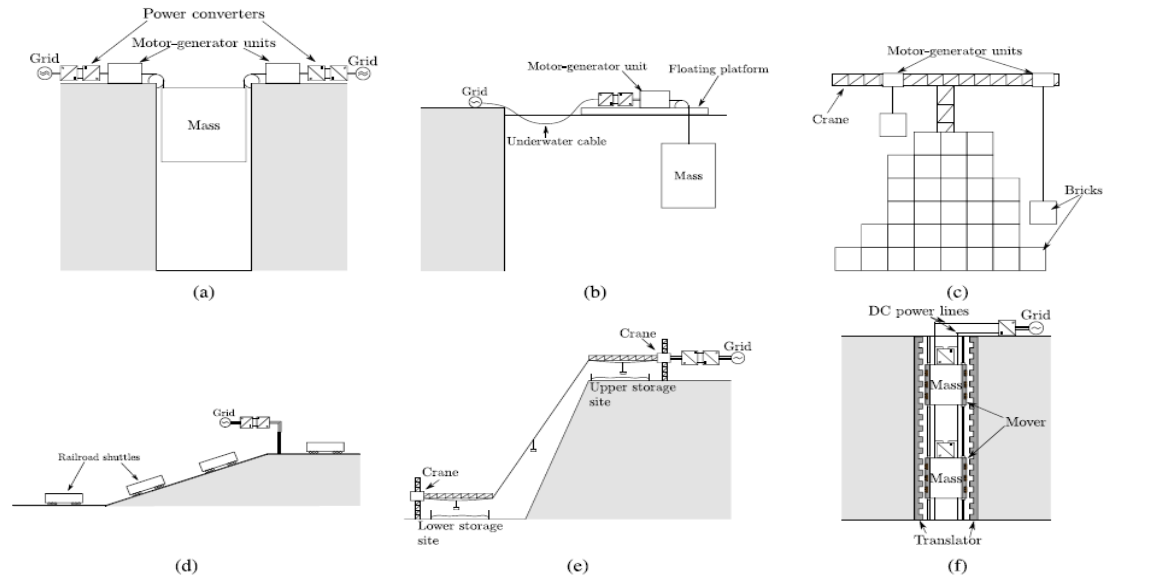
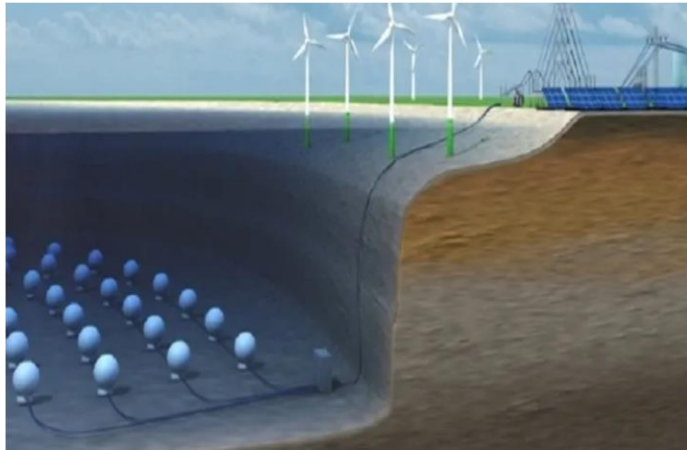


Fig. 1. Illustrations of the different gravity energy storage systems proposed by (a) Gravitracity, (b) SinkFloatSolutions, (c) Energy Vault, (d) Advanced Rail Energy Storage, (e) Mountain Gravity Energy Storage and (f) the LEM-GES system.



Magazyny mechaniczne, grawitacyjne



<https://swiatoze.pl/nowy-system-magazynowania-energii-wielka-nadzieja-dla-wiatrakow/>



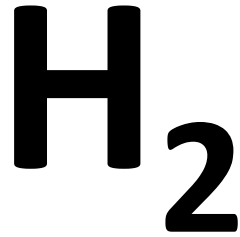
Model zbiornika podwodnego w początkowej fazie napełniania, <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/09/underwater-compressed-air-storage-fantasy-or-reality.html> [dostęp: 20.10.2015]



Koło zamachowe NASA, Wikipedia

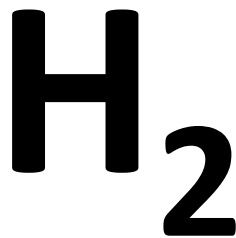
System podwodnych zbiorników, w trakcie ładowania wypompowywana jest z nich woda, w czasie rozładowania napływająca woda napędza turbinę z generatorem



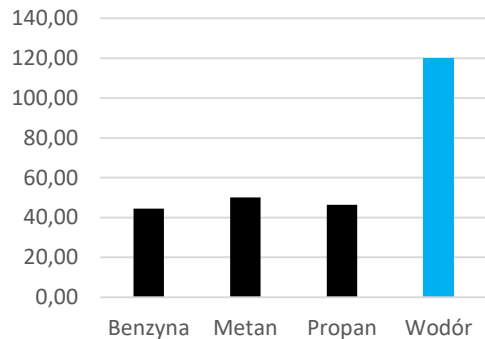


Jak nie wspomnieć o wodorze...

