ITC

Technologie magazynowania energii dedykowane do skali systemowej

Krzysztof Badyda, Janusz Lewandowski, Wojciech Bujalski,
Piotr Krawczyk
Politechnika Warszawska,
Instytut Techniki Cieplnej

Posiedzenie Komitetu Problemów Energetyki PAN

14 września 2017

Jabłonna - Centrum Konwersji Energii i OZE IMP PAN

Zakres tematyczny

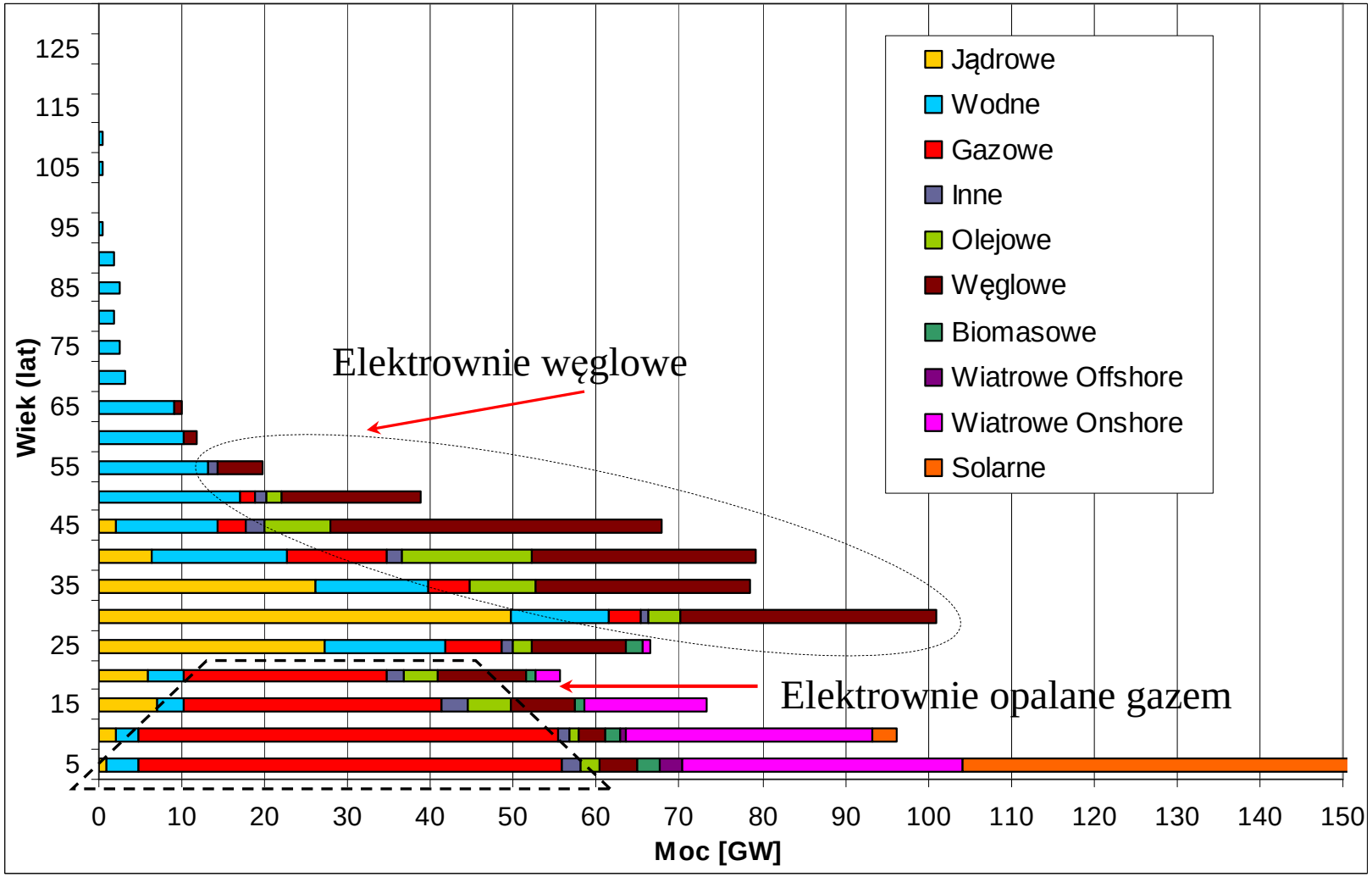
1. **Zmienność podaży energii elektrycznejz OZE, zmienność zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło.**

2. **Lokalizacja w systemie elektroenergetycznym oraz skala magazynów energii połączonych z siecią - technologie**

3. **Technologie magazynowania energii- magazyny w dużej skali (CAEL LAES)**

4. **Technologie magazynowania ciepła - zasobniki**

5. **Magazynowanie gazu jako sposób akumulacji energii**



Struktura wieku elektrowni (z OZE włącznie) w krajach EU27 - według roku przekazania do eksploatacji (źródło: COM(2013) 180 final)

Najmłodsze wiekiem: elektrownie słoneczne oraz wiatrowe. Z instalacji opalanych paliwami kopalnymi – elektrownie z turbinami gazowymi.

Czy Polska jest krajem, który niewiele inwestuje w OZE?

Elektrownie wiatrowe, moc zainstalowana według prognozy. Źródło: **Wnioski z analiz prognostycznych na potrzeby Polityki energetycznej Polski do 2050 roku**

Rok	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
El. wiatrowe na lądzie	**1 800**	**3 050**	**7 050**	**9 800**	**13 500**	**18 000**	**19 000**	**20 000**	**21 000**

Elektrownie i elektrociepłownie odnawialne, moc zainstalowana na koniec roku 2011, 2012 2013, 2014, 2015, 2016 oraz do czerwca 2017. [MW]. Źródło URE.

Rodzaj instalacji	**2006**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**VI.2017**
El. biogazowe	36.76	82.884	103.487	131.247	162.187	188.549	212.497	233.967	235.583
El. słoneczne	0	0.033	1.124	1.289	1.901	21.004	71.031	99.098	102.067
El. wodne	934.031	937.044	951.389	966.103	970.182	977.007	981.799	993.995	992.737
El. biomasowe	238.79	356.19	409.679	820.700	986.873	1008.245	1122.670	1281.065	1323.225
El. wiatrowe	152.56	1180,272	1616.361	2496.748	3389.541	3833.832	4582.036	5807.416	5824.421
Łącznie	204.604	2556.42	3082.04	4416.09	5510.68	6028,637	6970.033	**8415.541**	8440.459

Moc zainstalowana KSE na koniec 2015 r. 40 445 MW, a 2016 r. 41 396 MW

Mikroinstalacje - energetyka prosumencka. Fotowoltaika - jeszcze dodatkowo ok. 100 MW.

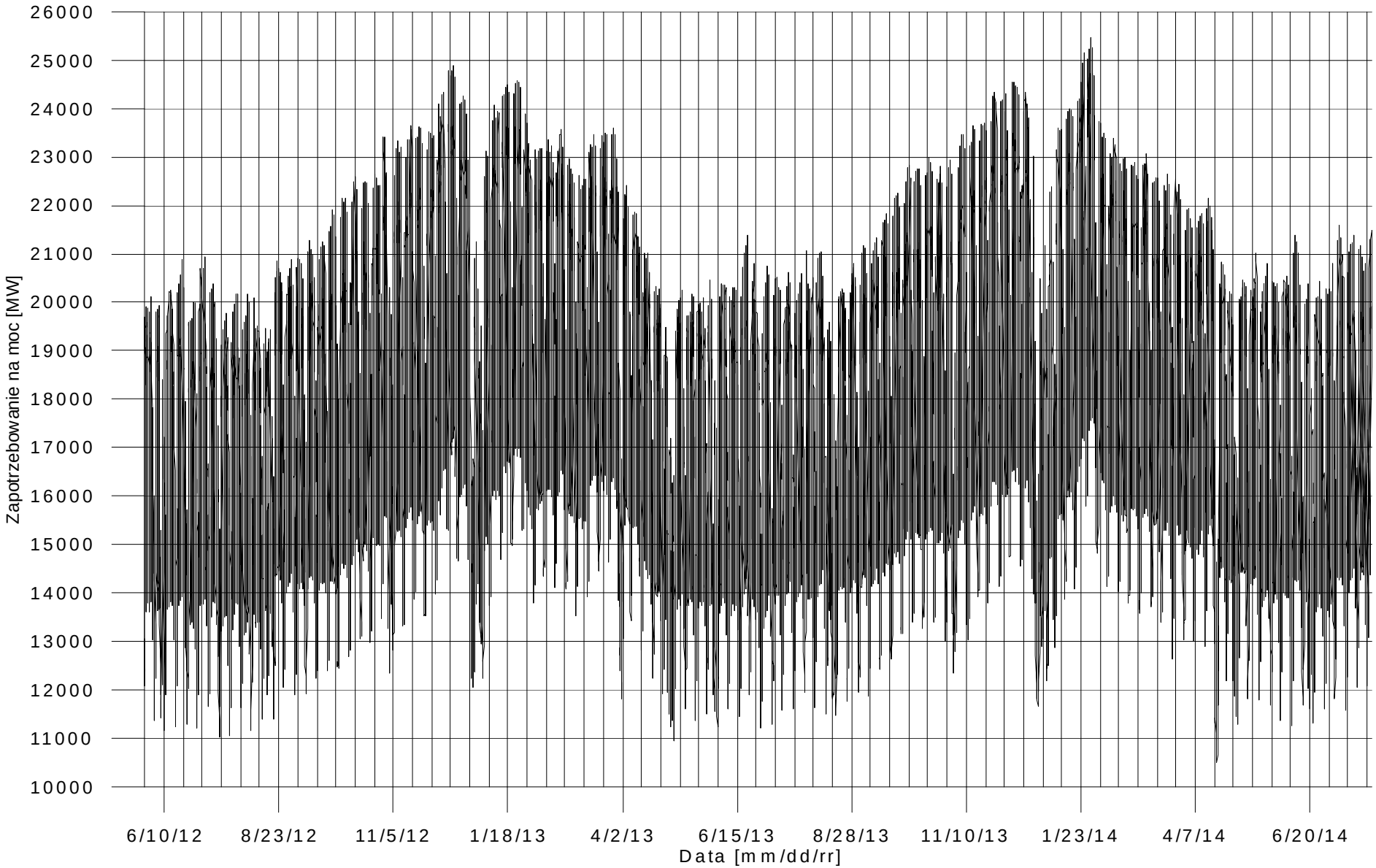
PRODUKCJA BRUTTO ENERGII ELEKTRYCZNEJ W ODNAWIALNYCH ŹRÓDŁACH ENERGII W POLSCE 2010-2015

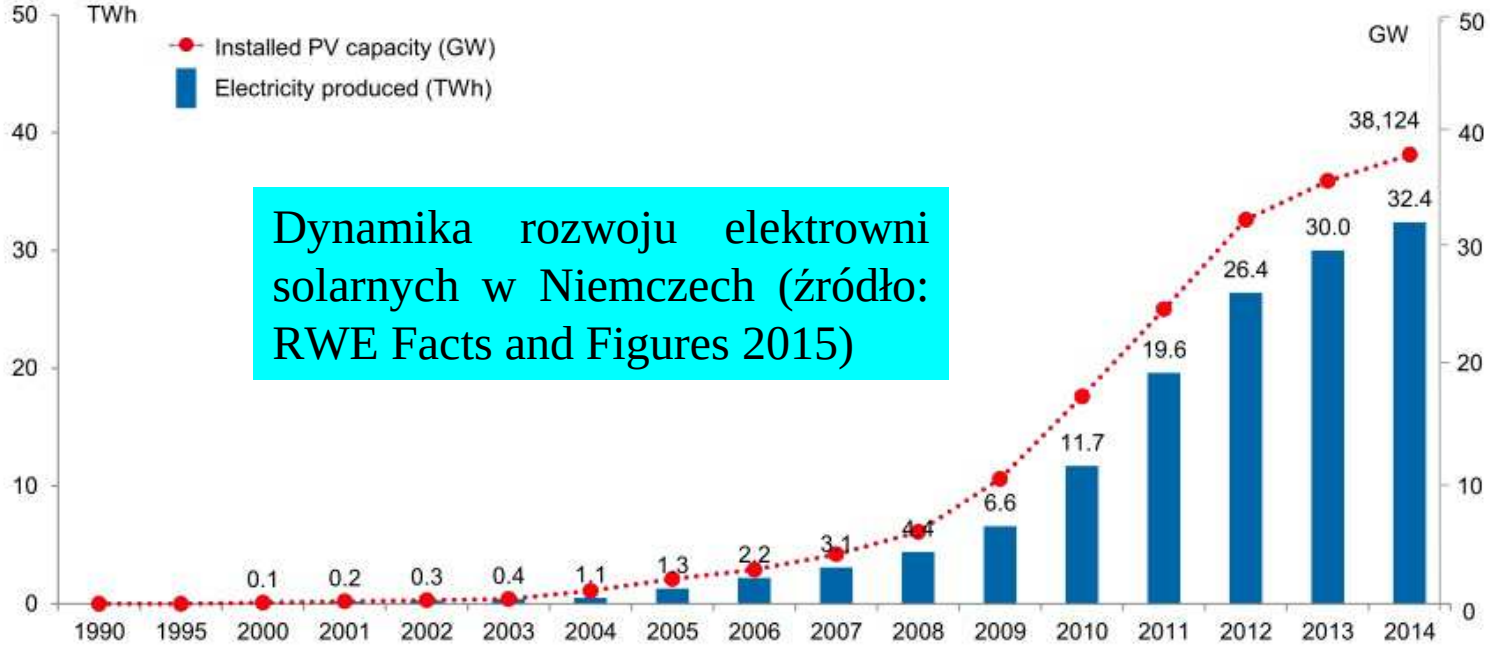
Wyszczególnienie		Razem	z tego elektrownie					współ-spalanie biogazu i biomasy	układy hybry-dowe	Ogółem produkcja krajowa	Udział proc. OZE w produkcji
			wodne[1)]	wiatrowe	biogazowe	na biomasę[2)]	fotowol-taiczne				
		GWh									
OGÓŁEM	**2010**	**10 888,76**	**2 919,94**	**1 666,34**	**334,90**	**312,68**	**-**	**5 596,91**	**-**	**157658**	**6,91%**
	2011	**13 136,83**	**2 331,38**	**3 204,55**	**450,46**	**759,45**	**0,18**	**6 390,82**	**-**	**163548**	**8,03%**
	2012	**16 878,88**	**2 036,93**	**4 746,59**	**563,38**	**1 678,63**	**1,14**	**7 240,74**	**611,48**	**162139**	**10,41%**
	2013	**17 066,55**	**2 439,12**	**6 003,81**	**687,26**	**3 595,72**	**1,48**	**3 930,97**	**408,20**	**164580**	**10,37%**
	2014	**19 841,18**	**2 182,45**	**7 675,63**	**814,54**	**4 428,20**	**6,89**	**4 512,20**	**221,28**	**159058**	**12,47%**
	2015	**22 675,40**	**1 832,20**	**10 858,37**	**896,68**	**4 551,79**	**56,64**	**4 290,84**	**188,88**	**164944**	**13,75%**
w tym niezależne	2010	2 411,32	331,44	1 664,34	386,51	29,04	-	-	-		
	2011	3 990,35	306,71	3 204,55	443,61	35,31	0,18	-	-		
	2012	5 657,18	304,67	4 746,59	552,27	52,51	1,14	-	-		
	2013	5 305,04	335,66	4 202,56	660,45	104,89	1,48	-	-		
	2014	6 701,96	329,83	5 476,97	768,73	119,53	6,89	-	-		
	2015	9 112,19	246,67	7 185,13	849,49	74,27	56,64				

