



**Politechnika
Śląska**

KATEDRA MASZYN I URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI
POLITECHNIKA ŚLĄSKA



ROZPRAWA DOKTORSKA

**System magazynowania energii w sprężonym powietrzu
sprofilowany na potrzeby dużych jednostek wytwórczych**

Sebastian Waniczek

Dyscyplina:

Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Promotor:

Dr hab. inż. Łukasz Bartela, Prof. PŚ

Opiekun z ramienia przedsiębiorcy:

Dr inż. Marian Lipka

Pilchowice, 2022



Autor: mgr inż. Sebastian Waniczek

Energoprojekt Katowice S.A.

ul. Jesionowa 15, Katowice 40-159

email: waniczek.sebastian@epk.com.pl

Promotor: dr hab. inż. Łukasz Bartela, Prof. PŚ

Politechnika Śląska Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

ul. Konarskiego 18, Gliwice 44-100

email: lukasz.bartela@polsl.pl

Opiekun z ramienia przedsiębiorcy: dr inż. Marian Lipka

Energoprojekt Katowice S.A.

ul. Jesionowa 15, Katowice 40-159

email: lipka.marian@epk.com.pl

Podziękowania

Pragnę podziękować mojemu Promotorowi, profesorowi Łukaszowi Barteli, za wszystko co zrobił, bym mógł znaleźć się w miejscu, w którym jestem.

Dziękuję również mojemu Opiekunowi, doktorowi Marianowi Lipce, za jego cenne wskazówki.

Dziękuję pracownikom Politechniki Śląskiej, którzy zajmują się tematyką magazynowania energii w sprężonych gazach, za to, że nigdy nie odmówili mi pomocy, traktując mnie od początku jako pełnoprawnego członka Zespołu.

Składam także podziękowania mojemu przełożonemu, Panu Michałowi Brzuszkiewiczowi oraz koleżankom i kolegom z pracowni Mechanicznej M1 Energoprojektu-Katowice, za okazane wsparcie w wypełnianiu obowiązków zawodowych.

Szczególne podziękowania kieruję do mojej Żony i Córek, za bezgraniczną cierpliwość i oparcie w chwilach mojego zwątpienia.

SPIS TREŚCI

1.	WSTĘP	11
2.	CEL I ZAKRES PRACY	21
3.	TECHNOLOGIA CAES	22
3.1.	Podstawy teoretyczne	22
3.2.	Podział systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu ..	30
3.3.	Przykładowe instalacje CAES.....	34
3.3.1.	Huntorf.....	35
3.3.2.	McIntosh	38
3.3.3.	Hydrostor Goderich A-CAES	40
3.3.4.	Centrum Energetyczne Bethel.....	41
4.	MOŻLIWOŚCI BUDOWY SYSTEMU CAES W POLSCE	43
4.1.	Struktury magazynujące sprężone powietrze	43
4.1.1.	Naziemne zbiorniki magazynowe	43
4.1.2.	Kawerny solne	44
4.1.3.	Struktury porowate, warstwy wodonośne i wyeksploatowane złoża węglowodorów.....	47
4.1.4.	Komory skalne.....	50
4.1.5.	Nieczynne kopalnie	51
4.1.6.	Dostępność struktur magazynowych na potrzeby budowy systemu CAES w Polsce - konkluzje	51
4.2.	Magazynowanie ciepła	57
4.2.1.	Magazyn ciepła jawnego	57
4.2.2.	Magazyn ciepła utajonego	61
4.2.3.	Termochemiczny magazyn ciepła	62
4.2.4.	Dostępność TES na potrzeby budowy systemu CAES w Polsce - konkluzje.....	62
4.3.	Maszyny przepływowe.....	64
5.	KONCEPCJA SYSTEMU ACAES Z WYKORZYSTANIEM HYBRYDOWEGO ZBIORNIKA	66
5.1.	Wyzwania budowlane i konstrukcyjne	75
5.1.1.	Magazyn sprężonego powietrza	75
5.1.2.	Magazyn ciepła.....	80
5.2.	Adaptacja podziemnej części kopalni na potrzeby budowy magazynu sprężonego powietrza	89
5.2.1.	Prace przygotowawcze.....	89
5.2.2.	Korek szybowy i stopy szybowe	90
5.3.	Wstępne analizy mechaniczna i ocena mostków termicznych systemu TES	96
5.3.1.	Wstępna analiza mechaniczna segmentu zasobnika	96

5.3.2.	Wstępna analiza mostków termicznych konstrukcji nośnej zasobnika	116
5.4.	Analiza termodynamiczna dla systemu ACAES	119
5.4.1.	Metodologia	119
5.4.2.	Założenia	128
5.4.3.	Analiza wyników	133
6.	ANALIZA EKONOMICZNA.....	150
6.1.	Metodologia	150
6.2.	Założenia	154
6.3.	Analiza wyników	158
7.	KONKLUZJE I WNIOSKI.....	165
8.	BIBLIOGRAFIA	170
	SPIS RYSUNKÓW	186
	SPIS TABEL.....	191
	ZAŁĄCZNIKI	193
	Załącznik nr 1 - Zestawienie projektów CAES oraz ich status.....	193
	Załącznik nr 2 - Zestawienie wyników	224
	STRESZCZENIE	235
	ABSTRACT	236

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ

Oznaczenie łacińskie

a	- współczynnik wyrównania temperatur (dyfuzyjność termiczna), m^2/s
a_K	- współczynnik konwersji ciśnienia bocznego, -
a_μ	- współczynnik konwersji tarcia, -
a_ϕ	- współczynnik konwersji tarcia wewnętrznego, -
C_b	- współczynnik zwiększenia obciążenia dna, -
d, D	- średnica, m
e	- bezwładność cieplna, $J/(m^2 \cdot K \cdot s^{1/2})$
h	- entalpia właściwa, J/kg
H	- wysokość, m
k	- naprężenia dopuszczalne na rozciąganie, Pa
K	- stosunek ciśnienia bocznego, -
l	- długość, m
m	- masa, kg
M	- masa molowa, kmol
N	- moc elektryczna, W
p	- ciśnienie, Pa
q	- energia właściwa, J/kg
Q	- ciepło, J
q_{mol}	- ciepło molowe, J/kmol
R	- indywidualna stała gazowa, $J/(kgK)$
T, t	- temperatura, K, °C
V	- objętość, m^3
x	- współczynnik bezpieczeństwa, -