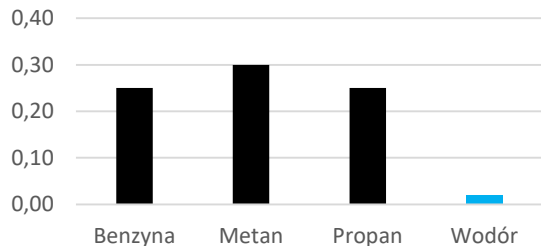




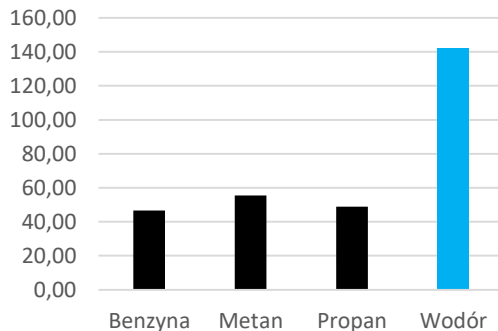
Wartość opałowa, MJ/kg



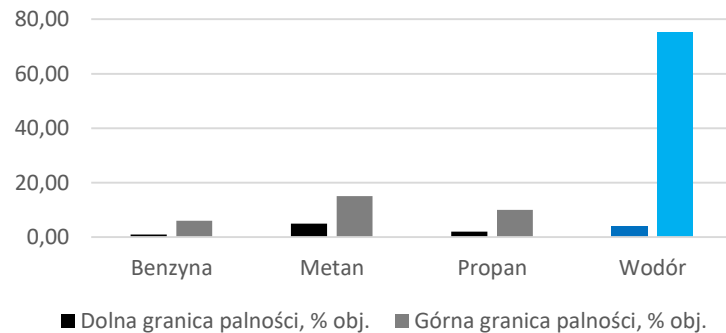
Energia zapłonu, mJ



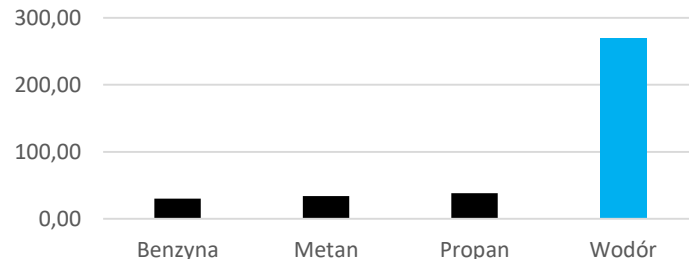
Ciepło spalania, MJ/kg

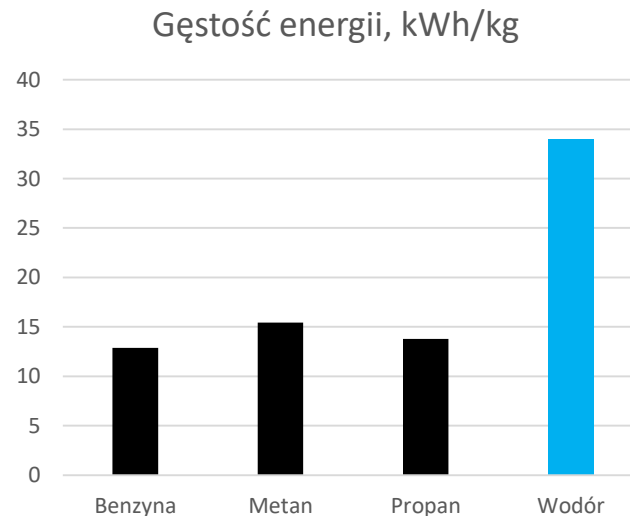
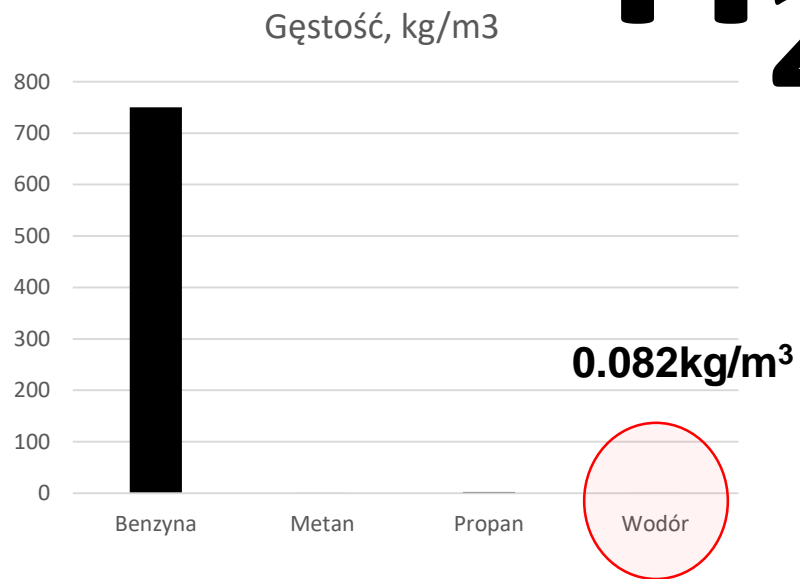
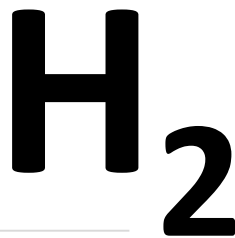


Granice palności



Prędkość płomienia, cm/s





Głównym problemem przy magazynowaniu jest niezwykle mała gęstość wodoru



Magazyny wodorowe

- **Magazyn elektrochemiczny (akumulator)**

1kWh dostępna w magazynie wymaga **1.25kWh** dostarczonej
*(uwzględniono straty: sieci(5%), procesu ładowania(1%), inwertera(10%), silnika(5%)-
wielkości orientacyjne)*

- **Magazyn wodorowy**

1kWh dostępna w magazynie wymaga **2.5kWh** dostarczonej
*(uwzględniono straty: elektrolizera(20%), procesu sprężania(15%), ogniwa paliwowego(40%),
inwertera(10%), silnika(5%)-wielkości orientacyjne)*



Magazyny wodorowe

- **1kg wodoru** – 12 m^3 (**12 tyś litrów!**) – warunki normalne – **34kWh**
- 1kg wodoru – 0.027m^3 (27 litrów) przy ciśnieniu 700bar - 34kWh
- 1kg benzyny – 0.0013m^3 (1.3 litra) – 12.5kWh
- 2.7kg benzyny – 0.0035m^3 (3.5 litra) – 34kWh
- 1kg węgla – 6kWh

W naszej strefie klimatycznej potrzebujemy rocznie dla budynku 200m^2 , około $10\,000\text{kWh}$ energii = **300kg** wodoru (w zaokrągleniu)

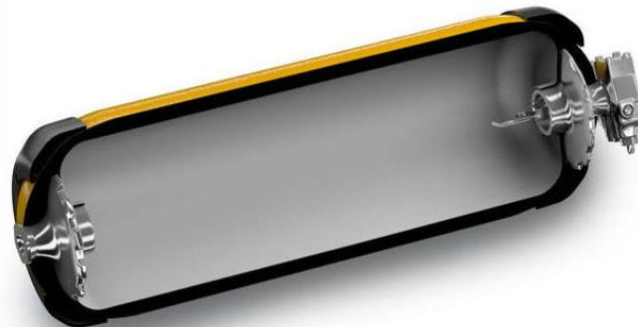
- **2.5** x 300kg x $12\text{m}^3/\text{kg}$ = **9000m³** – zbiornik 90m x 10m x 10m (zbiornik wielokrotnie większy od budynku!)
- **2.5** x 300kg x $0.027\text{m}^3/\text{kg}$ = **20m³** – zbiornik 3m x 3m x 2.2m (700bar)



<https://mlodytechnik.pl/technika/30805-swit-epoki-wodoru-jeden-z-najwazniejszych-klockow-w-energetycznej-ukladance-przyszlosci>



Nawet najnowsze technologie pozwalają zmagazynować wodór o masie nie większej niż 12% masy zbiornika, zwykle dużo mniej i nie więcej niż 5% tej masy.