Uwaga! Udział energii z OZE w produkcji brutto jest wyższy od zakładanego w PEP (dynamika wyprzedza zakładaną ścieżkę rozwoju, w szczególności energetyki wiatrowej. W przyszłości dotyczyć to będzie również fotowoltaiki

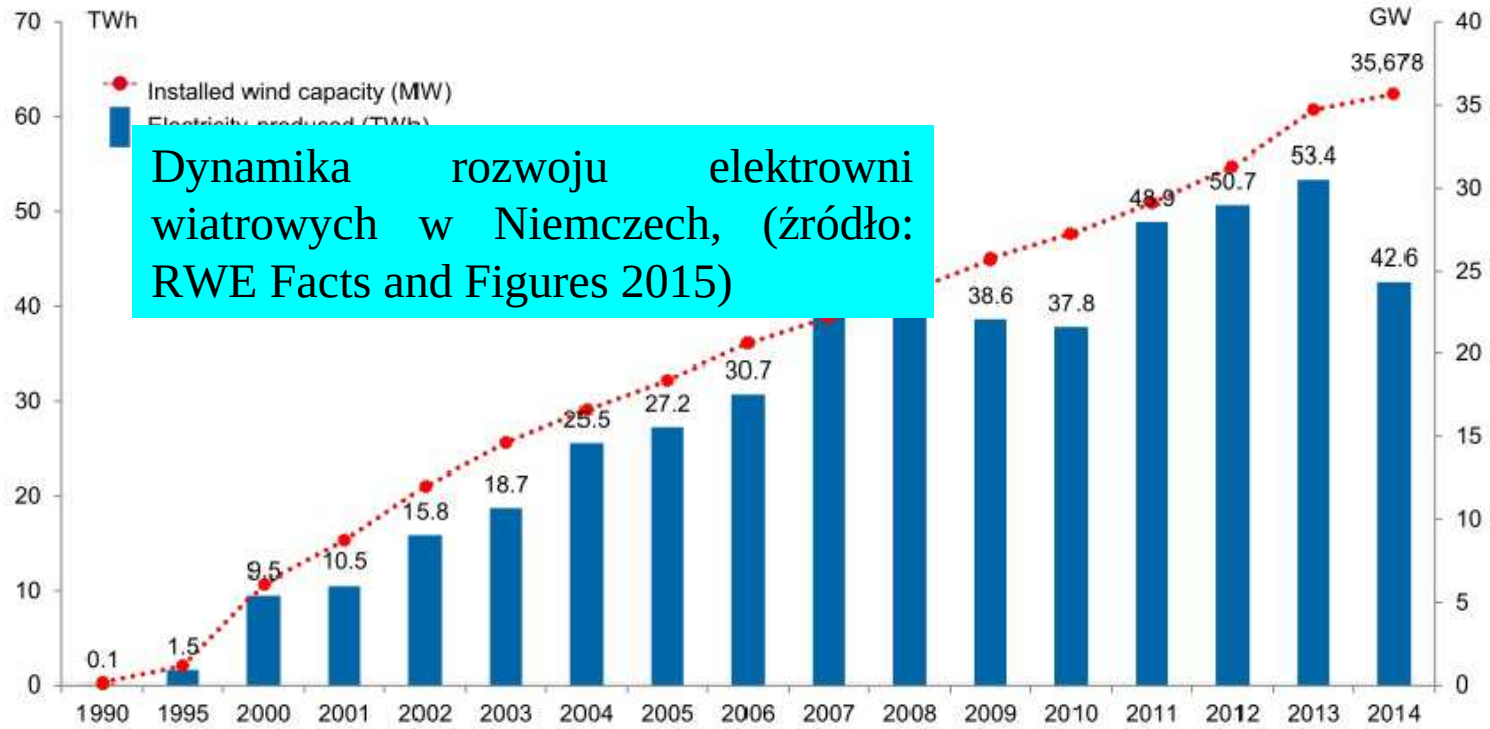
Udział energetyki wiatrowej w generacji krajowej brutto w roku 2015 - 6,58%

Zmiany zapotrzebowania na moc w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym w Polsce, okres od 28.05.2012 – 29.07.2014





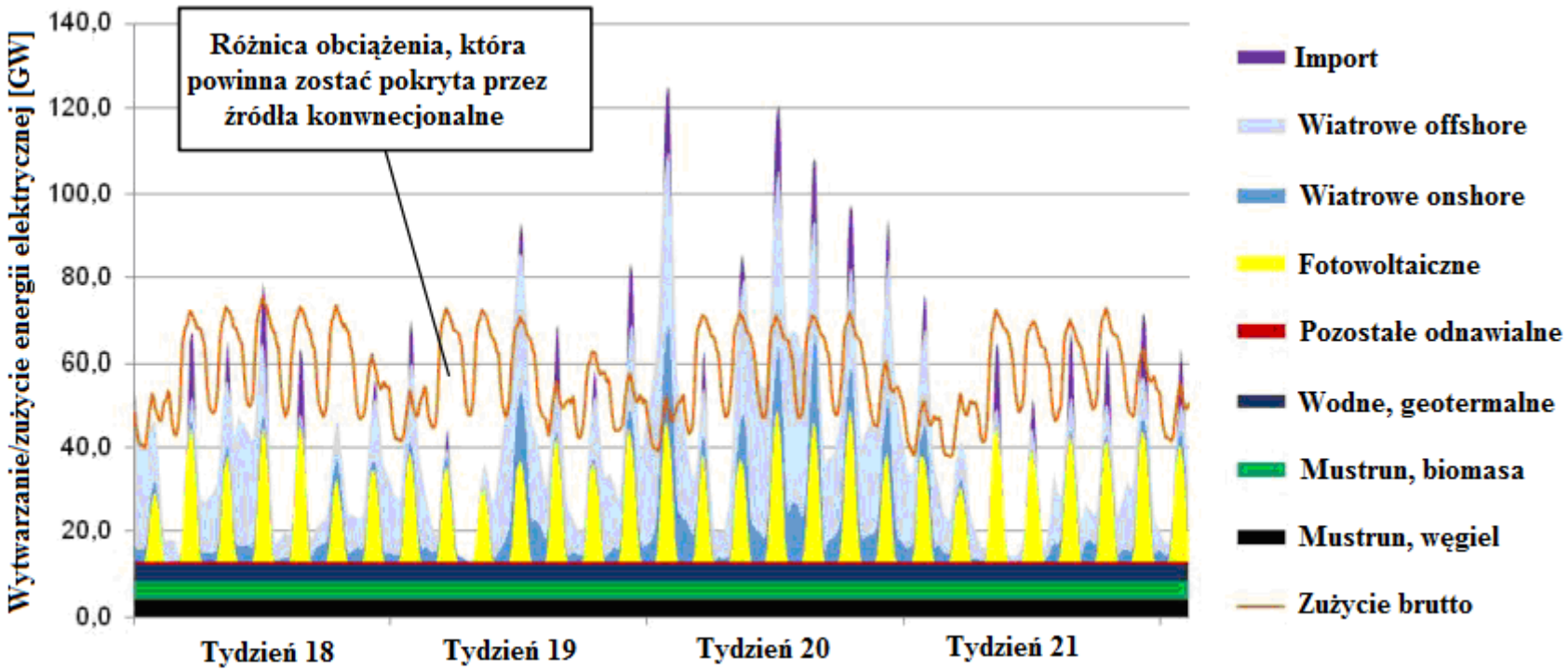
Dynamika rozwoju elektrowni solarnych w Niemczech (źródło: RWE Facts and Figures 2015)



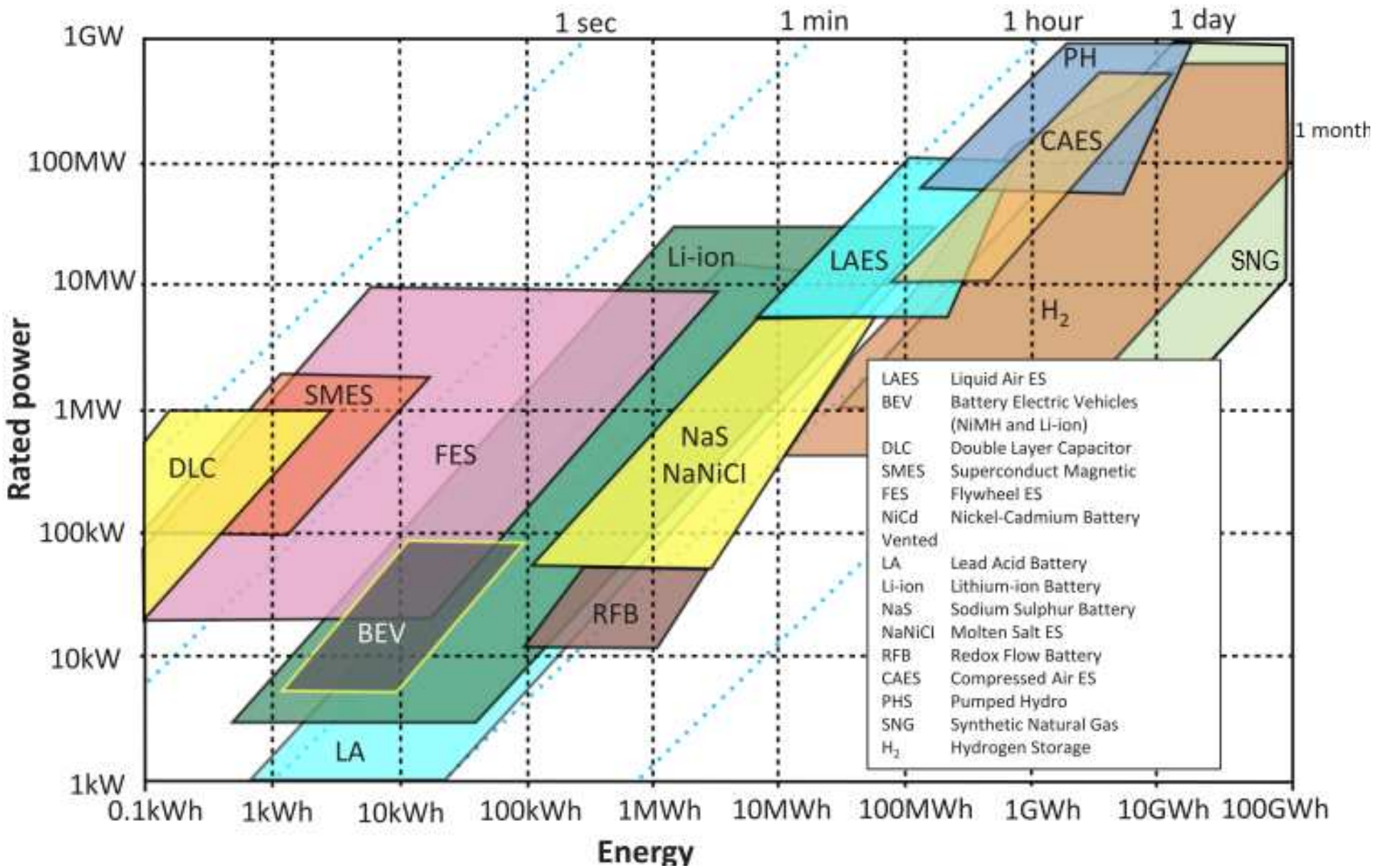
Dynamika rozwoju elektrowni wiatrowych w Niemczech, (źródło: RWE Facts and Figures 2015)

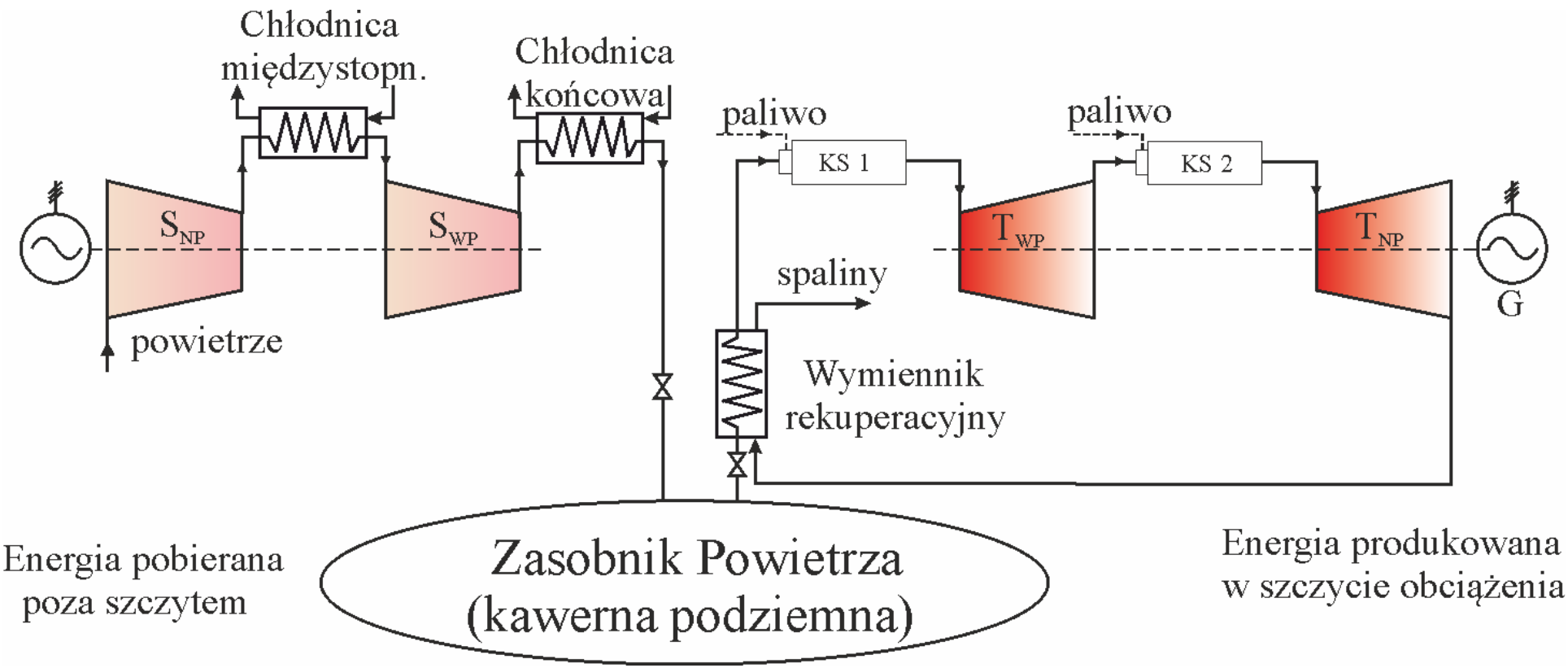
Łączna moc zainstalowana OZE w Niemczech przekroczyła w roku 2010 poziom 50 GW oraz 60 GW w roku 2011

to jest około 30% całości (168 GW)