Oznaczenie greckie

β	- spręż, -
γ	- gęstość nasypowa, kN/m^3
ε	- porowatość złoża, -
ε_{wc}	- efektywność wymiennika, -
η_i	- sprawność izentropowa, -
η_p	- sprawność politropowa, -
κ	- wykładnik izentropy, -
λ	- współczynnik przewodzenia ciepła, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
μ	- współczynnik tarcia, -
ρ	- gęstość, kg/m^3
τ	- czas, s
Φ_r	- kąt nasypowy, $^\circ$
Φ_i	- kąt tarcia wewnętrznego, $^\circ$
ω	- współczynnik acentryczny powietrza, -

1. Wstęp

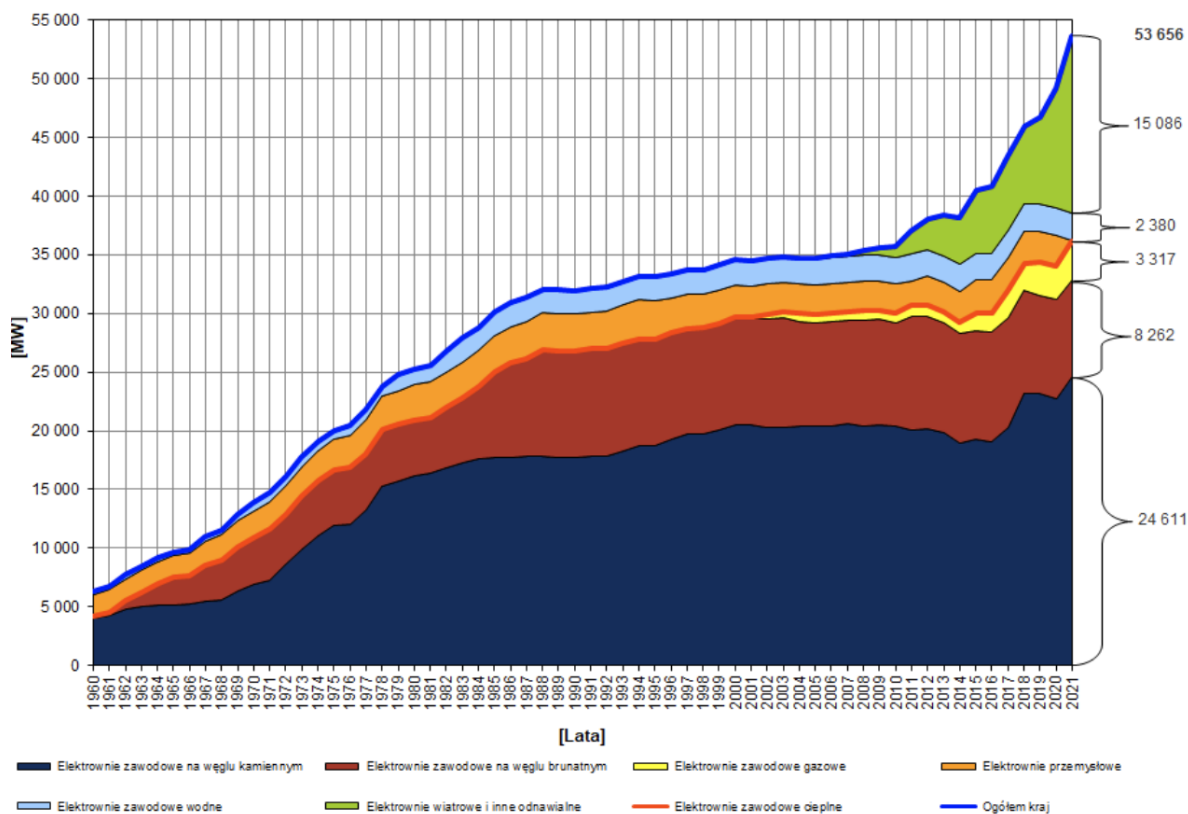
W ramach systemu elektroenergetycznego występuje ciągła potrzeba stymulowania takich działań, aby możliwe było dostarczenie odbiorcom energii elektrycznej w ilości przez nich oczekiwanej. Zadanie to jest poważnym wyzwaniem, szczególnie w ramach tych systemów, gdzie energia uzyskiwana jest w dużym udziale w oparciu o niestabilne trudno prognozowalne źródła odnawialne, tj. wiatr oraz energia solarna. W Polsce obserwowany wzrost udziału źródeł odnawialnych (patrz tabela 1.1) przyczynia się do niekorzystnych skutków w postaci zmian obciążenia bloków pracujących w dużych, scentralizowanych elektrowniach, szczególnie spalających węgiel kamienny [1], co jest następstwem pierwszeństwa w świadczeniu usług przesyłania energii elektrycznej z OZE przed energią pochodzącą ze źródeł konwencjonalnych źródeł. Jak słusznie zauważają Autorzy w swej pracy, uprzywilejowaną pozycję OZE wzmacnia rynek handlu emisjami gazów cieplarnianych. Konsekwencją tego jest pogorszenie ekonomiki pracy całego systemu elektroenergetycznego, objawiający się wyższą ceną energii oferowaną odbiorcy końcowemu.

Wzrost produkcji energii elektrycznej przez źródła odnawialne wymusza obniżenie produkcji energii w źródłach konwencjonalnych. Konsekwencją tego obecnie jest już nie tylko utrzymywanie bloków w ruchu przy minimum technicznym gwarantującym możliwość szybkiego powrotu do obciążenia nominalnego, ale także ich odstawianie, szczególnie w okresach dolin weekendowych. O ile obecnie w Polsce problem ten dotyczy mniejszych jednostek węglowych, czyli najczęściej bloków klasy 200 MW, to z pewnością w miarę planowych odstawiń przestarzałych bloków elektrowni oraz wzrostu mocy zainstalowanej w farmach wiatrowych i elektrowniach słonecznych, nowoczesne bloki o parametrach nadkrytycznych będą zmuszane do częstszych przejęcia takiej funkcji regulatorów Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) [2]. Patrząc na dynamikę wzrostu mocy zainstalowanej w KSE w latach 1960 ÷ 2021 widać bardzo wyraźny wzrost OZE, gdzie w ciągu ostatnich 13 lat, ich udział wzrósł od 0 do ponad 28% w ogólnym miksie energetycznym [3] (patrz rysunek 1.1).