Zbiornik wodoru o ciśnieniu 70 MPa. (Toyota)



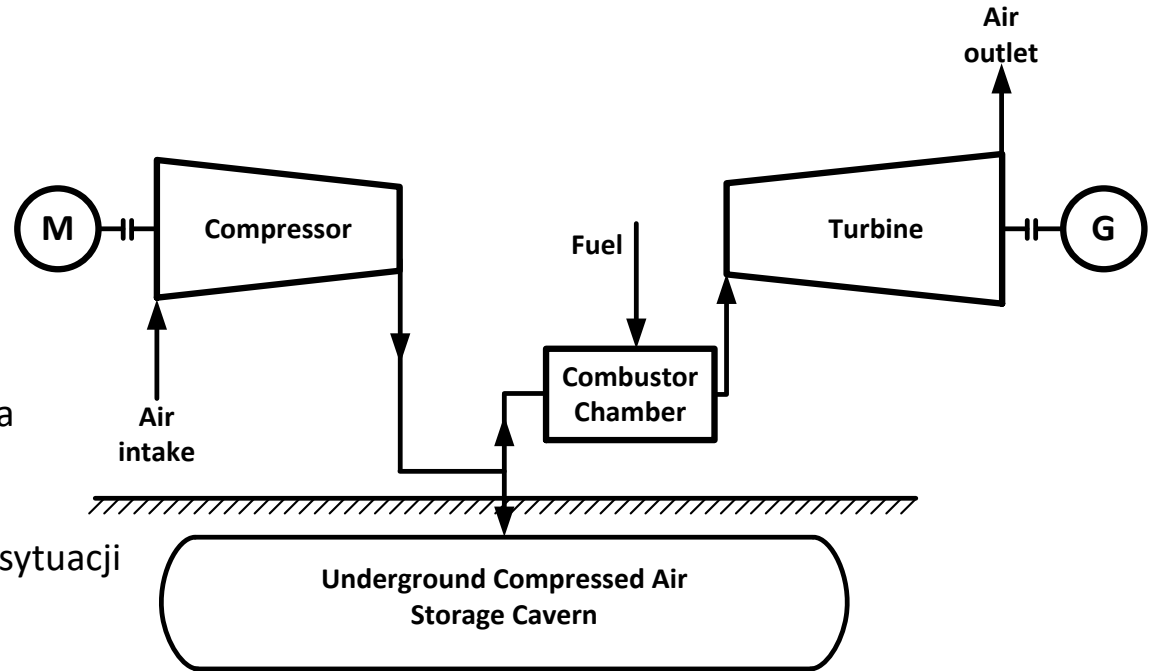
Magazyn wodoru

Wybrane inne metody



Magazyny energii w sprężonym powietrzu, technologia *Compressed Air Energy Storage (CASE)*

Czynnikiem kumulującym jest energia potencjalna sprężonego powietrza. Sprężanie następuje w okresach nadprodukcji energii elektrycznej, w sytuacji niedoboru energii rozpręża się gaz w ekspanderach produkując energię elektryczną



Schemat ideowy diabaticznej instalacji CAES.

Magazynowanie w powietrzu skroplonym, Idea technologii LAES

Zalety

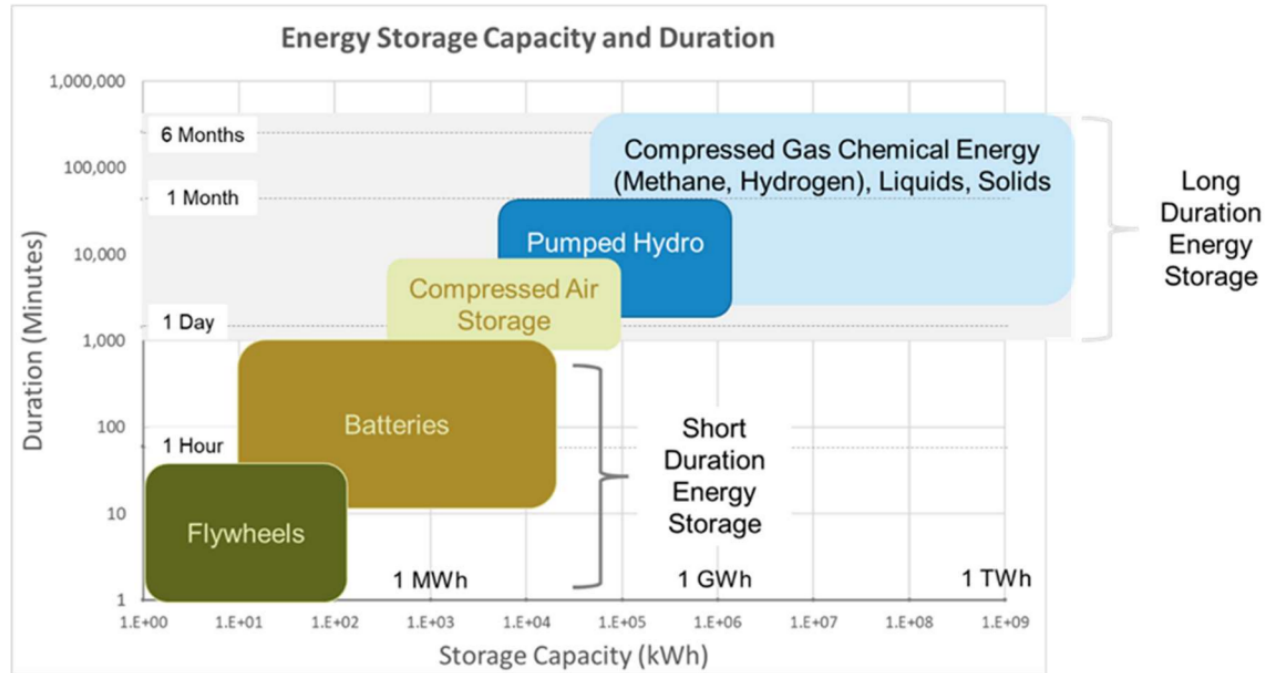
- Brak ograniczeń lokalizacyjnych, co odróżnia tą technologię CAES i elektrowni szczytowo-pompowych.
- Struktura energetyczna oparta na sprawdzonej technologii
- Komercyjnie dostępne zbiorniki (np. do ciekłego tlenu bądź LNG).
- Duży zakres dostępnych mocy i długa żywotność.
- Brak zapotrzebowania na wodę i niskie oddziaływanie na środowisko.
- Wysoki potencjał zagospodarowania ciepła odpadowego oraz integracji z istniejącymi blokami energetycznymi.