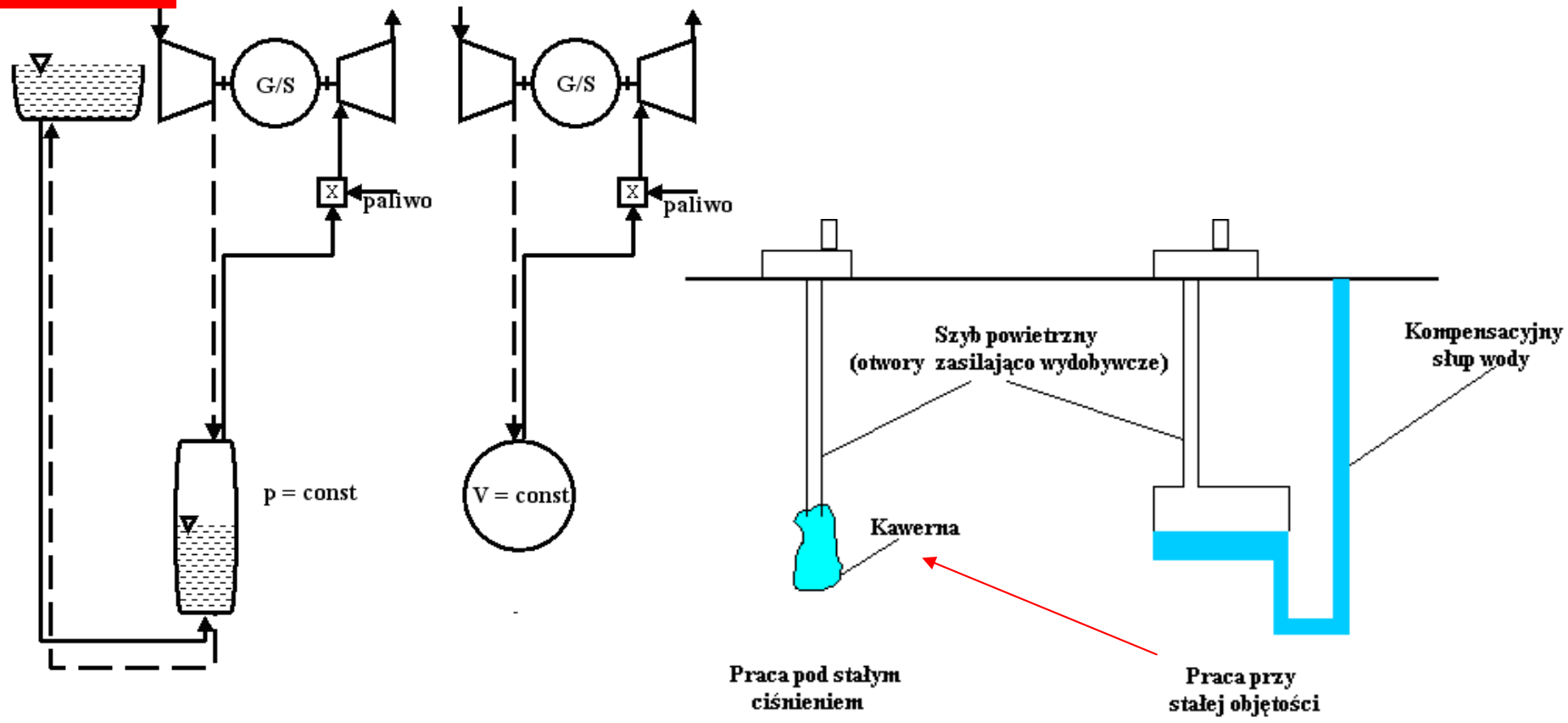
Prognozowana według źródeł niemieckich struktura generacji energii elektrycznej na rok 2050 w okresie od osiemnastego do dwudziestego pierwszego tygodnia kalendarzowego.


1 sec
1 min
1 hour
1 day
1 month
1GW
100MW
10MW
1MW
100kW
10kW
1kW
Rated power
0.1kWh
1kWh
10kWh
100kWh
1MWh
10MWh
100MWh
1GWh
10GWh
100GWh
Energy
PH
CAES
LAES
Li-ion
SNG
H_2
SMES
DLC
FES
NaS
NaNiCl
RFB
BEV
LA
LAES Liquid Air ES
BEV Battery Electric Vehicles (NiMH and Li-ion)
DLC Double Layer Capacitor
SMES Superconduct Magnetic
FES Flywheel ES
NiCd Vented Nickel-Cadmium Battery
LA Lead Acid Battery
Li-ion Lithium-ion Battery
NaS Sodium Sulphur Battery
NaNiCl Molten Salt ES
RFB Redox Flow Battery
CAES Compressed Air ES
PHS Pumped Hydro
SNG Synthetic Natural Gas
H_2 Hydrogen Storage



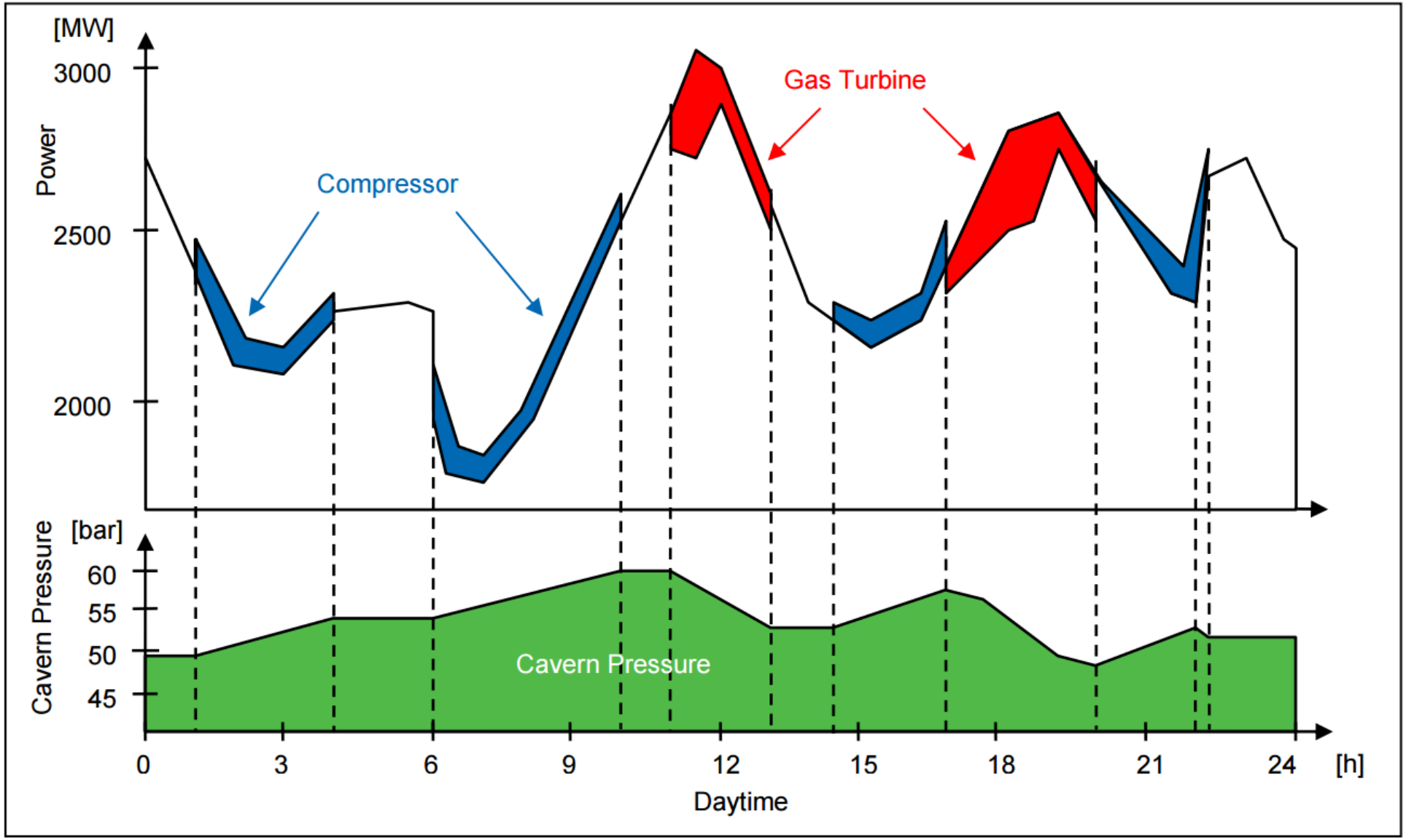
Zasada pracy oraz podstawowe elementy instalacji elektrowni z wykorzystaniem magazynowania powietrza do produkcji energii w szczycie – oddzielony układ napędu sprężarki i odbioru mocy

Sposoby magazynowania powietrza dla układów akumulacyjnych



Sposoby magazynowania powietrza w zbiornikach podziemnych. Z kompensacją hydrauliczną (p=const), w zbiornikach „mokrych”.

Możliwość tworzenia zbiorników podwodnych - underwater CAES - koncepcje dla aplikacji w Polsce.



Przykład zmienności współpracy elektrowni CAES z siecią

Jak zdefiniować sprawność elektrowni CAES?

W celu umożliwienia porównania różnych wariantów elektrowni CAES wprowadzić można pojęcie sprawności przetwarzania energii:

$$\eta_{CAESc} = \frac{E_{elg}}{E_{elc} + Q_f} \qquad (1)$$

gdzie: E_{elg} – energia oddana przez elektrownię CAES do sieci;
E_{elc} – energia dostarczona do elektrowni CAES w postaci energii elektrycznej do napędu sprężarki.

W celu ominięcia konieczności dodawania do siebie dwóch różnych rodzajów energii (elektrycznej do chemicznej) sprawność elektrowni CAES definiować można również jako:

$$\eta_{CAESf} = \frac{E_{elg} - E_{elc}}{Q_f} \qquad (2)$$

Można jednak otrzymać sprawność ujemną (jeśli $E_{elc} > E_{elg}$) i nieskończenie wielką (jeśli $Q_f = 0$).

Zależność powyższa charakteryzuje efektywność zużycia paliwa (tu gazu) na generację energii elektrycznej wytworzonej (netto)

Jak zdefiniować sprawność elektrowni CAES?

Sposób definiowania sprawności elektrowni CAES, uwzględniający sprawność generacji energii elektrycznej dostarczanej na potrzeby zasilania elektrowni:

$$\eta_{CAESs} = \frac{E_{elg}}{\frac{E_{elc}}{\eta_{elR}\,\eta_{tr}} + Q_f} \qquad (3)$$

gdzie:
η_{elR} – sprawność generacji energii elektrycznej w referencyjnej elektrowni systemowej;
η_{tr} – sprawność przesyłu energii elektrycznej do elektrowni CAES

Powyższy sposób definiowania sprawności prowadzi do oceny zużycia energii dostarczanej w paliwie na potrzeby generacji (całości) energii elektrycznej uzyskiwanej z siłowni CAES.

Sprawność netto magazynowania energii elektrycznej (ang. net electrical storage efficiency), definiowana jako ilość energii elektrycznej dostarczonej do sieci w stosunku do energii dostarczonej w gazie ziemnym:

$$\eta_s = \frac{1-(HR\cdot\eta_{gas})}{ER_{net}} \qquad (4)$$

gdzie: HR – jednostkowe zużycie ciepła przez samą turbinę gazową,
η_{gas} – sprawność konwersji energii chemicznej na elektryczną,
ER_{net} - stosunek netto energii dostarczonej do energii odebranej.

Ta wartość sprawności porównywana bywa ze sprawnością elektrowni szczytowo-pompowych.

Model matematyczny pracy elektrowni CAES

Proces ładowania oraz rozładowania zbiornika powietrza ma charakter „dynamiczny” połączony z ładowaniem/rozładowaniem wysokociśnieniowego zbiornika powietrza (ciśnienie w zbiorniku zmienia się w funkcji czasu – turbina i sprężarka działają w warunkach zmiennego w czasie stosunku ciśnień).