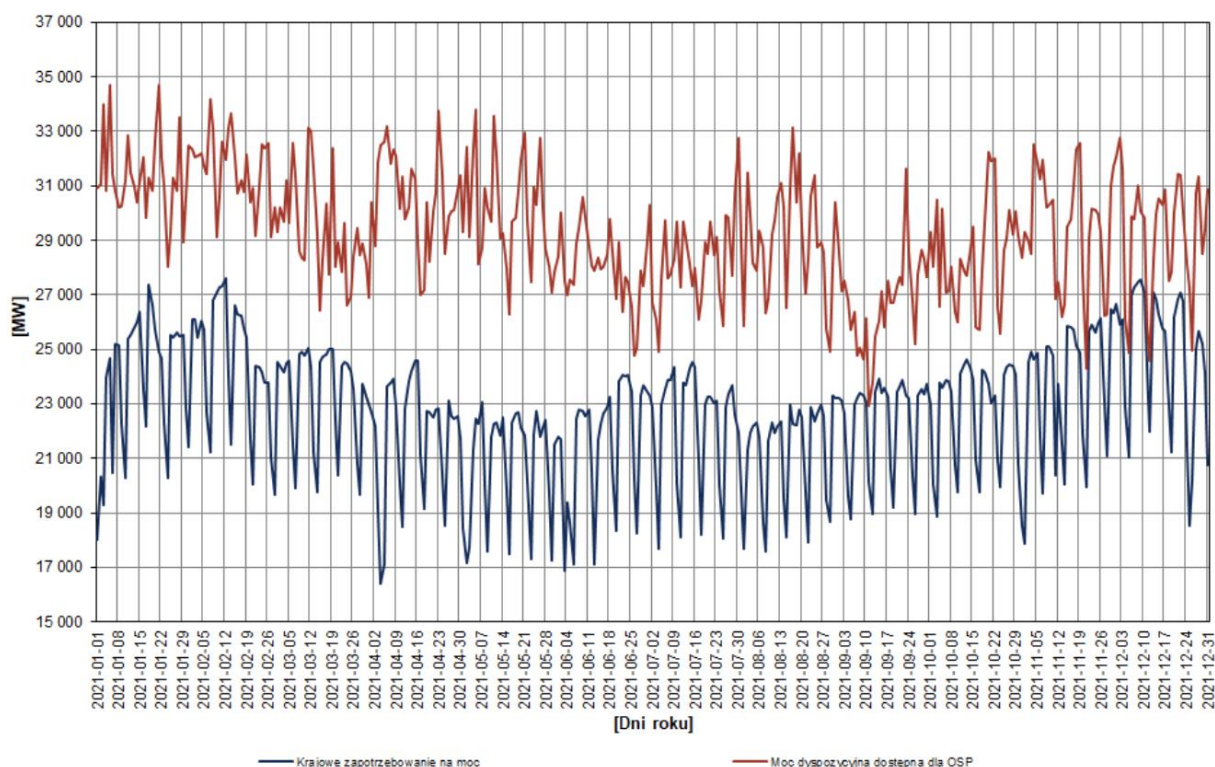
Rysunek 1.2 przedstawia krajowe zapotrzebowanie na moc oraz moc dyspozycyjną, która jest dostępna dla Operatora Systemu Przesyłowego (OSP) w szczytach dobowych [4]. Na podstawie wykresu można oszacować, że wahania zapotrzebowania wynoszą od 4 do 6 GW.

Tabela 1.1 Ilość energii produkowanej przez dostępne źródła oraz udział energii produkowanej w OZE w Polsce w latach 2010 – 2020 [3]

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energia elektryczna wyprodukowana w OZE, GWh											
Energetyka wodna	188,7	191,8	193,5	195,4	197,9	197,9	199,3	199,1	200,9	200,6	199,7
Energetyka wiatrowa	146,2	251,2	387,8	527,3	651,2	833,0	1 035,3	1 166,9	1 174,2	1 224,5	1 294,3
Energetyka solarna	0,0	0,0	0,1	0,1	0,6	4,9	10,7	14,2	25,8	61,1	168,4
Biomasa	507,8	614,6	819,3	682,0	787,6	776,2	594,4	456,5	458,6	553,8	596,1
Pozostałe OZE	34,3	38,8	48,6	59,3	70,2	77,9	89,5	101,2	104,3	106,6	121,7
SUMA	877,0	1 096,5	1 449,3	1 464,2	1 707,5	1 889,9	1 929,1	1 937,9	1 963,8	2 146,7	2 380,2
Energia elektryczna ze wszystkich dostępnych źródeł, GWh											
SUMA	13 390,8	13 574,9	13 660,4	13 714,6	13 815,4	14 102,1	14 458,4	14 813,2	15 074,5	14 953,1	14 659,6
UDZIAŁ ENERGII ODNAWIALNEJ, %	6,55%	8,08%	10,61%	10,68%	12,36%	13,40%	13,34%	13,08%	13,03%	14,36%	16,24%



Rysunek 1.1 Dynamika wzrostu mocy zainstalowanej w KSE w latach 1960÷2021 [5].



Rysunek 1.2 Krajowe zapotrzebowanie na moc oraz moc dyspozycyjna dostępna dla OSP w szczytach dobowych krajowego zapotrzebowania na moc w 2021 roku [4].

Nie bez znaczenia są wydarzenia związane z rosyjską agresją na Ukrainę, której

następstwem jest nałożenie sankcji na rosyjskie surowce energetyczne, co wywołało znaczny niedobór paliw na rynku. W obawie przed pogłębiającym się kryzysem energetycznym rządu wielu państw, w tym Polski, szukają sposobów na obniżenie zużycia energii elektrycznej oraz paliw, jak również poprawienia elastyczności w zakresie możliwości bilansowania energii z OZE [6].

Powyższe argumenty bezpośrednio wskazują na istotność wykorzystania wielkoskalowych systemów magazynowania w ramach systemu elektroenergetycznego. Obecnie na świecie najwięcej energii magazynowanej jest przy wykorzystaniu elektrowni szczytowo pompowych, których udział w ogólnym bilansie magazynów energii przekracza 99% [7]. Jedynymi systemami, które są w stanie konkurować z tą technologią pod względem dostępnej mocy oraz pojemności magazynowej, są magazyny energii w sprężonym powietrzu [8]. Tabela 1.2 przedstawia ogólną charakterystykę parametrów systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu (CAES). Obecnie jedynym możliwym do realizacji projektem magazynu dużej skali jest projekt elektrowni szczytowo-pompowej „Młoty” w województwie dolnośląskim, którego budowa została wstrzymana w 1981 r. W rozważaniach nad systemem CAES, podobnie jak w przypadku elektrowni szczytowo-pompowej, czynnikiem decydującym o możliwości realizacji projektu jest dostępność struktury magazynującej. Struktura przewidziana do magazynowania sprężonego powietrza powinna spełniać dwa podstawowe warunki, to znaczy powinna cechować się dużą pojemnością geometryczną oraz powinna być zdolna do magazynowania sprężonego powietrza przy możliwie wysokim ciśnieniu. Spełnienie tych dwóch warunków umożliwia już realizację systemu CAES w układzie diabatyicznym, który przez to, iż zasilany jest paliwem gazowym, charakteryzuje się niekorzystnymi charakterystykami ekologicznymi. Przegląd dostępnych na terenie Polski struktur wskazuje na dwie możliwości: wykorzystanie kawerny solnej lub wykorzystanie nieczynnej kopalni. Obecnie, na terenie Polski nie jest przewidziana możliwość zmiany przeznaczenia istniejących kawern solnych, a budowa nowych będzie wiązać się ze sporymi utrudnieniami - zarówno technologicznymi jak i społecznymi. Objętość magazynowana dostępnych kawern jest kluczowa z punktu widzenia zabezpieczenia dostępności do gazu ziemnego, co w kontekście problemów wynikających z ograniczenia w ostatnim czasie kierunków dostaw tego paliwa jest zagadnieniem priorytetowym. Budowa kawern przewidzianych dla innych celów