Ograniczenia

- Przy dostępnych komercyjnie maszynach i urządzeniach, jednostką ograniczającą skalę instalacji jest instalacja kriogeniczna. Należy rozważyć wykorzystanie baterii instalacji, co istotnie wpływa na wysokość kosztów inwestycyjnych.



Stosowalność technologii magazynowania energii



https://www.researchgate.net/publication/358700260_Long-Duration_Utility-Scale_Energy_Storage/figures?lo=1

Poszukiwanie synergii - stawy słoneczne...



Wprowadzenie



Stawy słoneczne to niskotemperaturowe zasobniki ciepła wykorzystujące do akumulacji energii cieplnej warstwowo utrzymywane solanki (np. NaCl , MgCl_2) oraz czystą wodę. Klasyfikujemy je w obszarze metod termicznych wykorzystujących pojemność cieplną, w tym przypadku solanki.



Rys historyczny



Historia tej technologii **stawów słonecznych** sięga początku XX wieku. W literaturze pojawiła się informacja o nietypowych zjawiskach temperaturowych obserwowanych w kilku naturalnie występujących jeziorach na Węgrzech.

*Pod koniec września temperatura wody na powierzchni jeziora jest zbliżona do temperatury otoczenia, natomiast już **na głębokości około 1 metra sięga 65°C**.*

*Pomiary ujawniły (Kalecsinsky, Rozsa) **silny gradient stężenia soli w funkcji głębokości**. Zaproponowano, że za wysokie temperatury utrzymujące się poniżej lustra wody odpowiada skuteczne **tłumienie konwekcji naturalnej** spowodowane przez **gradient zasolenia** oraz **absorpcja promieniowania słonecznego w solance**. Potwierdziły to późniejsze badania.*



Rys historyczny

Pierwsze sztuczne stawy słoneczne zbudowano w Izraelu w 1958 r. w pobliżu Morza Martwego, gdzie przekształcono płytkie zbiorniki służące do odparowania wody z solanki (*saliny*) w stawy słoneczne.

<https://swiatoze.pl/staw-sloneczny-jako-sposob-termicznego-magazynowania-energii/>



Rozwiązania te nie miały charakterystycznej warstwy konwekcyjnej, a gradient gęstości soli przebiegał przez całą głębokość stawu. Najlepsze wyniki uzyskiwano z chlorkiem magnezu ($MgCl_2$), gdzie staw o powierzchni 625 m^2 osiągał maksymalną temperaturę 96°C . Największy staw miał powierzchnię 1375 m^2 i nie był konstrukcją udaną, ponieważ wraz ze wzrostem temperatury, do około 74°C , gazy rozkładu bakteryjnego w glebie pod stawem, unosiły się w górę uniemożliwiając utrzymanie niezbędnego gradientu zasolenia.



Rys historyczny



El Paso Solar Pond (USA), 3000m², 3.2m depth

https://www.researchgate.net/publication/221971602_Economic_Feasibility_of_Salinity_Gradient_Solar_Ponds_SGSP_for_Production_of_Fresh_Water_and_Pure_Salts_from_Saline_and_Hypersaline_Waters/figures?lo=1

University of Illinois Solar Pond 2000m²



https://documen.site/download/salt-gradient-solar-pond_pdf

35-50\$/m², czas zwrotu inwestycji 7-mlat

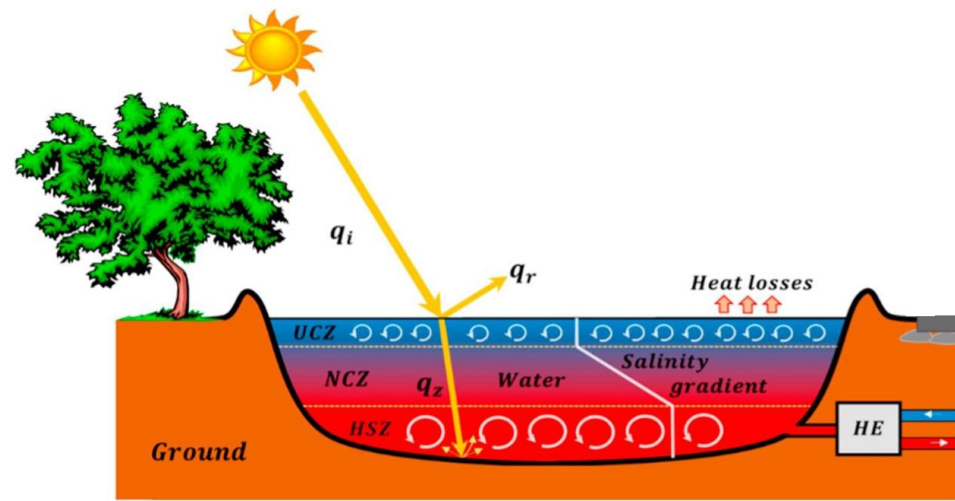


Koncepcja i budowa...

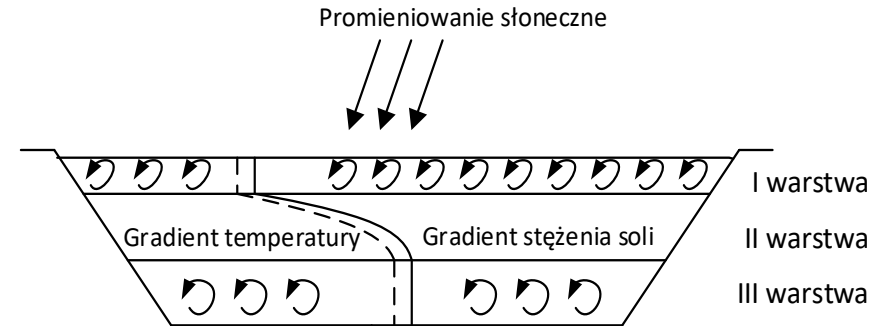


Staw słoneczny podzielony jest na trzy umowne warstwy:

- **Pierwsza strefa** - górna warstwa konwekcyjna zawierająca czystą wodę, temperatura zbliżona jest do temperatury otoczenia.
- **Druga strefa** – warstwa pośrednia niekonwekcyjna. Wystarczająco duży gradient zasolenia wywołuje konwekcję w tej warstwie pomimo absorpcji ciepła i wzrostu temperatury na dnie stawu.
- **Trzecia strefa** – dolna warstwa konwekcyjna magazynująca energię cieplną - stały poziomem gęstości zasolenia w granicach od 20% do 30%, pozwala utrzymać zgromadzoną energię cieplną na dnie stawu, unikając jednocześnie procesu konwekcji do wyższych warstw. Temperatura w strefie akumulacyjnej oscyluje w granicach od 50°C do 90°C .