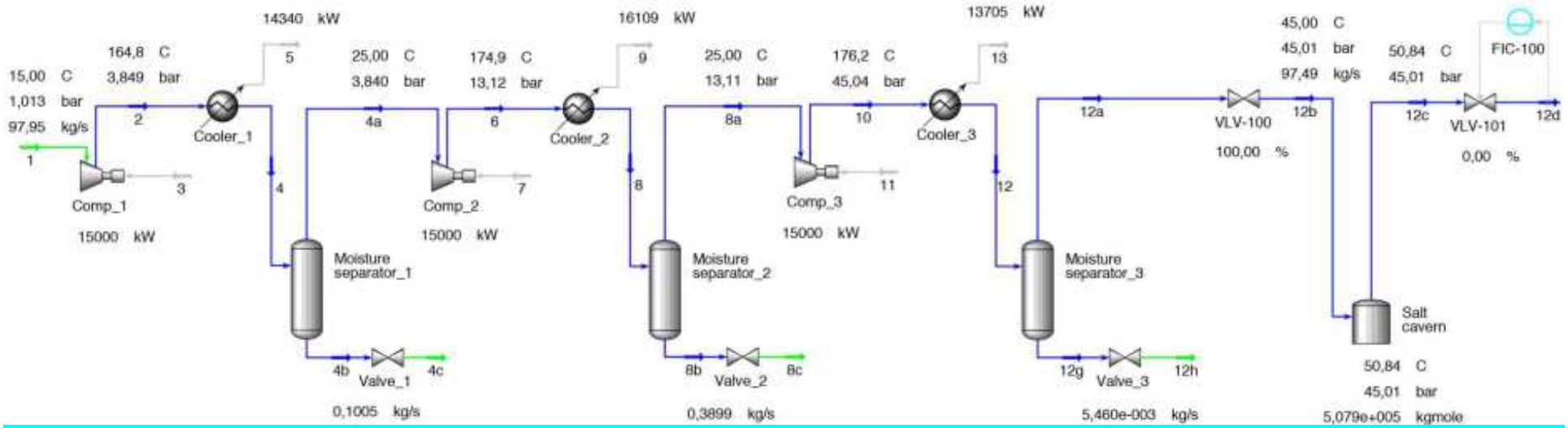
Bilans masy oraz równanie bilansu energii czynnika roboczego (tu przekształcone do postaci bilansu entalpii):

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} = m_\alpha - m_\omega \tag{5}$$

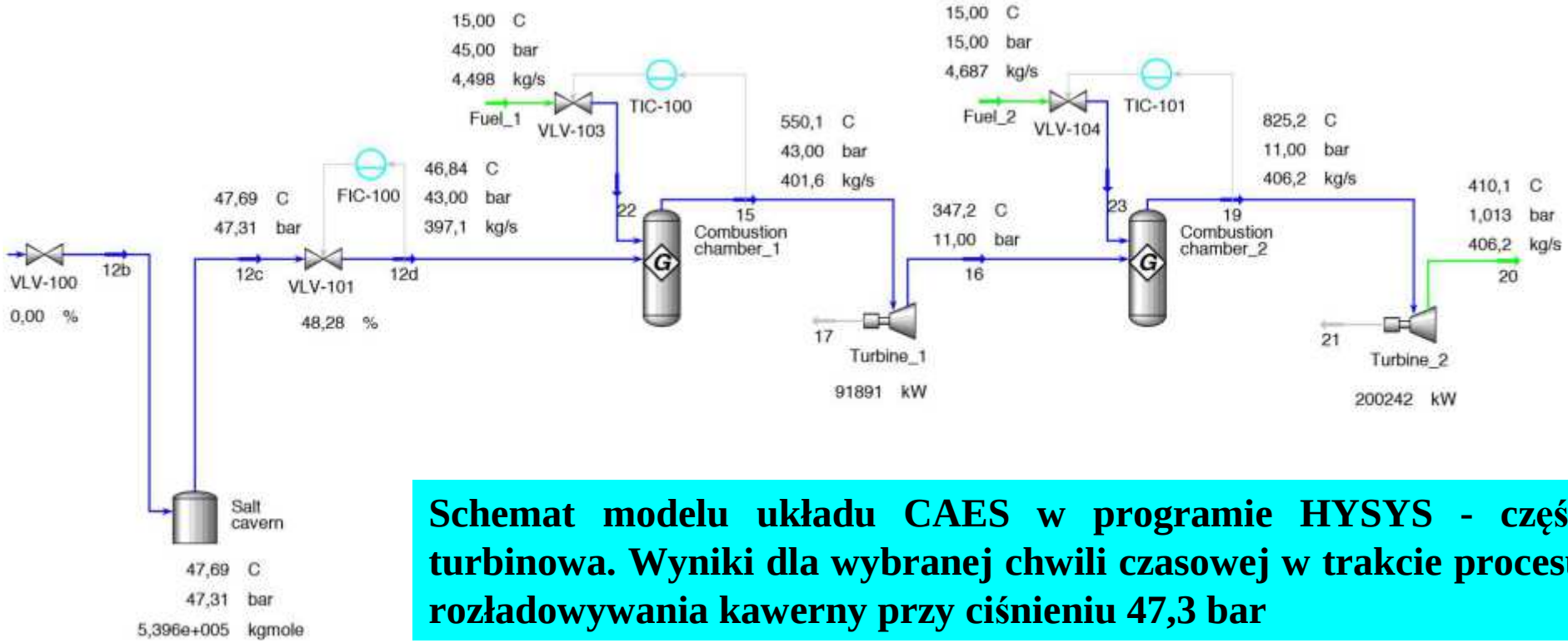
$$\frac{dH}{dt} = \frac{d(\rho V h)}{dt} = m_\alpha h_\alpha - m_\omega h_\omega + V\frac{dp}{dt} + Q \tag{6}$$

gdzie:
m – strumień masy, h – entalpia, H – entalpia całkowita, p – ciśnienie, Q – ciepło wymieniane, ρ – gęstość, V – objętość, t –czas,
indeksami α oraz ω zaznaczono odpowiednie wielkości na wejściu oraz wyjściu z modelowanej przestrzeni akumulacyjnej (zbiornika).

Model czynnika roboczego powinien uwzględniać zmiany wynikające z wysokich wartości ciśnienia (modele gazu doskonałego i półdoskonałego nie spełniają ww warunku).



Schemat modelu układu CAES w programie HYSYS - część sprężarkowa. Wyniki dla wybranej chwili czasowej w trakcie procesu ładowania kawerny przy ciśnieniu 45 bar



Schemat modelu układu CAES w programie HYSYS - część turbinowa. Wyniki dla wybranej chwili czasowej w trakcie procesu rozładowywania kawerny przy ciśnieniu 47,3 bar

Przykład analizy pracy układu CAES - najprostsza konfiguracja

Najważniejsze założenia dotyczące turbiny gazowej:

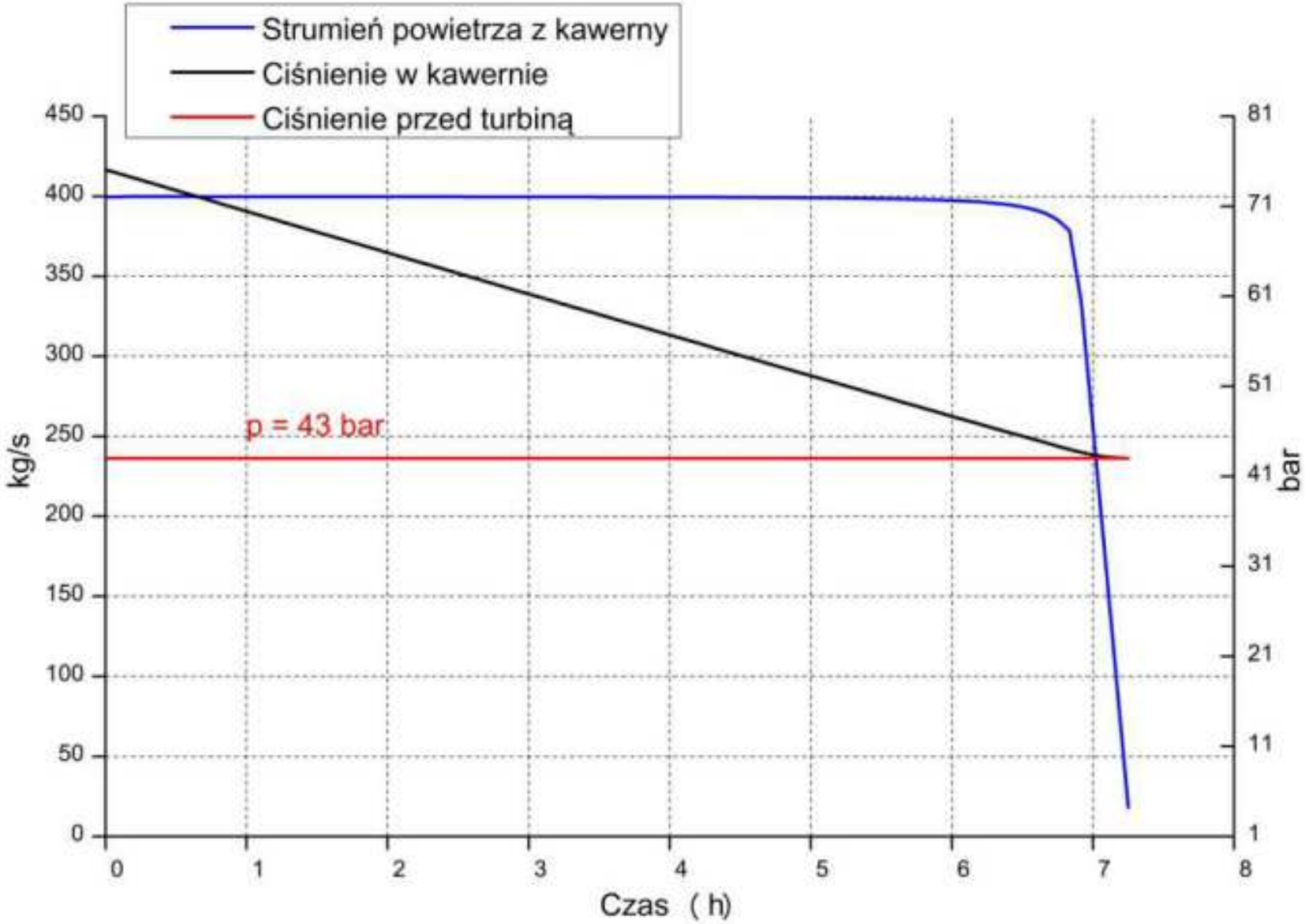
- Ciśnienie dolotowe – 43 bar
- Strumień masy powietrza do turbiny – 400 kg/s (uzyskiwany dzięki zastosowaniu
- regulatora FIC-100)
- Temperatura na wlocie do turbiny WP - 550° (uzyskiwana dzięki regulacji strumienia
- masy paliwa do pierwszej komory spalania)
- Ciśnienie wylotowe turbiny WP – 11 bar
- Sprawność politropowa turbiny – 80%
- Temperatura na wlocie do turbiny NP - 825°C (uzyskiwana dzięki regulacji strumienia
- masy paliwa do drugiej komory spalania)
- Ciśnienie wylotowe turbiny NP – ciśnienie otoczenia 1,013 bar
- Paliwo gazowe – metan

Część sprężarkowa układu składa się z trójstopniowej sprężarki o mocy 45 MW

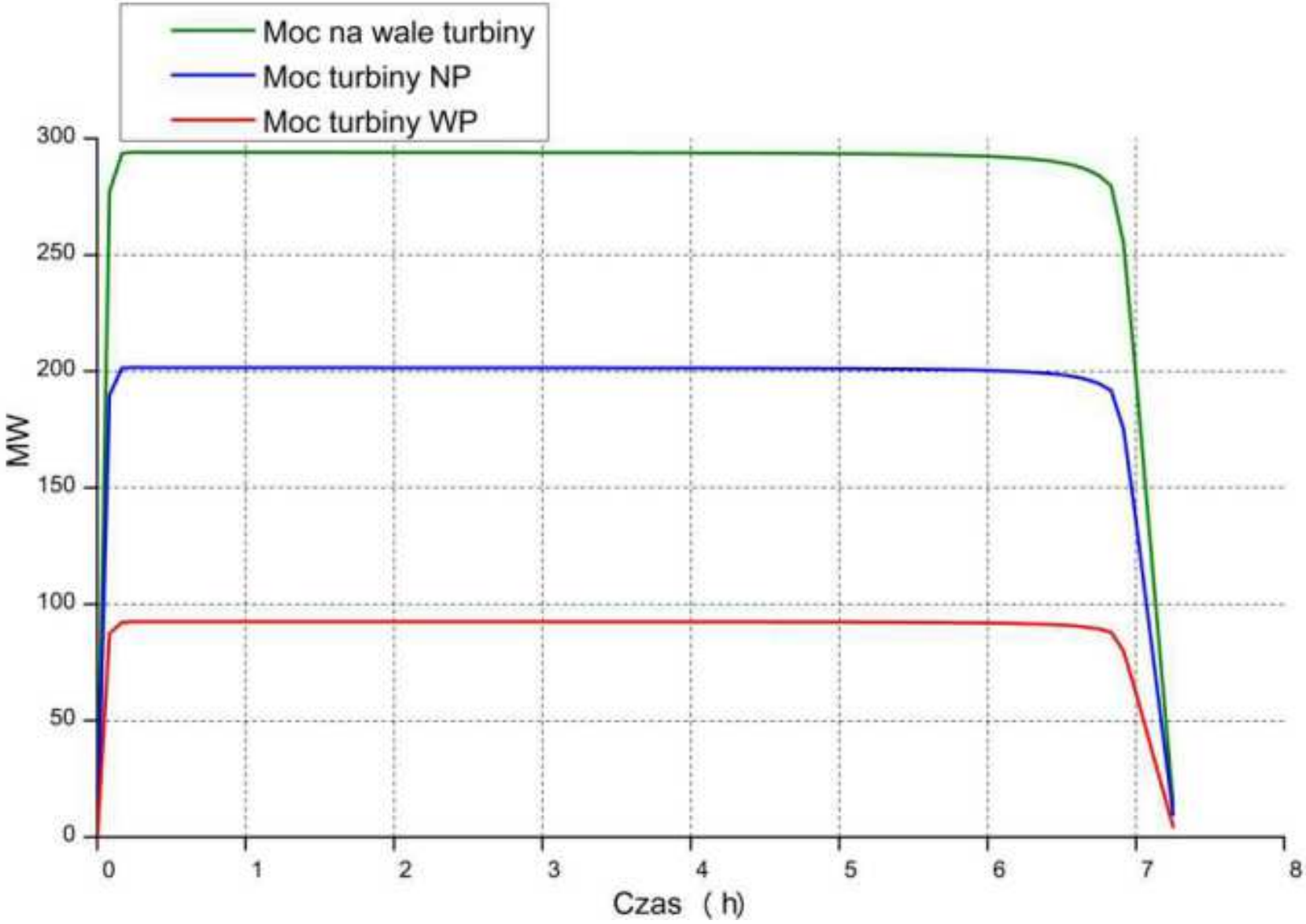
- Sprężarka niskoprężna (NP) – sprawność politropowa 90%
- Sprężarka średnioprężna (SP) – sprawność politropowa 85%
- Sprężarka wysokoprężna (WP) – sprawność politropowa 85%

Ciepło odbierane w chłodnicach jest rozpraszane do otoczenia. Za chłodnicami międzystopniowymi oraz końcową zainstalowane są separatory wilgoci (Moisture separator_1, Moisture separator_2, Moisture separator_3), które odbierają wodę ze sprężonego powietrza.

Przyjęto, że magazyn sprężonego powietrza o pojemności 300 tys m^3 pracuje w zakresie ciśnień od 43 bar do 75 bar.