wydaje się obecnie niemożliwa. Ponadto w trakcie ługowania powstają duże ilości solanki, która jest wykorzystywana w zakładzie odsalania do produkcji soli lub jest zrzucana do rzeki [9], co w kontekście katastrofy ekologicznej na Odrze w sierpniu 2022, wydaje się obecnie nierealne, z uwagi na spodziewane protesty społeczne i organizacji proekologicznych. Sytuacja wygląda inaczej w przypadku likwidowanych zakładów górniczych, których, zgodnie ze światową tendencją odchodzenia od paliw kopalnych, będzie przybywać.

Tabela 1.2 Ocena parametrów charakterystycznych dla magazynowania energii w sprężonym powietrzu przez pryzmat pracujących instalacji.

Parametr	Jednostka	Wartości	Uwagi
Gęstość energii	kWh/m ³	2,0 - Huntorf 4,9 – McIntosh	Pracujące instalacje cechują się niską wartością gęstości energii. Wartości literaturowe [10] wskazują na bardzo szeroki zakres gęstości energii, wynoszący od 0,25 do 25 kWh/m ³ jednak w dalszym ciągu w odniesieniu do innych technologii magazynowania są to niskie wartości.
Moc znamionowa	MW	1,75 – Goderich 321 – Huntorf	Pracujące systemy cechują się bardzo szerokim zakresem mocy znamionowych, przy czym wartości instalacji McIntosh i Huntorf są wysokie w porównaniu do innych technologii magazynowania energii (przykładowo Elektrownia Wodna Solina posiada moc zainstalowaną 200 MW), a dostępne informacje wskazują, że rozważane są instalacje o mocach przekraczających 1000 MW [11].
Pojemność magazynowa energii	MWh	642 - Huntorf 2640 – McIntosh	Pojemność magazynowa energii systemów CAES jest <u>bardzo wysoka.</u>

Parametr	Jednostka	Wartości	Uwagi
Przewidywana żywotność	lata	Minimum 25	Biorąc pod uwagę obie pracujące instalacje, a w szczególności instalacja Huntorf, która pracuje od ponad 40 lat można stwierdzić, że żywotność technologii jest <u>bardzo wysoka.</u>
Sprawność cyklu	%	42 - Huntorf 54 – McIntosh	Sprawność pełnego cyklu jest <u>bardzo niska</u> , jednak wynika to w szczególności z definicji sprawności określanej dla dominujących systemów diabatycznych, gdzie ujmowana jest ilość energii chemicznej wykorzystywanej w cyklu pracy systemu. Dla system adiabaticznego lub izotermicznego sprawność może przekroczyć wartość 75%.
Czas magazynowania	-	Do kilku miesięcy	Parametr trudny do oceny. Obie pracujące instalacje oparte są o bardzo szczelne kawerny solne, umożliwiające <u>bardzo długie</u> magazynowanie. Jednak w przypadku zastosowania innych struktur parametr ten może nie być tak wysoko oceniany.

Parametr	Jednostka	Wartości	Uwagi
Czas działania w cyklu rozładowania	h	2 - Huntorf 24 – McIntosh	Czas działania cyklu w rozładowania instalacji McIntosh jest bardzo długi , głównie z uwagi na bardzo dużą pojemność magazynową w odniesieniu do mocy zainstalowanej, przy czym oba te parametry są również na bardzo wysokim poziomie.
Dojrzałość technologii	-	Trzy komercyjnie pracujące instalacje, z czego tylko dwie dużej mocy	Po przeglądzie literatury i ilości publikacji można odnieść wrażenie, że technologia magazynowania energii w sprężonym powietrzu jest dojrzała. Wynika to głównie z tego, iż w ramach systemów wykorzystywane są maszyny i urządzenia powszechnie wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu. Jednak biorąc pod uwagę, że na całym świecie pracują jedynie dwie wielkoskalowe instalacje i obie są systemami diabatycznymi, wykorzystującymi taki sam typ zbiornika ciśnieniowego (kawerna solna) trudno się zgodzić z takim twierdzeniem. Wydaje się, iż niska atrakcyjność inwestycyjna technologii wynika z tego, iż

Parametr	Jednostka	Wartości	Uwagi
			<p>systemy adiabatyczne są systemami o niekorzystnych charakterystykach ekologicznych. W przypadku systemów adiabatycznych, których eksploatacja jest środowiskowo neutralna, niższa dojrzałość wynika z potrzeby zastosowania systemów magazynowania ciepła, których budowa jest wyzwaniem natury konstrukcyjnej i inwestycyjnej. Dowodem na to, iż systemy adiabatyczne odznaczają się niską dojrzałością jest znacząca ilość rozpoczętych i porzuconych projektów.</p>
Potencjał wykorzystania technologii	-	-	Trwające badania i wnioski płynące z prac badawczych wykazują na <u>bardzo duży</u> potencjał technologii CAES

Tendencja spadku wydobycia węgla kamiennego jest bardzo mocno widoczna. Od roku 2012 do 2020 zanotowano spadek ze 144,1 mln ton do 100,7 mln ton, przy wzroście do 107,6 mln ton w roku 2021 [12]. Obecnie w stanie likwidacji znajduje się 8 kopalń [13]:

- Kopalnia Węgla Kamiennego „Makoszowy”
- Kopalnia Węgla Kamiennego „Centrum”
- Kopalnia Węgla Kamiennego „Mysłowice - Wesoła I”
- Kopalnia Węgla Kamiennego „Pokój I - Pokój II”
- Kopalnia Węgla Kamiennego „Wieczorek II”
- Kopalnia Węgla Kamiennego „Krupiński”
- Kopalnia Węgla Kamiennego „Piekary I”
- Kopalnia Węgla Kamiennego „Jas-Mos - Jastrzębie III”

Podziemne wyrobiska zamykanych kopalń, po ich odpowiednim przystosowaniu, mogłyby stanowić strukturę magazynującą sprężone powietrze. Budowa ekologicznych systemów adiabatycznych wiąże się jednak z potrzebą zabudowy w ramach systemów zasobników ciepła, tzw. systemów Thermal Energy Storage (TES), których zadaniem jest przejęcie ciepła od sprężanego powietrza w trakcie jego sprężania, tj. w fazie ładowania magazynu, jego zmagazynowanie, a następnie przekazanie ciepła powietrzu kierowanemu do ekspandera na etapie rozładowywania systemu magazynowania energii. Odpowiednia konstrukcja zasobnika ciepła jest kluczowa dla efektywności pracy systemu. Zasobnik ten powinien być zdolny do pracy przy wysokim ciśnieniu, równym maksymalnemu ciśnieniu ładowania i jednocześnie przy możliwie jak najwyższej temperaturze, gdyż te dwa parametry są kluczowe dla systemów adiabatycznych CAES [14].