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041731244X#f0065>



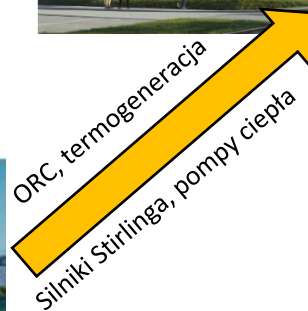
Koncepcja wykorzystania stawu słonecznego



Energia słoneczna



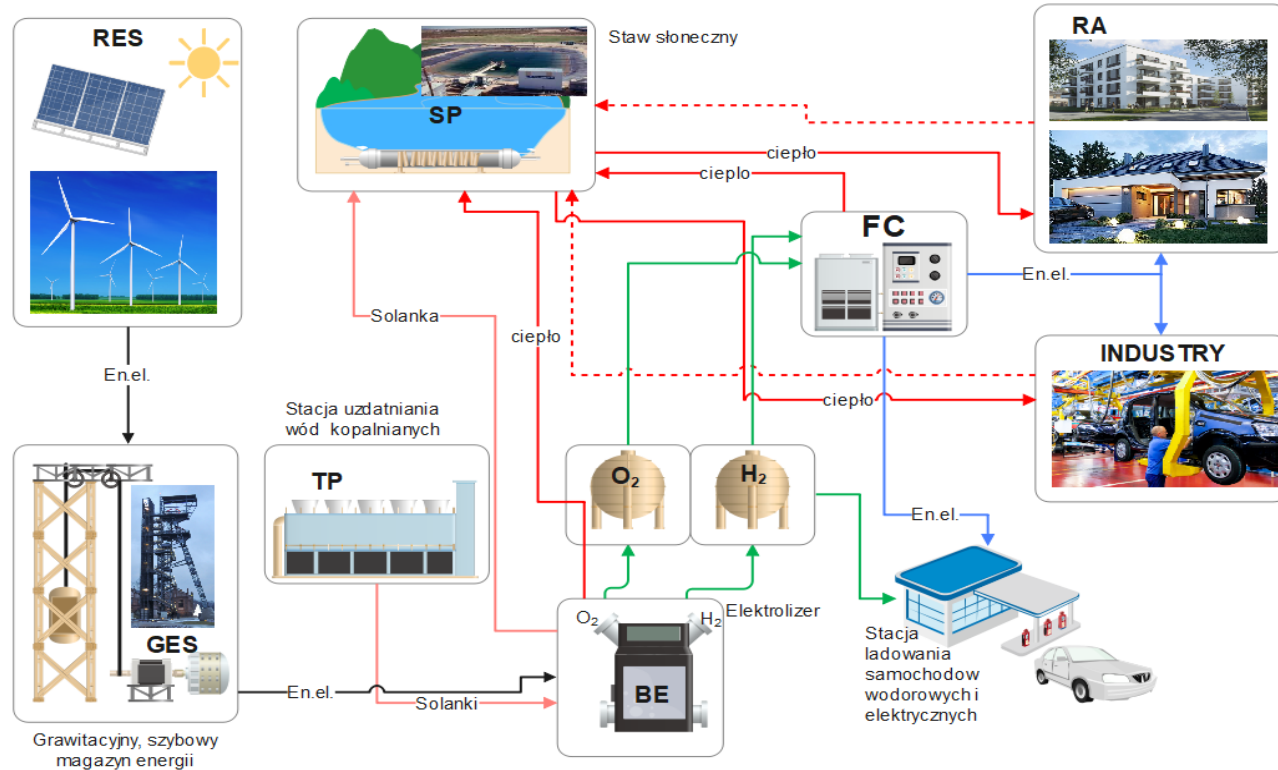
Staw zasilany energią słoneczną i dodatkowo ciepłem odpadowym



Ciepło odpadowe



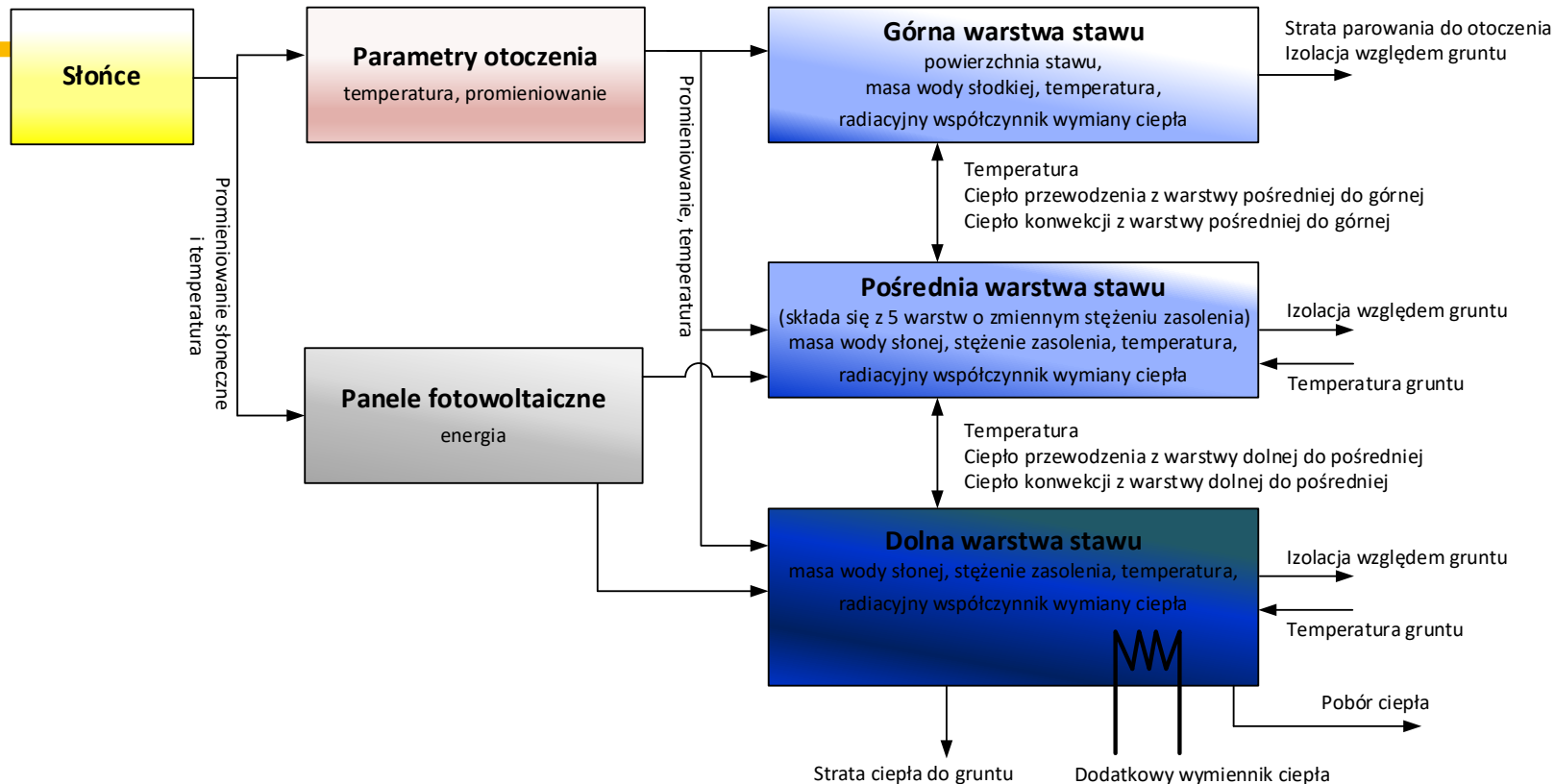
Przykład złożonej struktury energetycznej wykorzystującej stawy słoneczne i efekt synergii