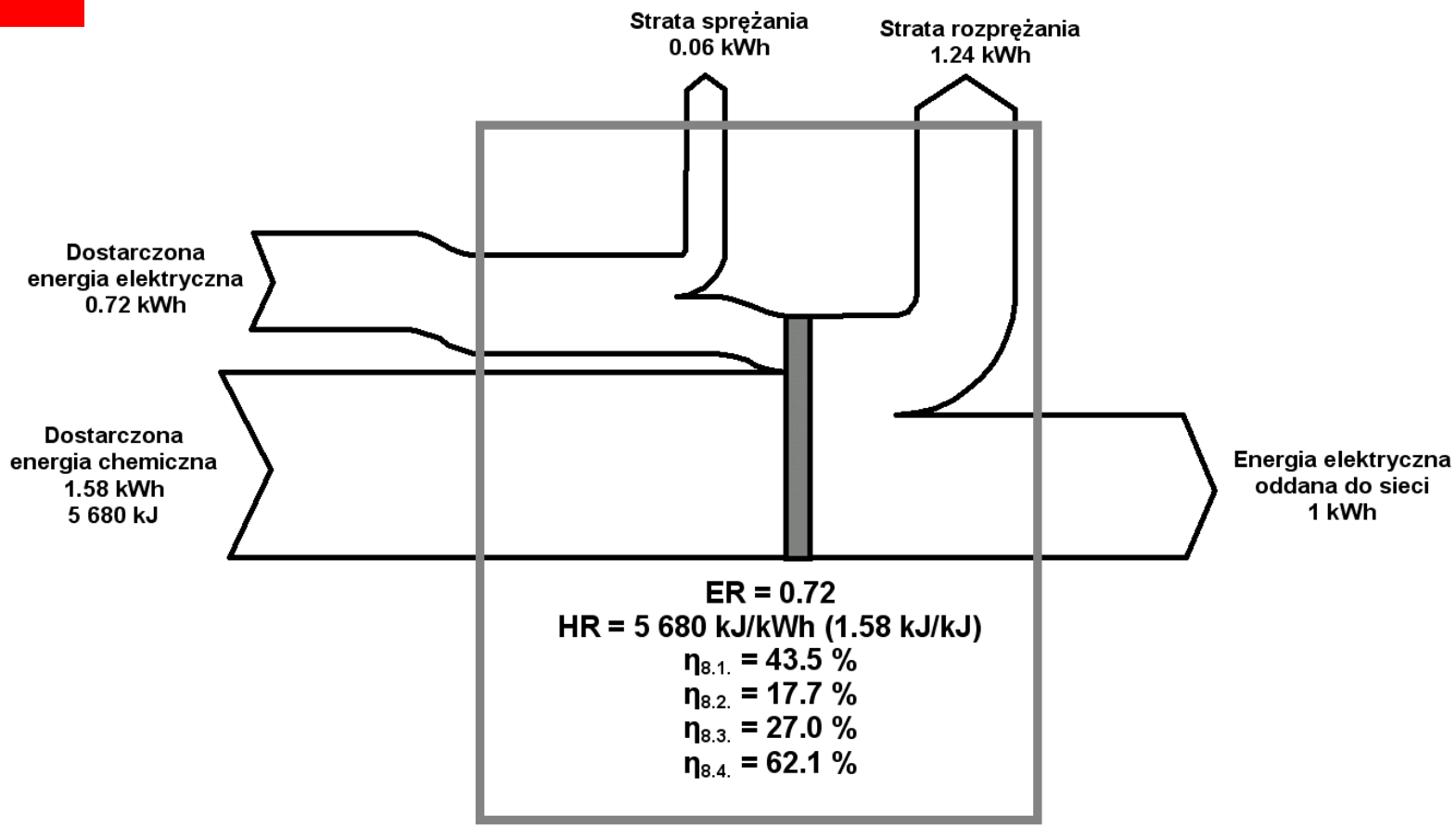


Strumień powietrza odbieranego z kawerny, ciśnienia powietrza w kawernie oraz przed turbiną w trakcie procesu rozładowywania kawerny od ciśnienia 75 bar do 43 bar (CAES)



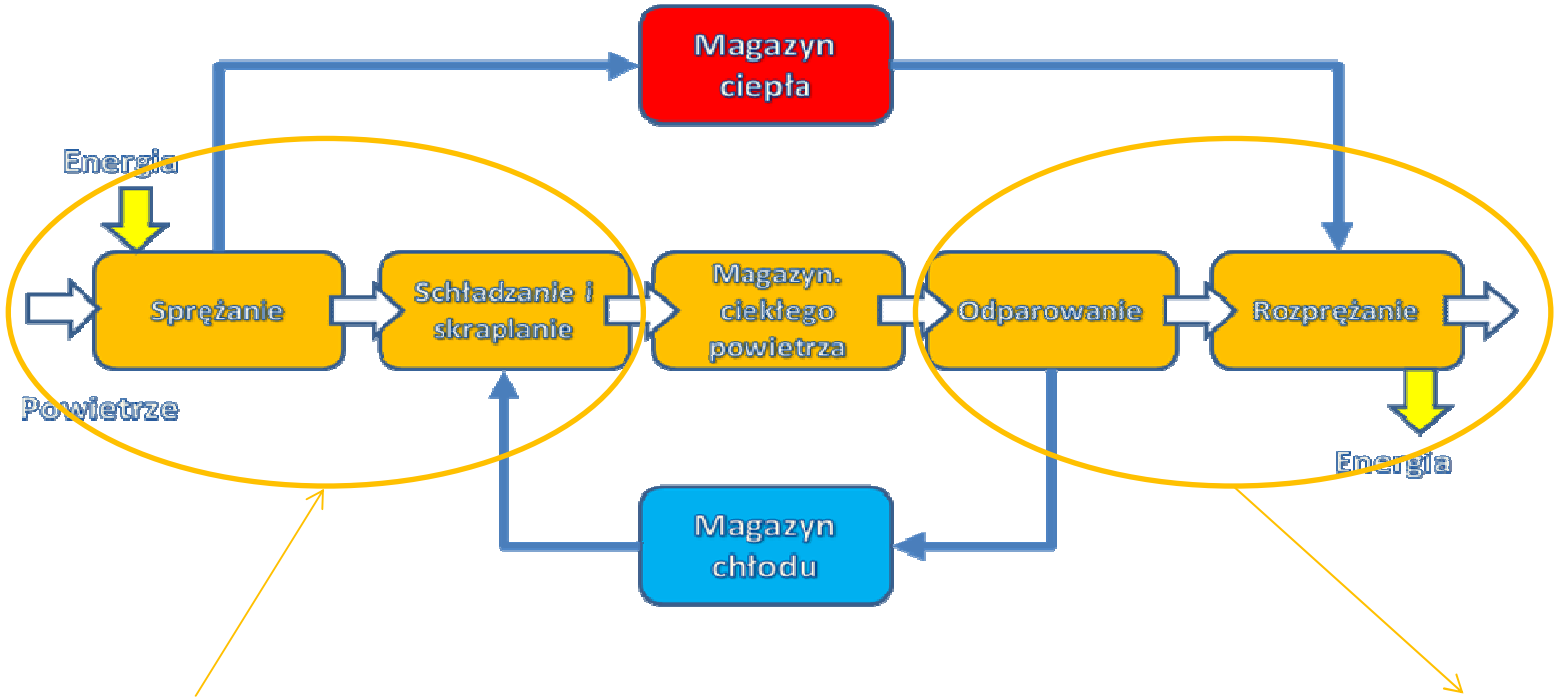
Moc na wale turbiny uzyskiwana w trakcie procesu rozładowywania kawerny od ciśnienia 75 bar do 43 bar (CAES)

Model matematyczny pracy elektrowni CAES



Wykres pasmowy (Sankey'a) przepływów energii w procesach ładowania i rozładowania kawerny w procesie omawianym wcześniej

Technologia LEAS – Zasada działania



Ładowanie magazynu

Nadmiarowa energia elektryczna jest wykorzystywana do zasilana instalacji skraplania powietrza. W efekcie **pracy instalacji otrzymujemy ciekłe powietrze.**

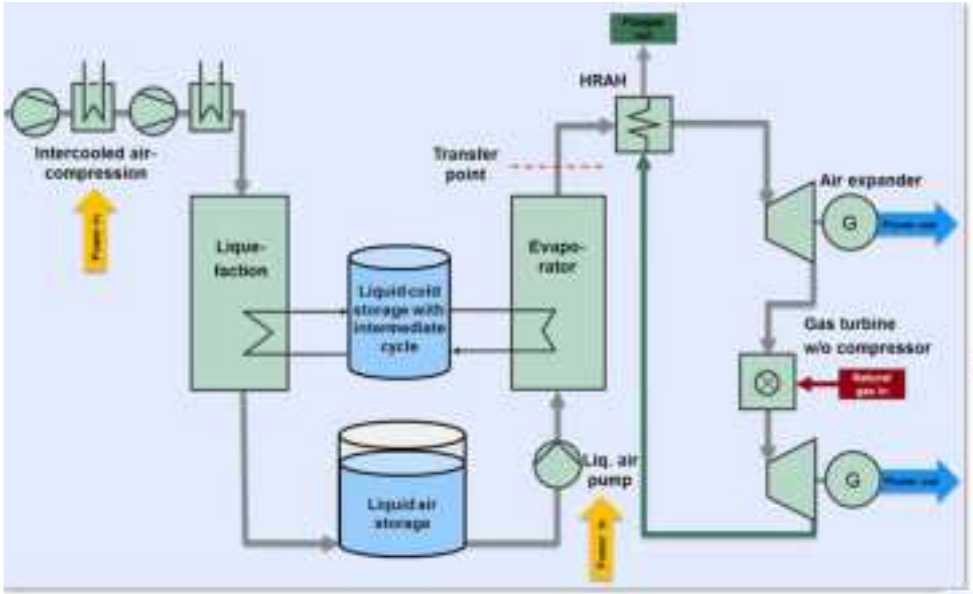
Przechowywanie

Ciekłe powietrze jest przechowywane w zbiorniku pod niskim ciśnieniem

Rozładowywanie magazynu

Ciśnienie ciekłego powietrza jest podwyższane przy pomocy pompy. Powietrze jest odparowywana a następnie kierowane na turbinę.

Propozycja konfiguracji LAES - warianty alternatywne (MHPS)

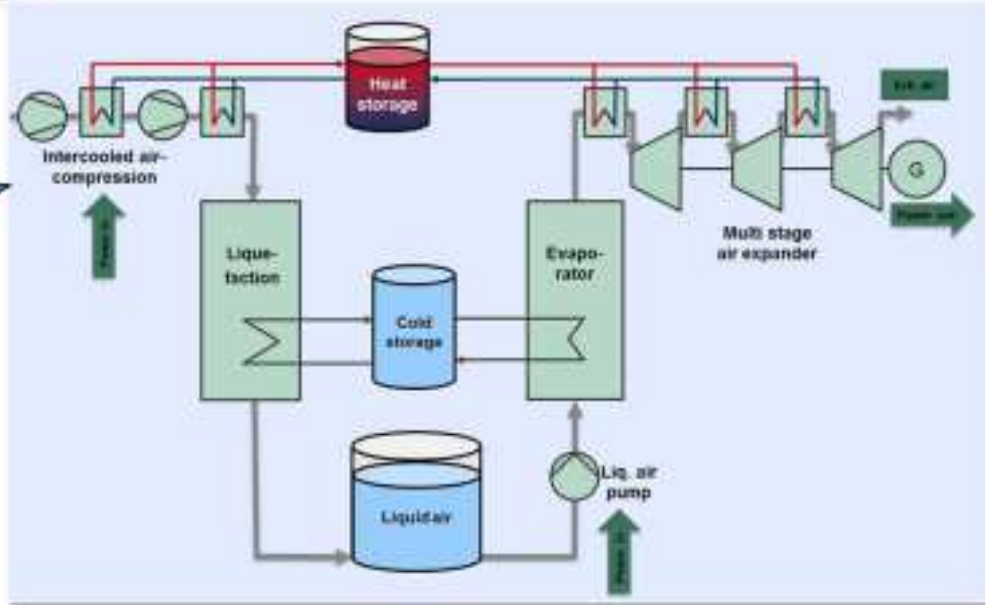


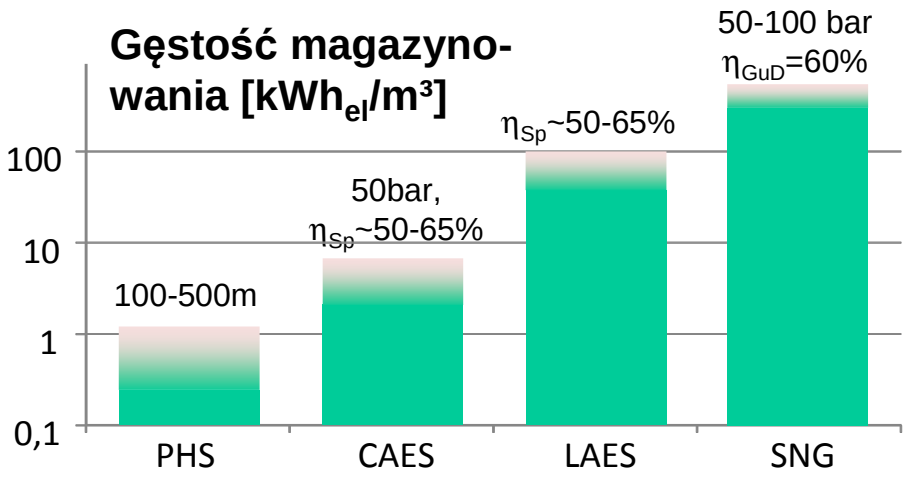
Wariant Procesu Fuel-LAES:

- Zmodyfikowana turbina gazowa bez kompresora
- Możliwy wzrost sprawności procesu u 10 pp
- Problemy z wymaganym sprzętem, szczególnie z turbiną wysoko-temperaturową

Wariant Procesu A-LAES:

- "A" od system adiabatyczny
- brak zużycia paliwa i emisji CO2
- Przewidywana niższa sprawność i gęstość mocy niż w GT-LAES i Fuel-LAES
- Problemy z wymaganym sprzętem, magazynowanie ciepła o wysokiej temperaturze