Odpowiedzią na obie poruszone kwestie, to jest kwestię doboru dla adiabatycznego systemu CAES odpowiedniej struktury magazynującej, jak również kwestię rozwiązania konstrukcyjnego dla systemu TES jest wynalazek dotyczący podziemnego magazynu na sprężone powietrze zabudowanego w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym [15], [16], który jednocześnie jest magazynem ciepła dla systemu CAES. Z informacji posiadanych na dzień 19 września 2022 wynika, iż Europejski Urząd Patentowy (EPO) wydał decyzję o uzyskaniu patentu na powyższe rozwiązanie, aczkolwiek nie zostały jeszcze określone kraje, w których patent będzie chroniony.

Proponowana w niniejszej pracy koncepcja systemu CAES w pełni opiera się o istotę wynalazku będącego przedmiotem zgłoszenia patentowego.

2. Cel i zakres pracy

Niniejsza praca wpisuje się w całości w ogólnościowy trend poszukiwania jak najbardziej korzystnych sposobów magazynowania energii. Na początkowym etapie doktoratu przedmiotem zainteresowania była koncepcja hybrydowego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Koncepcja ta zakładała cieplną integrację systemu CAES z obiegiem cieplnym zespołu turbiny parowej bloku węglowego. Rezultaty analiz przedstawiono w [17]. Odrzucenie koncepcji było spowodowane wyraźną identyfikacją odwrotu od źródeł węglowych, jaki ma towarzyszyć kształtowaniu krajowego miksu energetycznego w najbliższych dwóch dekadach (PEP2040) [18]. Dodatkowym wyzwaniem było znalezienie odpowiedniej struktury magazynującej sprężone powietrze w bliskim sąsiedztwie bloku energetycznego. Prowadzone prace zaowocowały trzema zgłoszeniami patentowymi [15], [16], [19], przy czym to wynalazek dotyczący podziemnego magazynu na sprężone powietrze zabudowanego w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym stał się motorem napędowy niniejszej pracy. Należy zwrócić uwagę, iż cechy wynalazku nie wykluczają możliwości przeprowadzenia bezpośredniej integracji systemu magazynowania energii z blokiem energetycznym po stronie elektrycznej, co powoduje, że opracowany system magazynowania może stanowić element uelastyczniający obciążenie dużych bloków energetycznych, które obecnie stanowią jednostki centralnie dysponowane, pracującej pod dyktando operatora systemu, biorąc w ten sposób udział w bilansowaniu KSE.

Do podstawowych zadań badawczych, jakie zostały przeprowadzone, należą:

- ocena możliwości wykorzystania szybu pokopalnianego na potrzeby zabudowy hybrydowego magazynu na sprężone powietrze i ciepło, pracującego w ramach systemu ACAES,
- opracowanie rozwiązań technicznych umożliwiających zabudowę oraz bezpieczną eksploatację hybrydowego magazynu na sprężone powietrze i ciepło w objętości szybu pokopalnianego,
- analiza termodynamiczna dla wybranych wariantów systemu ACES, a w tym

określenie dla nich potencjałów pojemnościowych oraz sprawności magazynowania energii,

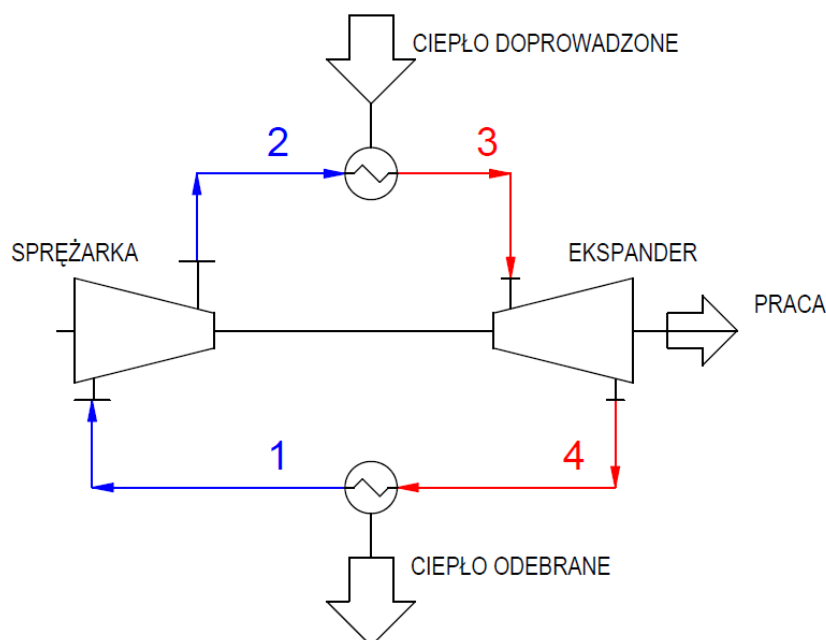
- analiza ekonomiczna dla wybranych wariantów ACAES.

Stawia się tezę, iż technicznie możliwa jest budowa adiabaticznego systemu CAES na terenie Polski, przy wykorzystaniu infrastruktury pokopalnianej, ze szczególnym uwzględnieniem szybu pokopalnianej. Drugą postawioną tezę jest atrakcyjność systemu adiabaticznego systemu CAES, wyposażonego w innowacyjne rozwiązanie magazynu na sprężone powietrze i ciepło, w aspekcie efektywności ekonomicznej, która w segmencie przedmiotowych pojemności energetycznych jest determinowana głównie wielkością nakładów inwestycyjnych oraz sprawnością magazynowania energii.