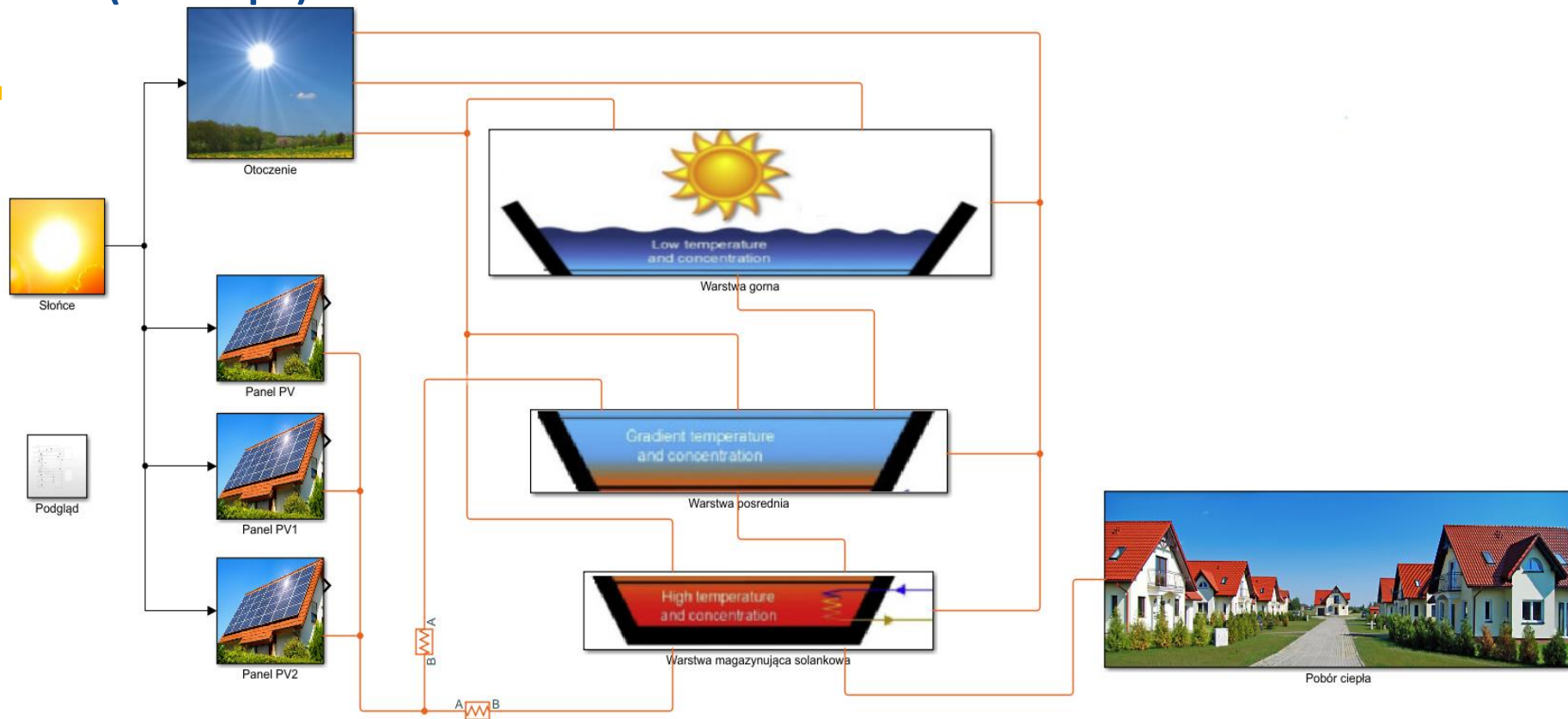
Modelowanie...



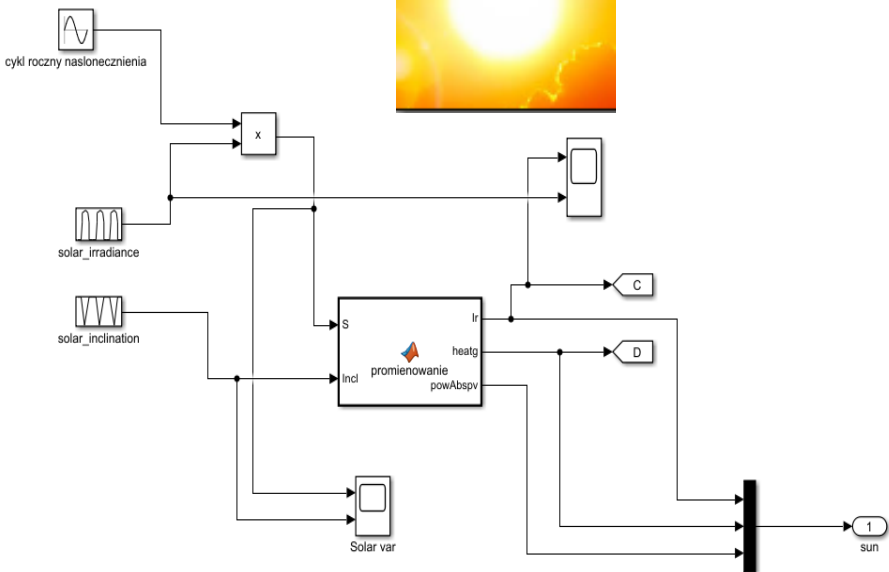
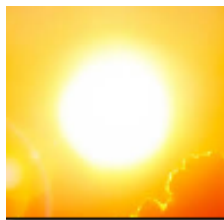
Schemat układu zintegrowany ze stawem słonecznym i ogniwami mi