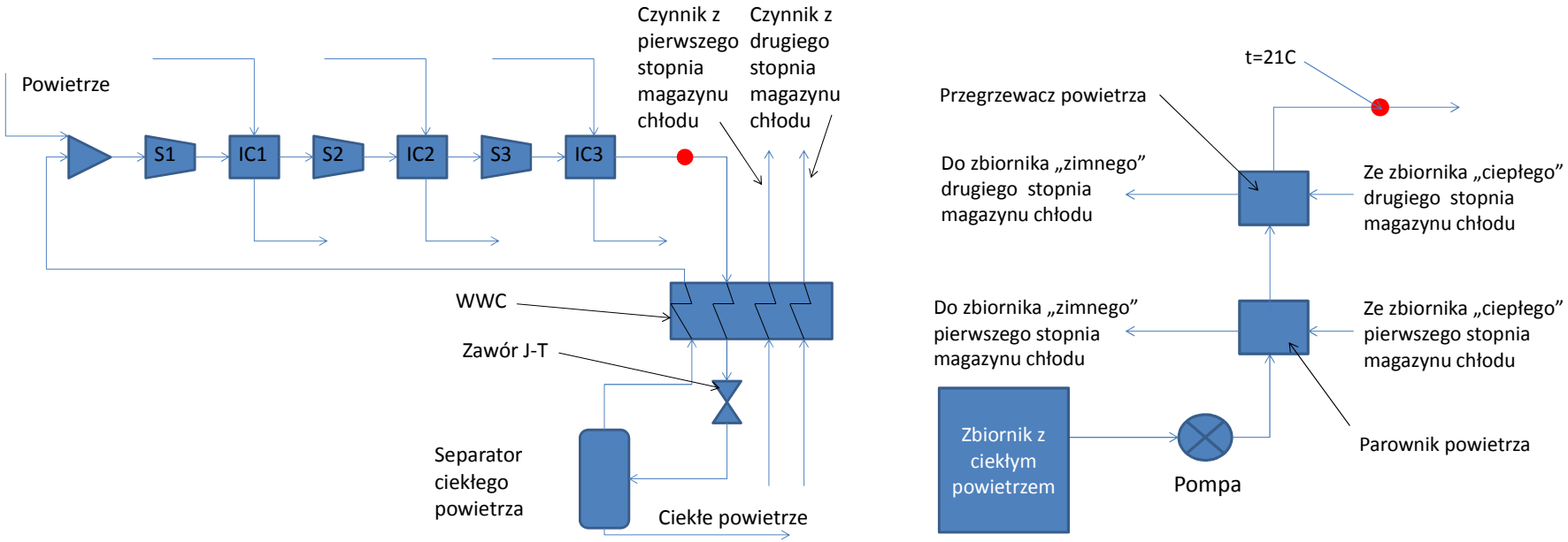



Gęstość magazyno-
wania [kWh$_{el}$/m³]
100
10
1
0,1
100-500m
50bar,
η_{Sp}~50-65%
η_{Sp}~50-65%
50-100 bar
η_{GuD}=60%
PHS
CAES
LAES
SNG

Linde
1600 m³ ~ 4h Operation

Układ LAES - przykład analizy

- Ciśnienie powietrza przed zaworem J-T – 50 – 200 bar co 10 bar
- Ciśnienie ciekłego powietrza za pompą w układzie rozładowania 40 bar



Strumień ciekłego powietrza – 540000 kg/h
Stosunek czasu ładowania do rozładowania magazynu =2
Moc sprężarek ok 100 MW

Układ LAES - przykład analizy - magazyn

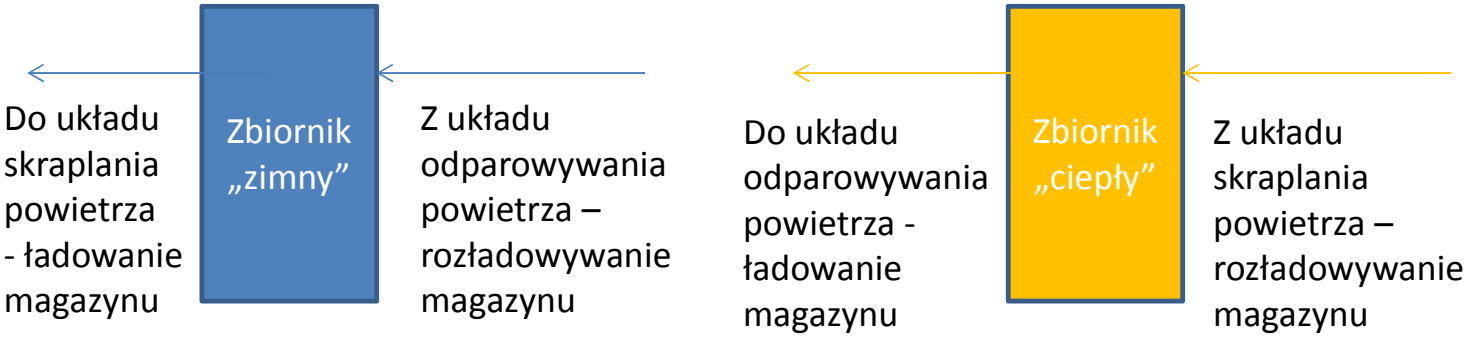
Dwustopniowy układ magazynowania chłodu:

•Pierwszy stopnień - R290

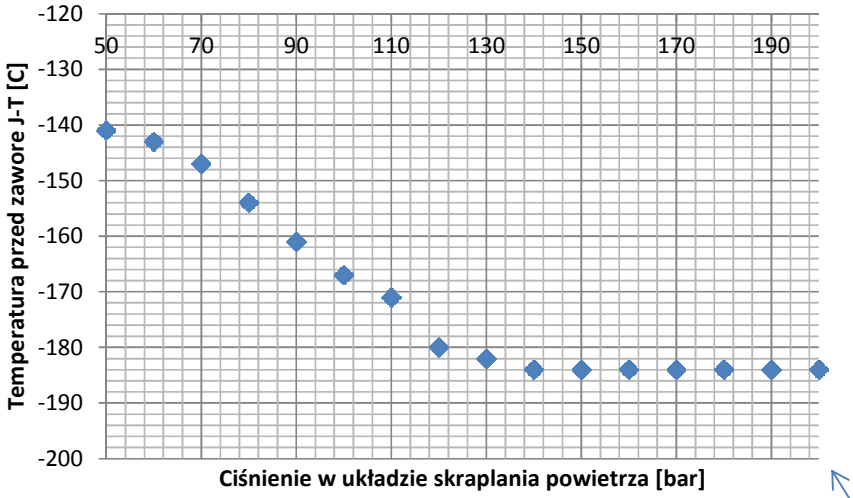
- temperatura w zbiorniku zimnym -185°C
- temperatura w zbiorniku „ciepłym” - 60°C

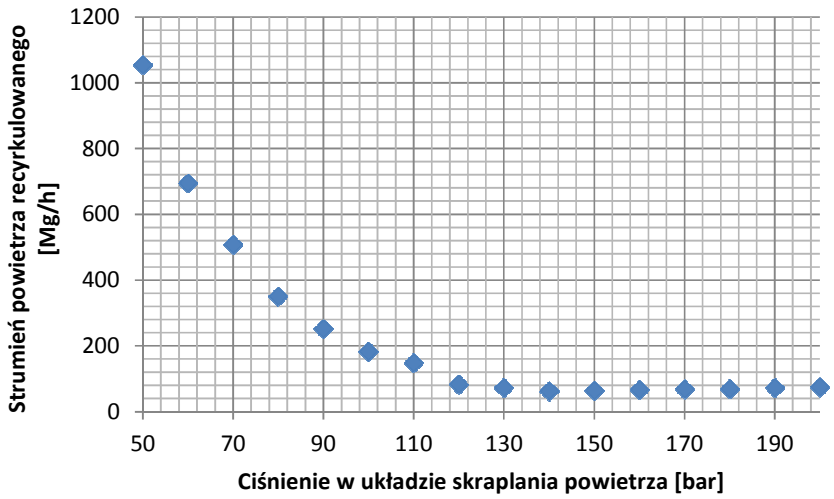
•Drugi stopień – metanol

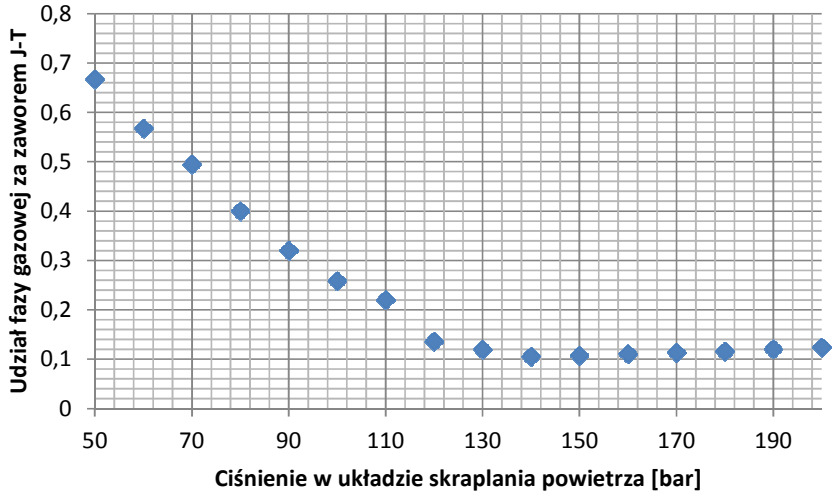
- temperatura w zbiorniku zimnym - 60°C
- temperatura w zbiorniku „ciepłym” + 25°C



Wybrane parametry w układzie skraplania w funkcji ciśnienia powietrza przed zaworem J-T



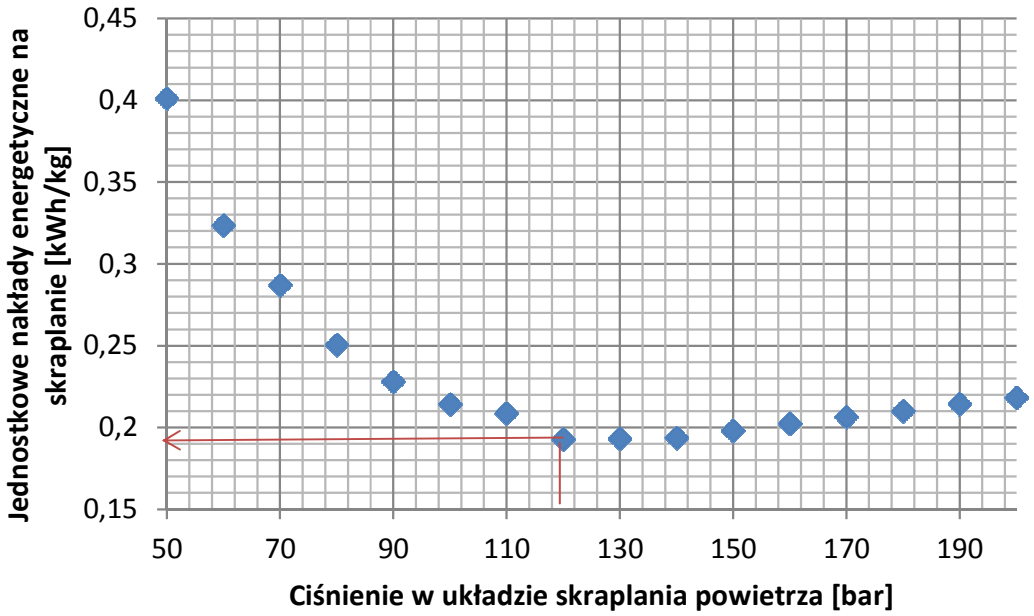


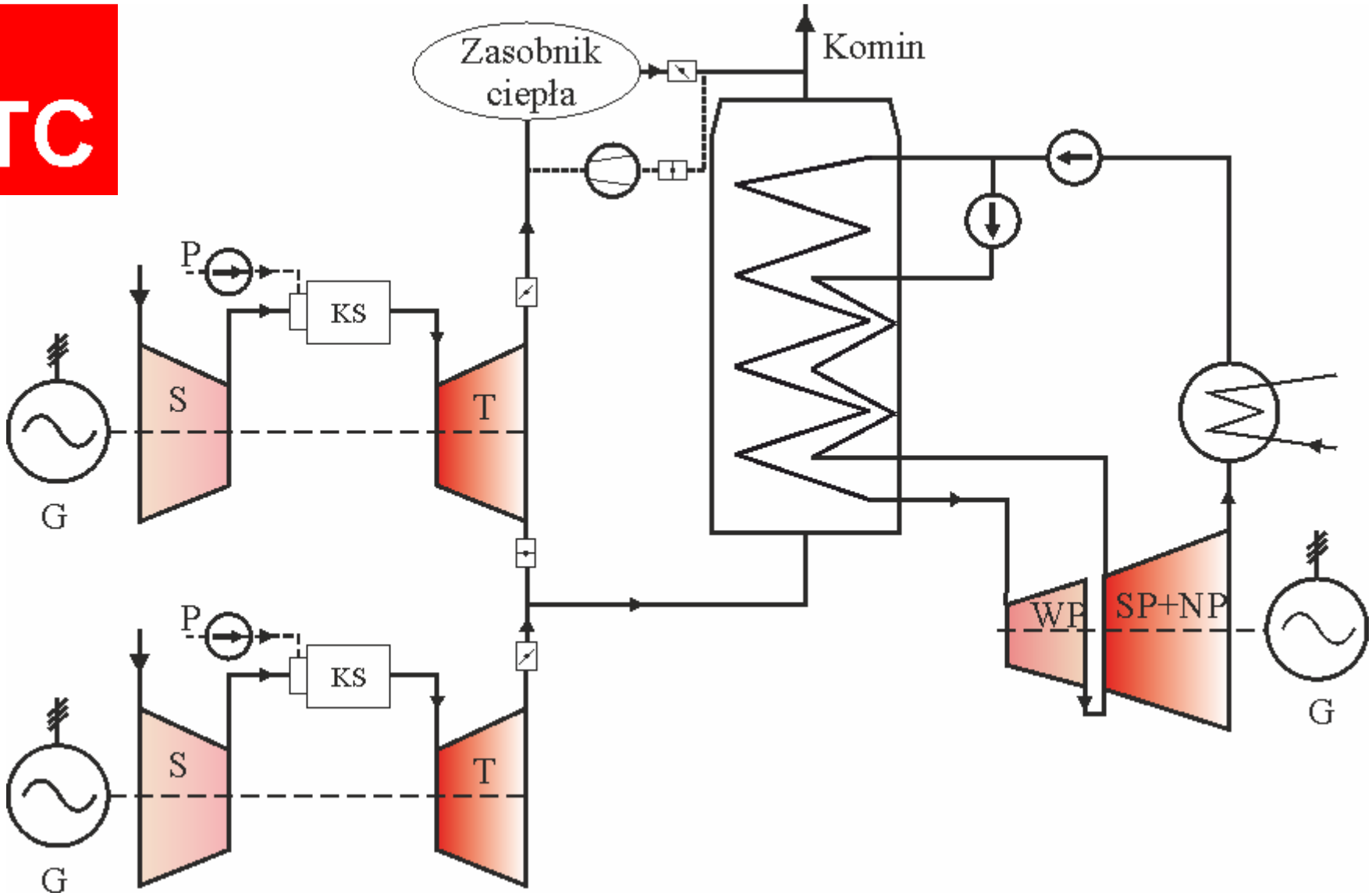


Strumień powietrza recyrkulowanego
Możliwa do osiągnięcia temperatura przed zaworem J-T
Udział fazy gazowej w powietrzu za zaworem J-T