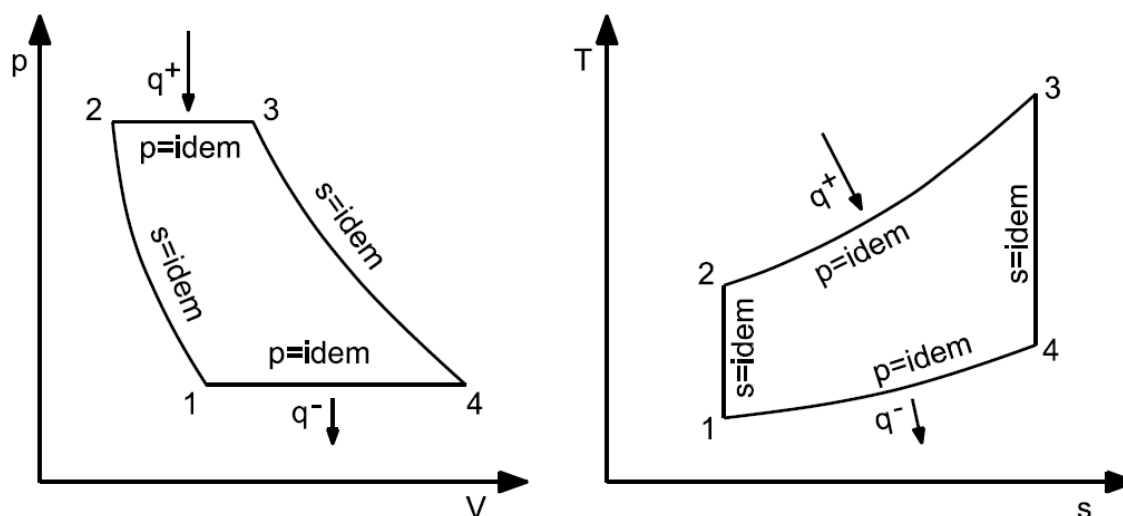
3. Technologia CAES

3.1. Podstawy teoretyczne

U podstaw technologii CAES stoi cykl termodynamiczny znany jako cykl Braytona-Joule'a, na którym opiera się zasada działania siłowni turbogazowych.



Rysunek 3.1 Schemat siłowni gazowej obiegu Braytona-Joule'a



Rysunek 3.2: Obieg porównawczy siłowni turbogazowej w układzie p - v oraz T - s

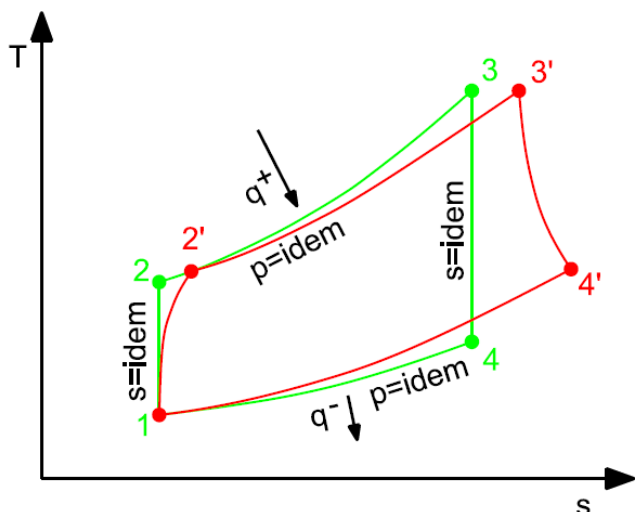
Cykl Braytona-Joule'a składa się z czterech faz, w skład których wchodzi następujące przemiany:

- 1 - 2 – **sprężanie izentropowe** – gazowe medium robocze jest sprężane adiabatycznie za pomocą sprężarki. Praca sprężarki zwiększa energię wewnętrzną, podnosząc ciśnienie i temperaturę gazu, podczas gdy entropia pozostaje niezmienna.
- 2 - 3 – **izobaryczne dostarczenie ciepła** – w tej fazie następuje dostarczanie ciepła z zewnętrznego źródła do przepływającego gazu, znajdującego się przy stałym ciśnieniu.
- 3 - 4 – **rozprężanie izentropowe** – uprzednio sprężony i podgrzany gaz rozprężany jest adiabatycznie w ekspanderze. Gaz traci energię wewnętrzną równą pracy wykonanej przez łopatki turbiny i wyprowadzonej na zewnątrz układu. W trakcie rozprężania entropia pozostaje niezmienna
- 4 - 1 – **izobaryczne chłodzenie** – w tej fazie, kończącej cykl, następuje schłodzenie przepływającego gazu, przy stałym ciśnieniu.

Cykl Braytona-Joule'a jest teoretycznym (idealnym) cyklem termodynamicznym, który jest nieosiągalny w warunkach rzeczywistych, co wynika z drugiej zasady termodynamiki. Entropia procesów, na przykład wskutek tarcia mechanicznego czy też strat ciśnienia, rośnie.

Z uwagi na powyższe, przy dokładniejszym szacowaniu mocy układu konieczne jest

opieranie się o modele opracowywane z uwzględnieniem przemian rzeczywistych. Niemniej jednak, teoretyczny obieg Braytona-Joule'a często wykorzystywany jest do wstępnej, szacunkowej oceny efektywności termodynamicznej systemów. Różnice występujące pomiędzy obiegiem teoretycznym, a obiegiem rzeczywistym zobrazowano na rysunku 3.3.



Rysunek 3.3: Rzeczywisty obieg turbiny gazowej (kolor czerwony) i teoretyczny obieg Braytona-Joule'a (kolor zielony).

Rysunek 3.3 wskazuje, iż aby uzyskać tę samą ilość energii w cyklu rzeczywistym co w cyklu Braytona, konieczne jest podgrzanie medium do wyższych wartości temperatur.

W przypadku ekspandera generowana moc może zostać wyznaczona za pomocą równania:

$$N_e = \dot{m} \Delta h_s \eta_{iE} \eta_{emE}, \quad (3.1)$$

gdzie:

N_e	- moc elektryczna generowana przez ekspander, W,
\dot{m}	- masowy strumień przepływu, kg/s,
Δh_s	- izentropowy spadek entalpii właściwej, J/kg,
η_{iE}	- sprawność izentropowa ekspandera, -,
η_{emE}	Sprawność elektromechaniczna ekspandera, -.

W przypadku sprężarki teoretyczne zapotrzebowanie na moc, niezależnie od jej typu, można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$N_s = \frac{\dot{m} \Delta h_s}{\eta_{is}}, \quad (3.2)$$

gdzie:

N_s	- moc elektryczna wymagana do napędu sprężarki, W,
\dot{m}	- masowy strumień przepływu, kg/s,
Δh_s	- izentropowy spadek entalpii właściwej, J/kg,
η_{is}	- sprawność izentropowa sprężarki, -,
η_{emS}	- sprawność elektromechaniczna sprężarki, -.