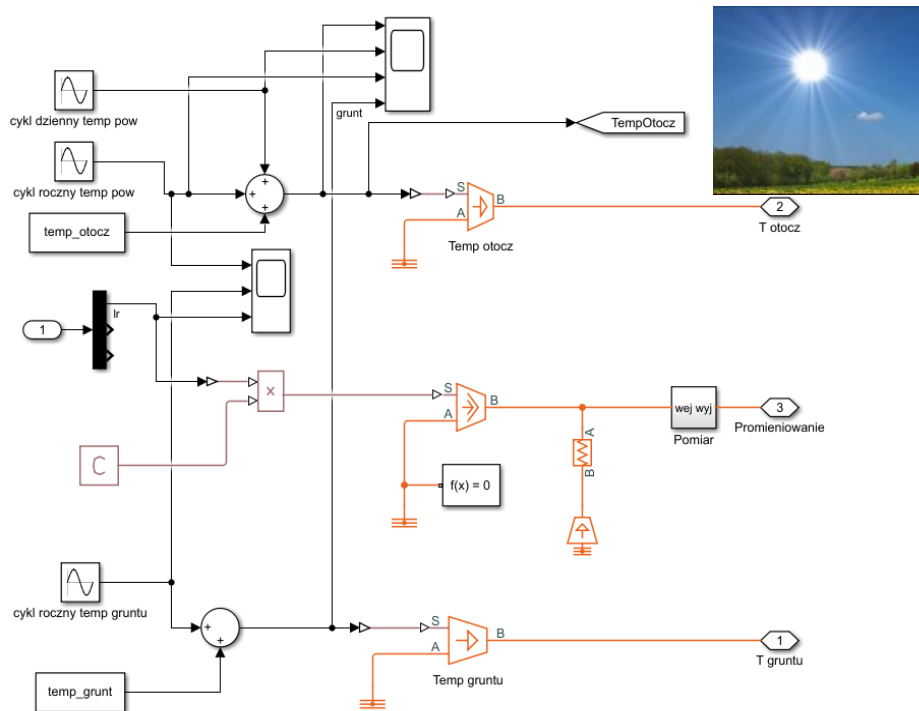
Model (simscape)



Model promieniowania i parametry otoczenia



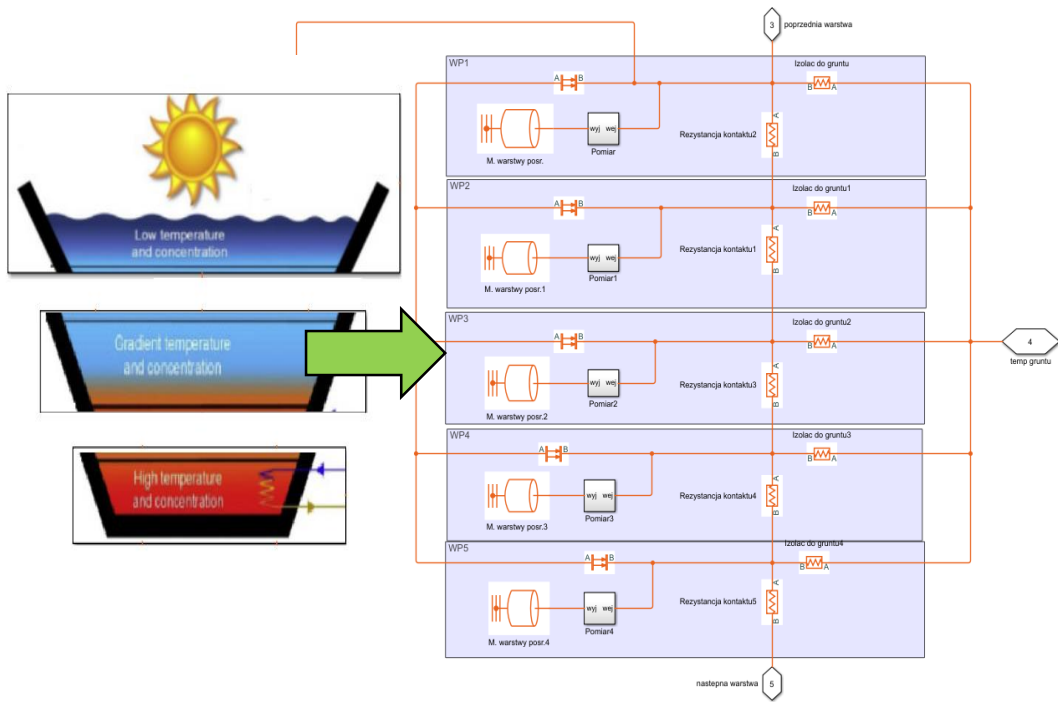
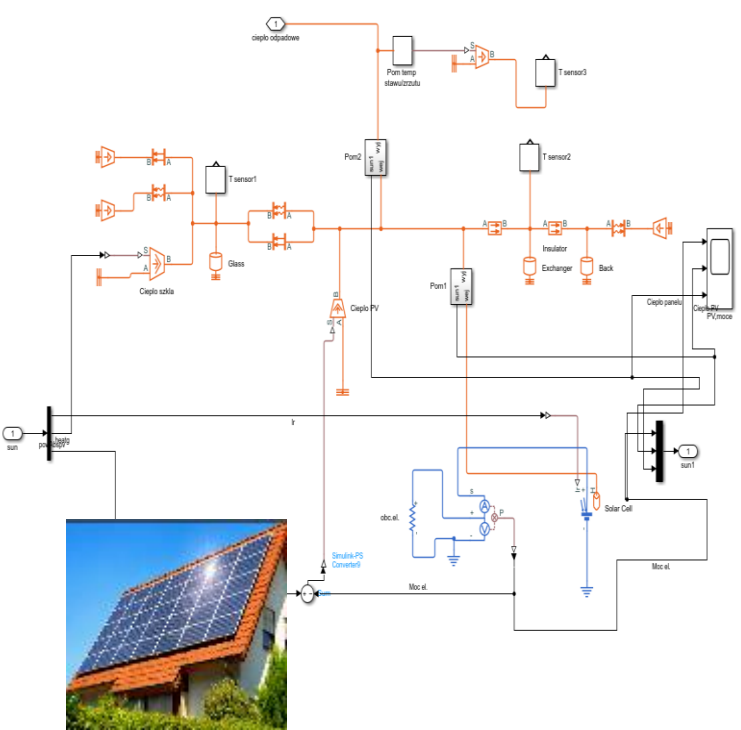
Model nasłonecznienia



Model otoczenia, cykl dzienny, cykl roczny

Panel PV

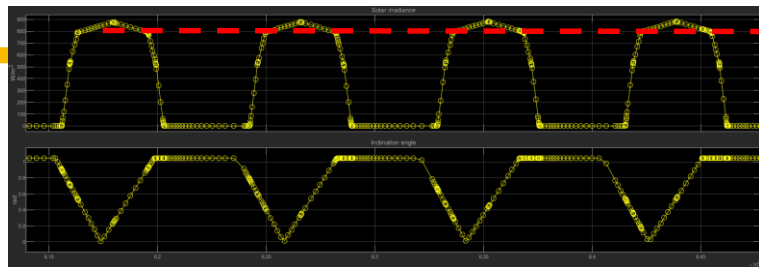
Model stawu słonecznego



Wstępne wyniki...