Jednostkowe nakłady energetyczne na skraplanie powietrza w funkcji ciśnienia przed zaworem J-T

- Optymalne ciśnienie dla analizowanego układu 120 bar - 0,184 kWh/kg
- Dla ciśnienia niższego - wzrost strumienia recyrkulowanego
- Dla ciśnienia wyższego wzrost pracy jednostkowej sprężania

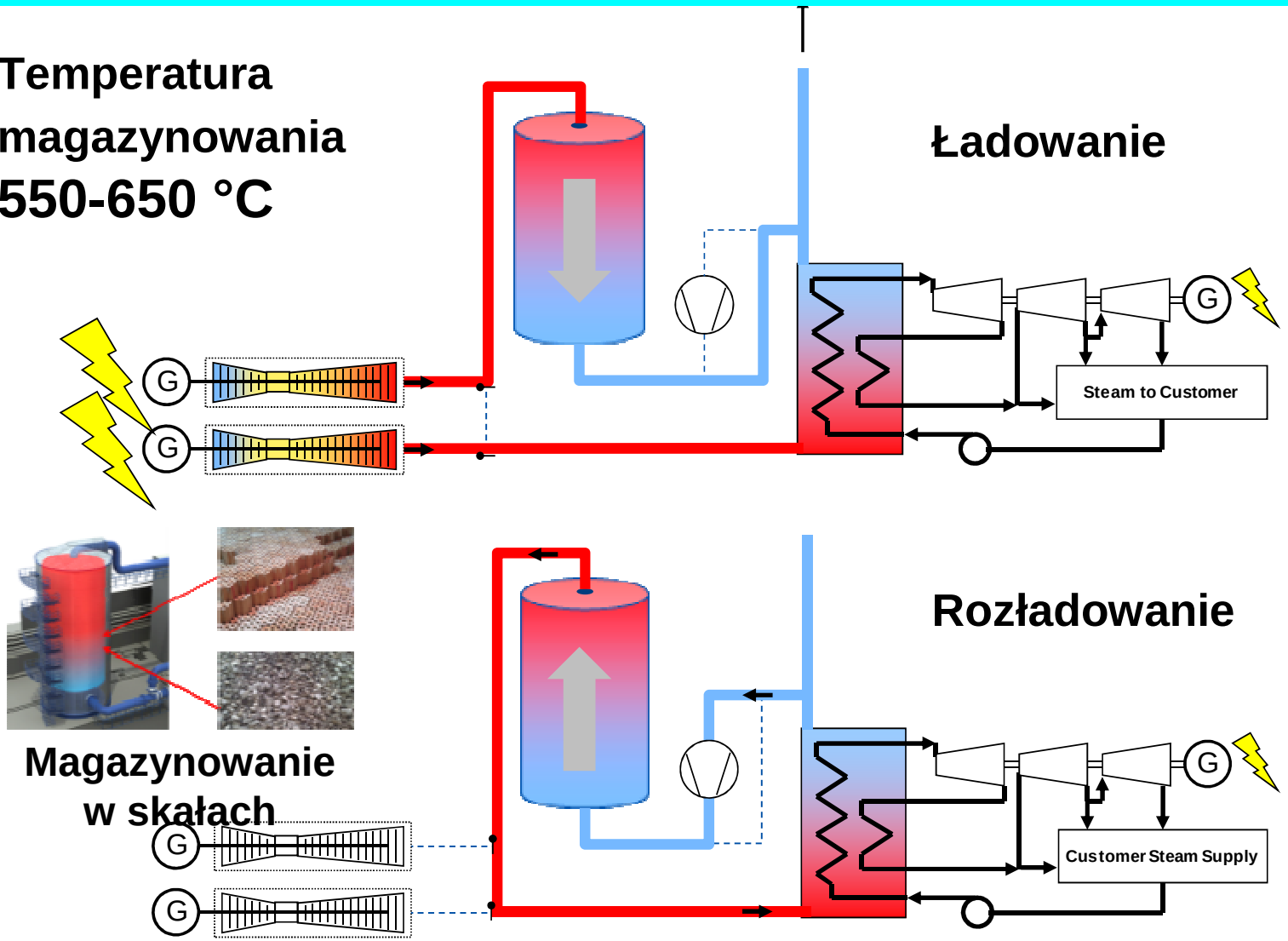




Konfiguracja bloku gazowo-parowego z możliwością wysokotemperaturowego magazynowania ciepła. Układ przedstawiono w pracy jednej z turbin na zasilanie kotła odzysknicowego, drugiej na zasilanie zasobnika ciepła.

Magazynowanie wysokotemperaturowe - poprawa elastyczności bloku gazowo-parowego

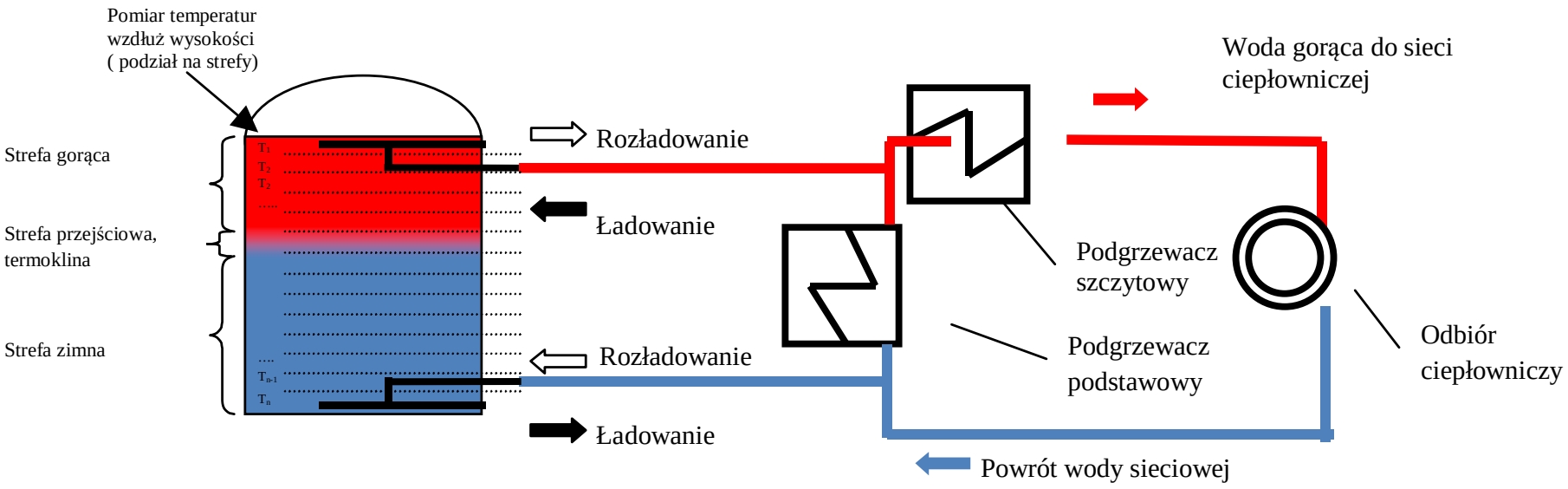
Temperatura magazynowania
550-650 °C



Magazynowanie w skałach

Sposoby wykorzystania zasobników ciepła

- Wyrównywanie obciążenia źródeł ciepła przy zmiennym zapotrzebowaniu na ciepło
- Pokrywanie chwilowego szczytowego zapotrzebowania na ciepło
- Zwiększanie chwilowej mocy szczytowej źródła (okres kilku godzin)
- Zwiększanie elastyczności pracy urządzeń, sprawności oraz dyspozycyjności wytwarzania energii elektrycznej i ciepła
- Zmniejszanie kosztów produkcji
- Zwiększanie dyspozycyjności. Zamiast utrzymania kotłów w gorącej rezerwie lub pracujących bloków przy częściowym obciążeniu, jeden blok w ruchu plus akumulator zapewnić może bezpieczną dostawę ciepła.
- Zapewnianie dostawy ciepła w sytuacjach awaryjnych
- Umożliwianie pracy źródeł ciepła w okresach, w których zapotrzebowanie ciepła jest niższe niż minima techniczne urządzeń
- Uniezależnienie produkcji energii elektrycznej od profilu zapotrzebowania na ciepło (może to mieć wpływ na ograniczenie kosztów niedotrzymania planu produkcji tj. udziału na rynku bilansującym) - maksymalizacji produkcji energii elektrycznej przy najwyższych cenach energii elektrycznej w ciągu doby



Uproszczony schemat działania zasobnika ciepła wraz z pokazaniem połączenia z systemem wytwarzania i odbioru

ITC

Zasobnik ciepła w EC Siekierki

Parametr	Jednostka	Wartość
Wysokość efektywna zbiornika	[m]	40,95
Promień wewnętrzny zbiornika	[m]	15,00
Pole przekroju poprzecznego	[m^2]	706,86
Maksymalna pojemność robocza zbiornika	[tys. m^3]	28,95
Maksymalna ilość wody w zbiorniku	[t]	27 832,55
Maksymalna ilość ciepła w zasobniku	**[GJ]**	**4 125**
Prędkość przepływu wody	**[m/s]**	**2,30**
Czas ładowania / rozładowywania	**[h]**	**4,40**
Maksymalny przepływ	**[m^3/h]**	**6 578,60**
Maksymalny efekt ładowania/ rozładowania (dla ΔT = 50 °C)	**[MW]**	**371,06**

ITC

Funkcja celu – maksymalizacja zysku operacyjnego (poprzez ładowanie, rozładowanie, zmianę obciążenia,uruchomienia, odstawienia)

$$Z = \sum_i K^i_{EnergiiEl} + \Delta K_{Zasobnika} - \sum_i K^i_{Emisji} - \sum_i K^i_{Paliwa} -$$

$$- \sum_i K^i_{Kara} - \sum_j K^j_{Rozruchu} - \sum_k K^k_{Odstawiania}$$

poszczególne indeksy oznaczają: i - indeks kroków obliczeniowych, j - indeks urządzeń uruchamianych, k - indeks urządzeń wygaszanych.

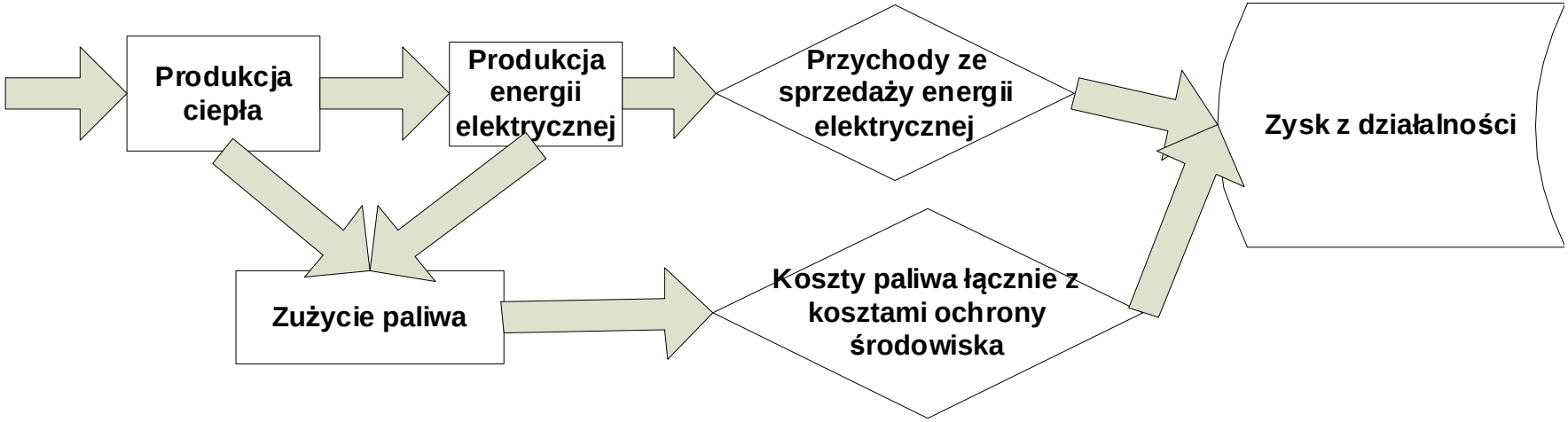
$\sum_i K^i_{EnergiiEl}$ - przychody związane ze sprzedażą energii elektrycznej,

$\Delta K_{Zasobnika}$ - przychód (koszt) związany z ładowaniem bądź rozładowywaniem zasobnika ciepła,

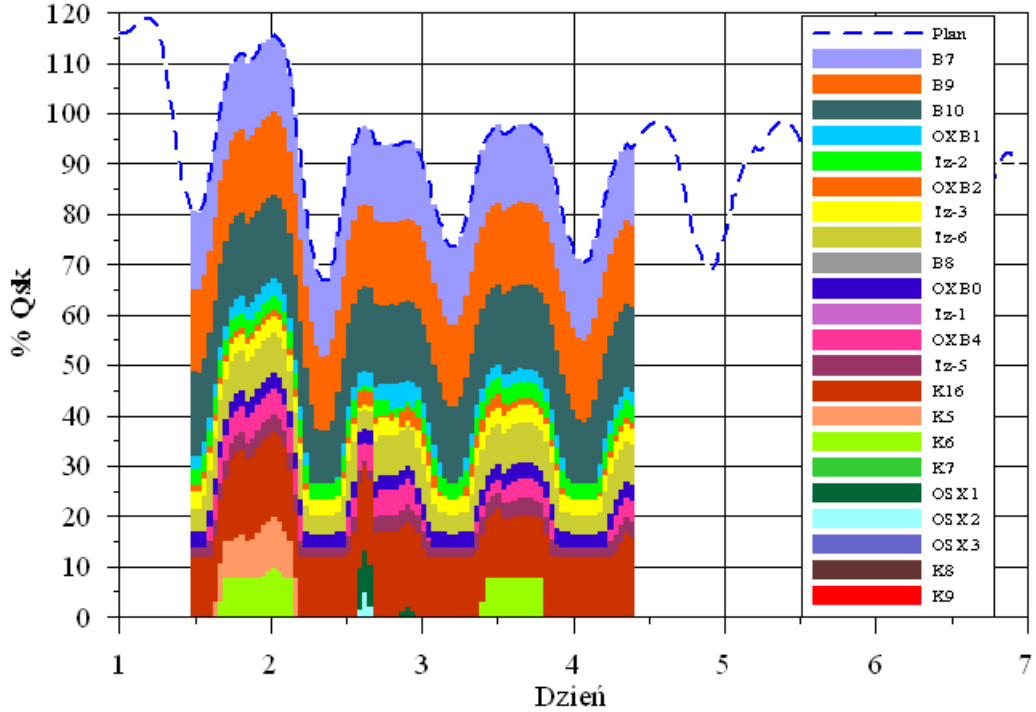
K^i_{Emisji} - koszty związane z emisją substancji szkodliwych,