W przypadku wstępnych obliczeń termodynamicznych, mających na celu wykazanie potencjału proponowanych technologii oraz tendencji zależności pomiędzy parametrami, korzysta się z przemian idealnych nieuwzględniających nieodwracalności procesów rzeczywistych. Dla maszyn wirnikowych używanych do budowy systemów CAES wyszczególnić można trzy podstawowe przemiany:

- Przemiana izotermiczna,
- Przemiana izentropowa,
- Przemiana politropowa.

Przemiana izotermiczna nie powinna być jednak rozpatrywana, gdyż obecnie maszyny pracujące w układach rzeczywistych, nawet przy zgrubnych założeniach, nie pracują przy stałych temperaturach czynnika. Literatura fachowa wskazuje jednak, że w przyszłości należy spodziewać się szerokiego wykorzystania sprężarek izotermicznych, jak chociażby tłokowa sprężarka z suchymi żebrami tłoka [20], czy wielostopniowa odśrodkowa sprężarka Dresser-Rand DATUM [21], [22], której sprawność, w zależności od konfiguracji, wykazuje się wartościami wyższymi od dotychczasowych konstrukcji o d 12 do 30%.

Jednak przy obliczeniach szacunkowych zapotrzebowania na moc napędową sprężarki, zaleca się posługiwać przemianą izentropową lub politropową. Niemniej prowadzone są prace badawcze i rozwojowe nad magazynami energii w sprężonym powietrzu, które jako cały system są rozpatrywane jako izotermiczne lub „prawie izotermiczne”.

Dla przemiany izentropowej, równanie na moc ekspandera (3.1) może zostać zapisane w następującej postaci:

$$N_e = \left(\frac{\kappa}{\kappa-1} \right) (T_1 Z_a \eta_{iE} \eta_{emE}) \dot{m} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)} \right], \quad (3.3)$$

gdzie:

N_e	- moc elektryczna generowana przez ekspander, W,
κ	- wykładnik izentropy, -,
Z_a	- średnia ściśliwość gazu, -,
T_1	- temperatura wlotowa, K,
η_{iE}	- sprawność izentropowa ekspandera, -,
η_{emE}	- sprawność elektromechaniczna ekspandera, -,
\dot{m}	- masowy strumień przepływu, kg/s,
p_2	- ciśnienie wylotowe, Pa,
p_1	- ciśnienie wlotowe, Pa.

Z kolei dla przemiany politropowej równanie przyjmuje postać:

$$N_e = \left(\frac{n}{n-1} \right) (T_1 Z_a \eta_{pE} \eta_{emE}) \dot{m} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\left(\frac{n-1}{n} \right)} \right], \quad (3.4)$$

gdzie:

N_e	- moc elektryczna generowana przez ekspander, W,
n	- wykładnik politropy, -,
Z_a	- średnia ściśliwość gazu, -,
T_1	- temperatura wlotowa, K,
η_{pE}	- sprawność politropowa ekspandera, -,
η_{emE}	- sprawność elektromechaniczna ekspandera, -,
\dot{m}	- masowy strumień przepływu, kg/s,
p_2	- ciśnienie wylotowe, Pa,
p_1	- ciśnienie wlotowe, Pa.

Dla przemiany izentropowej równanie (3.2) może zostać zapisane w następującej postaci:

$$N_s = \left(\frac{\kappa}{\kappa-1} \right) \left(\frac{T_1 Z_a}{\eta_{iS} \eta_{emS}} \right) \dot{m} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)} - 1 \right], \quad (3.5)$$

gdzie:

N_s	- moc elektryczna wymagana do napędu sprężarki, W,
κ	- wykładnik izentropy, -,
Z_a	- średnia ściśliwość gazu, -,
T_1	- temperatura wlotowa, K,
η_{is}	- sprawność izentropowa sprężarki, -,
η_{emS}	- sprawność elektromechaniczna sprężarki, -,
\dot{m}	- masowy strumień przepływu, kg/s,
p_2	- ciśnienie wylotowe, Pa,
p_1	- ciśnienie wlotowe, Pa,

Dla przemiany politropowej równanie (3.2) przyjmuje z kolei postać:

$$N_s = \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(\frac{T_1 Z_a}{\eta_{pS} \eta_{emS}} \right) \dot{m} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad (3.6)$$

gdzie:

N_s	- moc elektryczna wymagana do napędu sprężarki, W,
n	- wykładnik politropy, -,
Z_a	- średnia ściśliwość gazu, -,
T_1	- temperatura wlotowa, K,
η_{pS}	- sprawność politropowa sprężarki, -,
η_{emS}	- sprawność elektromechaniczna sprężarki, -,
\dot{m}	- masowy strumień przepływu, kg/s,
p_2	- ciśnienie wylotowe, Pa,
p_1	- ciśnienie wlotowe, Pa.

Bardzo ważnym parametrem jest temperatura wylotowa ze sprężarki, szczególnie dla technologii adiabatycznego układu CAES, ze względu na konieczność zmagazynowania ciepła o konkretnym poziomie temperaturowym.

Temperaturę wylotową ze sprężarki, lub poszczególnych jej sekcji, można oszacować bazując na definicji sprawności izentropowej sprężarki oraz równaniu izentropy zapisanemu dla gazów doskonałych:

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_{iS}} \right], \quad (3.7)$$

gdzie:

T_2	- temperatura wylotowa ze sprężarki, K,
κ	- wykładnik izentropy, -,
T_1	- temperatura wlotowa, K,
η_{iS}	- sprawność izentropowa sprężarki, -,
p_2	- ciśnienie wylotowe, Pa,
p_1	- ciśnienie wlotowe, Pa.

Podobnie postępować można dla oszacowania temperatury wylotowej z ekspandera:

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 - \eta_{iE} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right\}, \quad (3.8)$$

gdzie:

T_2	- temperatura wylotowa z ekspandera, K,
κ	- wykładnik izentropy, -,
T_1	- temperatura wlotowa, K,
η_{iE}	- sprawność izentropowa ekspandera, -,
p_2	- ciśnienie wylotowe, Pa,
p_1	- ciśnienie wlotowe, Pa.

Jak wynika z równań (3.3) do (3.6) kluczowymi parametrami dla osiągniętych mocy, zarówno produkowanej w ekspanderze, jak również pobieranej przez sprężarkę, są ciśnienia i temperatury na wlocie i wylocie z każdej maszyny. Szczególnie istotne jest to z punktu widzenia kompletnego systemu, gdzie każdy z wyżej wymienionych parametrów będzie limitowany innymi czynnikami. Głównie będą to czynniki konstrukcyjne.

System magazynowania energii w sprężonym powietrzu zaliczany jest do grupy mechanicznych magazynów energii, gdzie tania, produkowane w okresie nadprodukcji względem potrzeb energia elektryczna pobierana jest przez sprężarkę, która spręża

powietrze przepompowując je do szczelnego zbiornika. W momencie zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną, kiedy osiąga ona na rynku wyższą cenę, powietrze podawane jest ze zbiornika do ekspandera, który zasilany sprężonym powietrzem napędza generator prądu elektrycznego.