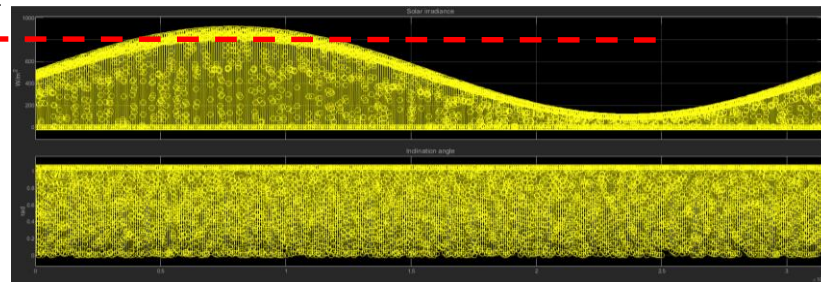


Wybrane doby charakterystyki nasłonecznienia przyjęte do modelowania- wstępne wyniki modelowania uzyskane w środowisku Matlab®

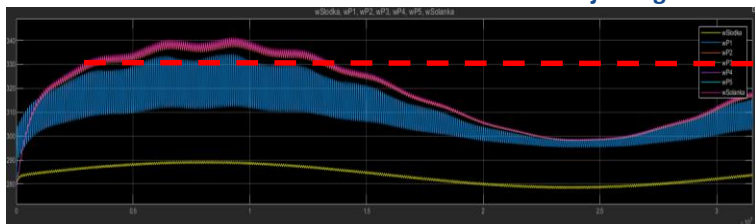


800W/m²

Charakterystyka przyjętego natężenie napromienienia słonecznego w [W/m²] dla całego roku kalendarzowego



Przebiegi temperatur w [K] w warstwie wierzchniej (kolor żółty) i warstwie magazynującej (kolor czerwony) – wyniki modelowania w okresie jednego roku.



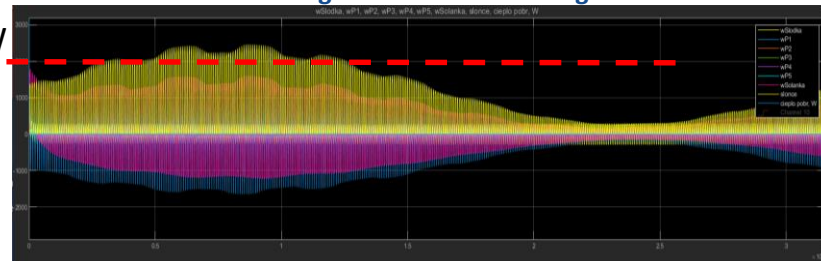
60°C

Pomimo niekorzystnych dobowych i rocznych wahań temperatury powietrza, to temperatura warstwy magazynującej energię cieplną potrafi wzrosnąć do nawet 70°C.

9m²

Dla stawu słonecznego paradoksalnie obniżenie temperatury zimą poprawia warunki odbioru ciepła odpadowego, ze względu na zwiększoną dostępną różnicę temperatur.

Przebiegi rozptyłu mocy cieplnej w [W] w poszczególnych warstwach stawu dla całego roku kalendarzowego



2kW

Wyniki dotyczą stawu słonecznego o powierzchni wynoszącej 9 m². Przyjęto liniową zmianę zasolenia w warstwie pośredniej. Dostępne moce rzędu kilku kW.



Istnieją przesłanki integracji z systemem odwadniania kopalń oraz procesem elektrolizy

Konieczność zaopatrywania stawu słonecznego w świeżą wodę i roztwory soli co wiąże się ze znacznymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi.

Produkcja wodoru z wykorzystaniem elektrolizera alkalicznego wymaga zasilania wodami solankowymi.

W wyniku procesu elektrolizy **otrzymamy ciepło jako produkt uboczny** oraz solankę stężoną

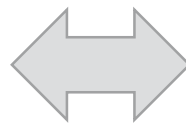
Zasilanie bezpośrednie procesu elektrolizy z OZE jest niekorzystne ze względu na ich niestabilność

Solanka jest produktem ubocznym procesu wydobywania kopalniach i uznawana jest za potencjalnie niebezpieczny odpad.

Oczyszczanie wód dołowych prowadzi do powstania stężonego roztworu soli (jako produktu ubocznego) i uzdatnionej wody, która może być odprowadzana do wód powierzchniowych lub rzek

Stawy słoneczne mogą przechowywać duże ilości ciepła, nawet w perspektywie sezonowej, ale **wymagają zasilania w solanki**

Grawitacyjne, wysokosprawne bufory energii mogą zdecydowanie poprawić stabilność zasilania w energię elektryczną



Podsumowując...



- odnawialne (nieprzewidywalne) źródła energii będą coraz powszechniej stosowane
- magazynowanie energii jest koniecznością w kontekście celów klimatycznych
- wybierane technologie powinny być starannie przemyślane
- staw może być dobrym magazynem energii odpadowej, straty ciepła do otoczenia mogą być minimalne albo nawet zerowe ze względu na uzupełniający wpływ energii słonecznej
- w przypadku użycia stawu jako akumulatora ciepła dla magazynowania energii odpadowej z innych instalacji, paradoksalnie obniżenie temperatury zimą poprawia warunki odbioru ciepła odpadowego, ze względu na zwiększoną dostępną różnicę temperatur
- opłacalność ekonomiczna wzrasta gdy są dostępne lokalne zasoby soli lub słonej wody
- utylizacja solanek kopalnianych wydaje się dobrze komponować z potrzebami technologii stawów słonecznych
- konieczne dalsze kompleksowe badania...





**Dziękuję
za uwagę!**



Phone:
+48 32 237 22
04



E-mail:
Leszek.Remiorz@polsl.
pl
Janusz.Kotowicz@polsl
.pl



Follow us:
www.polsl.pl
[www.kmiue.polsl
l.pl](http://www.kmiue.polsl.pl)