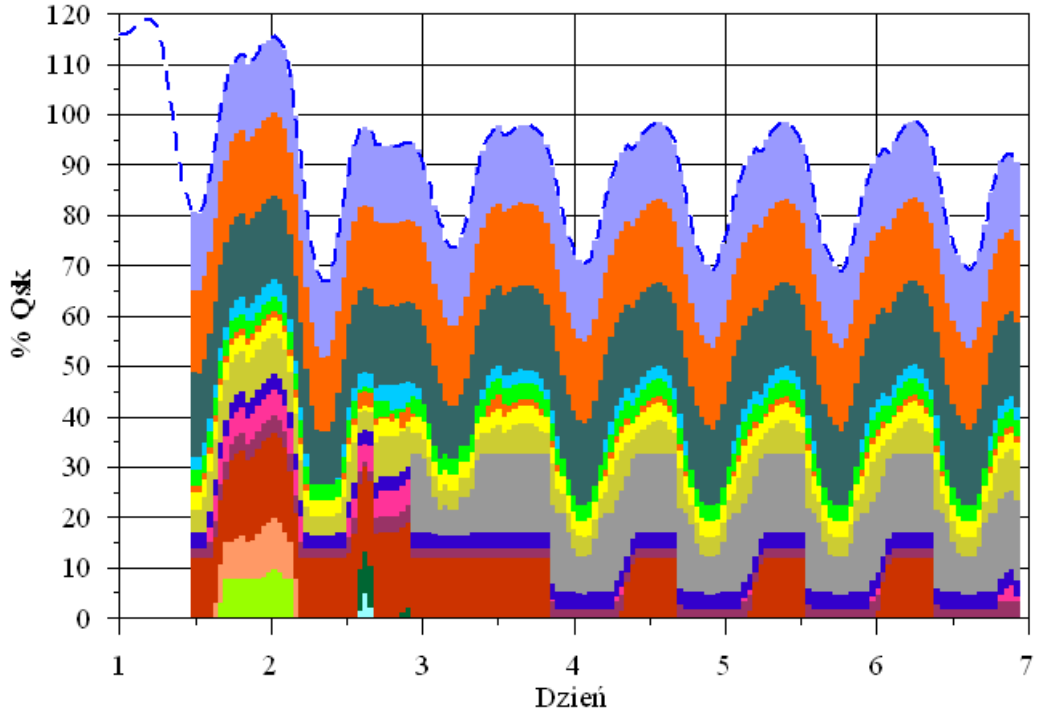
K^i_{Paliwa} - koszty paliwa użytego w kolejnych interwałach czasowych na zasilanie źródeł energii,

K^i_{Kara} - element kary funkcji zysku.



Schemat ideowy działania modelu



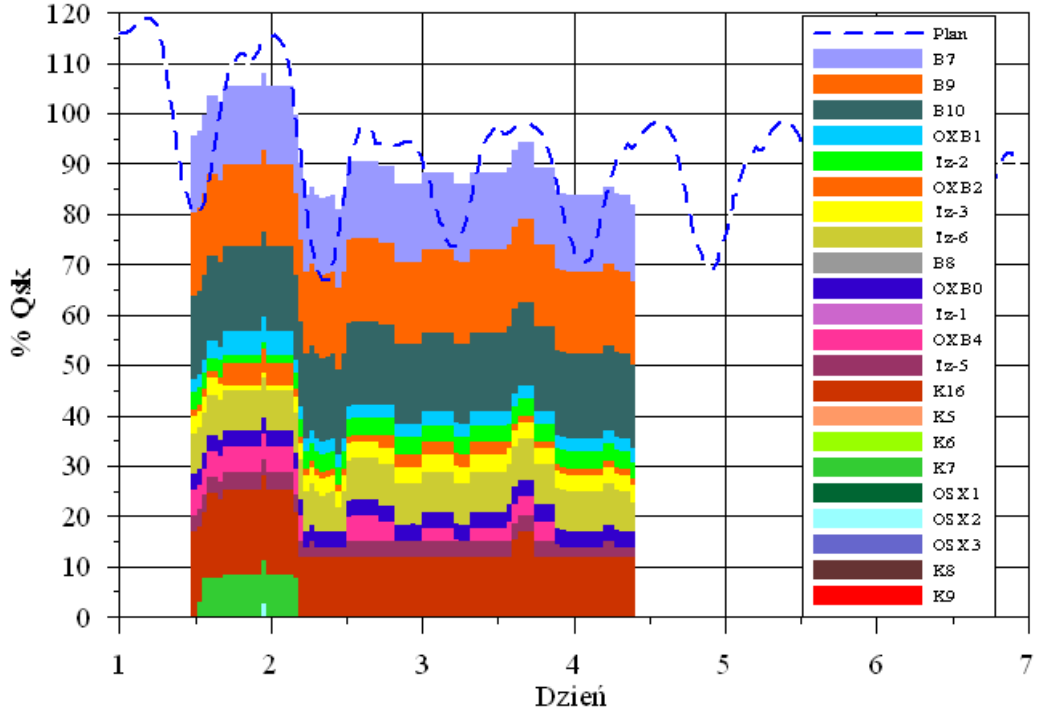


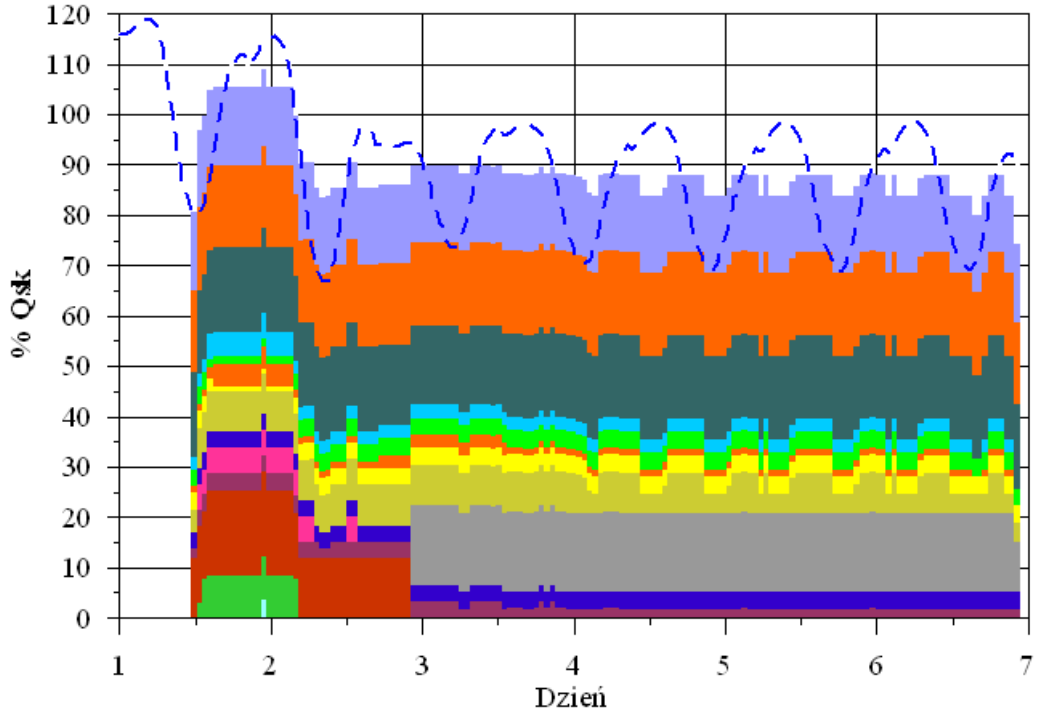
Podział obciążenia pomiędzy źródła ciepła w EC Siekierki

wynik optymalizacji, przykład dla okresu przejściowego

horyzont - okres 4 i 7 dni

Praca bez zasobnika





Podział obciążenia pomiędzy źródła ciepła w EC Siekierki

wynik optymalizacji, przykład dla okresu przejściowego

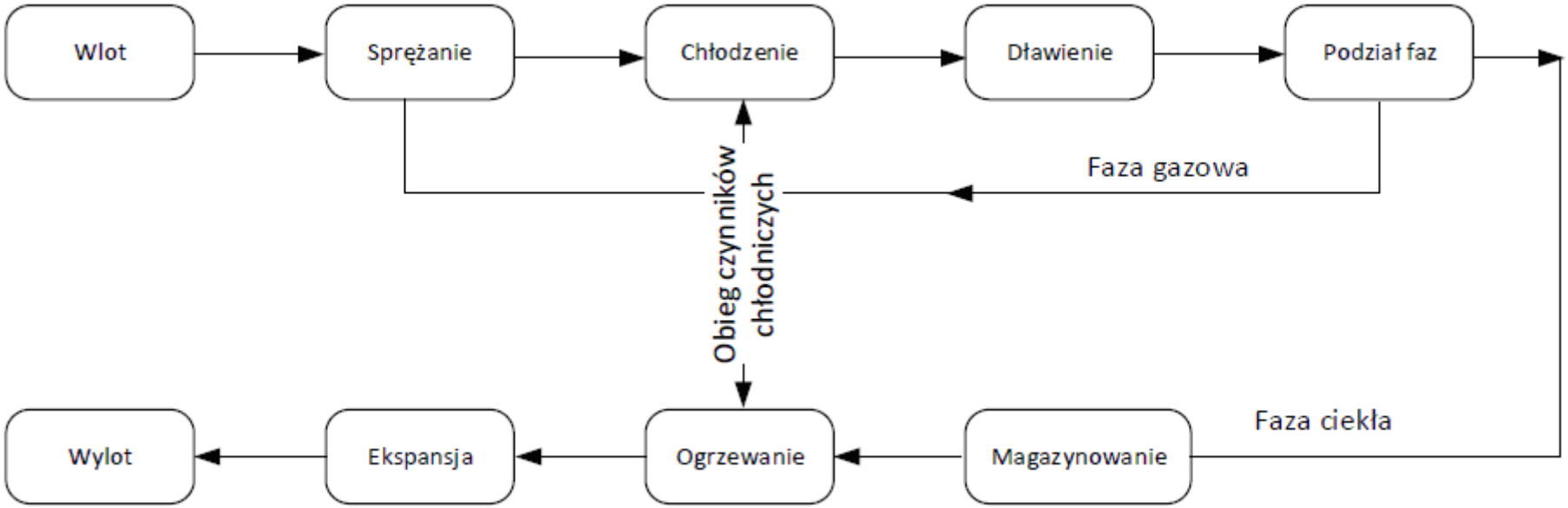
horyzont - okres 4 i 7 dni

Praca z zasobnikiem

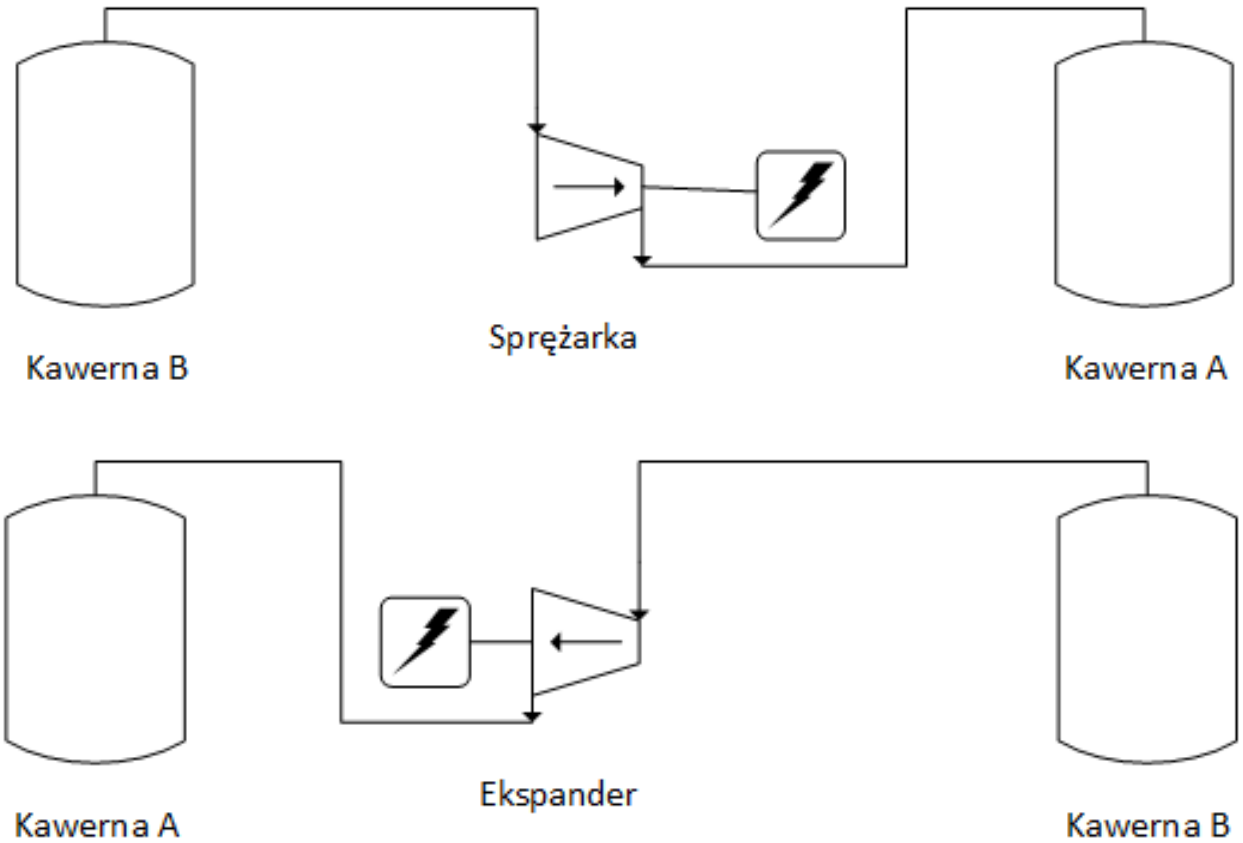
Pomysły związane z wykorzystaniem magazynowania energii w gazie

Przetłaczanie gazu pomiędzy kawernami w magazynie gazu ziemnego, z możliwością wykorzystania różnicy ciśnienia pomiędzy tymi kawernami

Wykorzystanie magazynowania gazu w postaci skroplonej, z regazyfikacją i możliwością wykorzystania do generacji energii w procesie rozprężania gazu po regazyfikacji (LNGES)



Magazynowanie energii w technologii CNGES
(ang. Compressed Natural Gas Energy Storage)



Dziękuję za uwagę