Sprawność magazynu energii (ang. *Round-trip Efficiency*) w sprężonym powietrzu może zostać zapisana za pomocą ogólnego równania (3.9):

$$\eta_{\text{CAES}} = \frac{E_e}{E_s}, \quad (3.9)$$

gdzie:

- E_e - ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez ekspander w pełnym cyklu pracy, [kWh],
- E_s - ilość energii elektrycznej pobranej przez sprężarkę w pełnym cyklu pracy, [kWh].

Równanie (3.9) jest właściwe dla wszelkich adiabatycznych systemów magazynowania energii, w których jedyną energią doprowadzoną do systemu w pełnym cyklu ich pracy jest energia elektryczna podlegająca magazynowaniu.

Wielkości wyprodukowanej i pobranej energii elektrycznej w pełnym cyklu pracy systemu magazynowania energii wyznacza się zgodnie z zależnością:

$$E_s = \int_{\tau_b}^{\tau_a} (N_s) d\tau, \quad (3.10)$$

gdzie:

- τ_a - czas rozpoczęcia fazy ładowania magazynu, s,
- τ_b - czas zakończenia fazy ładowania magazynu, s,

oraz

$$E_e = \int_{\tau_c}^{\tau_d} (N_e) d\tau, \quad (3.11)$$

gdzie:

- τ_c - czas rozpoczęcia fazy rozładowywania magazynu, s,
- τ_d - czas zakończenia fazy rozładowywania magazynu, s.

3.2. Podział systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu

We wszystkich systemach magazynowania gazów, w tym powietrza, zachodzą istotne zmiany ciśnienia i temperatury, a wielkość tych zmian uzależniona jest od przyjętej zasady działania kompletnego systemu.

W przypadku **ciśnienia**, dla systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu, można wyróżnić dwa systemy:

- system izochoryczny,
- system izobaryczny.

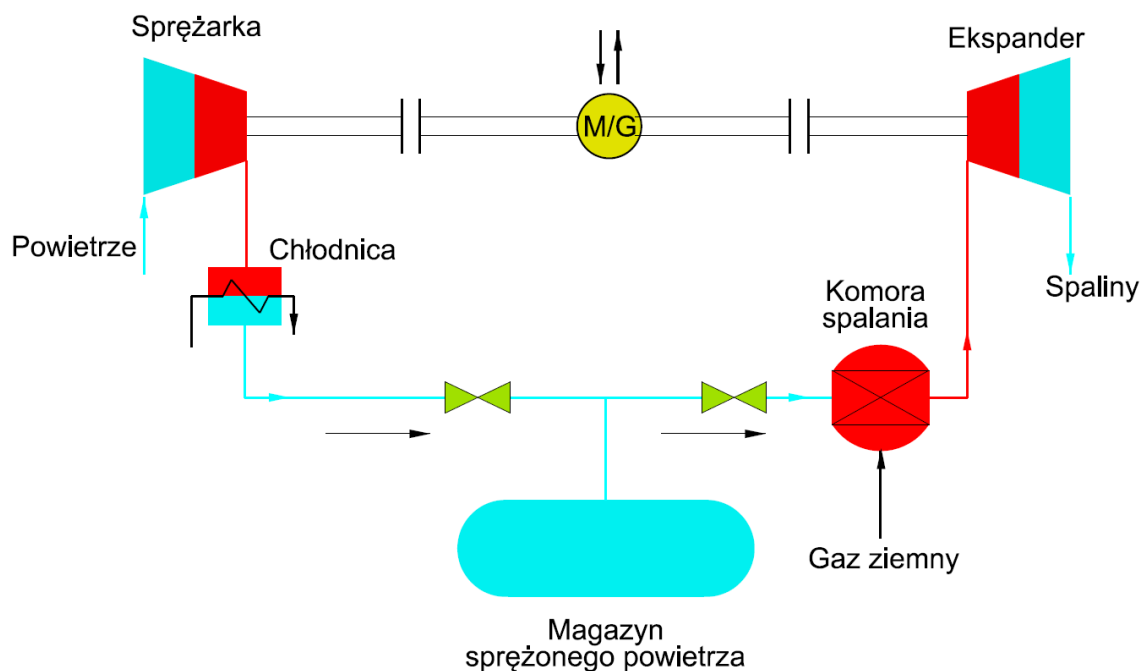
W systemie **izochorycznym** zachodzi znaczna zmiana ciśnienia gazu w stałej objętości gazu, przy czym, nie jest możliwe całkowite opróżnienie magazynu z uwagi na konieczność zapewnienia stabilności struktury, w której magazynowany jest gaz, w szczególności dotyczy to formacji skalnych i kawern solnych. Większość magazynów gazowych węglowodorów i wszystkie pracujące magazyny energii w sprężonym powietrzu pracują jako systemy izochoryczne.

Z kolei w systemie **izobarycznym** stałe ciśnienie gazu utrzymywane jest za pomocą tak zwanej kompensacji ciśnienia, co wymaga zmiany w miarę zmieniającej się w zasobniku ilości gazu jego geometrycznej, efektywnej objętości. Najczęściej w tym celu objętość przestrzeni zasobnika zmieniana jest na drodze doprowadzania lub wyprowadzania z niego wody, co dotyczy odpowiednio fazy rozładowywania oraz fazy ładowania. Alternatywnym sposobem, raczej przewidzianym dla izobarycznego magazynowania gazu w mniejszych ilościach, jest stosowanie zbiorników umożliwiających zmianę objętości geometrycznej poprzez zmianę umiejscowienia ścian zbiornika, stanowiących barierę dla magazynowanego gazu, np. poprzez stosowanie membran, miechów, tłoków. Przykładem rozwiązania konstrukcyjnego, przewidzianego dla systemów magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla, jest system zbiorników izobarycznych, który został wypracowany w kooperacji Politechniki Śląskiej oraz Energoprojektu-Katowice S.A., i który stanowi obecnie przedmiot procedowanego przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej [23]. Efektywność zastosowania tego rozwiązania była przedmiotem publikacji [24]. Magazynowanie z wykorzystaniem warstw wodonośnych, w przypadku długoterminowego składowania i/lub powolnych cykli ładowania oraz rozładowania

może być traktowane jako magazynowanie izobaryczne, natomiast dla krótkich cykli magazyn taki zachowuje się jak magazyn izochoryczny [25]. System wyposażony w izobaryczny zbiornik ciśnieniowy jest rozwiązaniem korzystnym, przede wszystkim z uwagi na stabilność ciśnienia, przy jakim pracują sprężarki i ekspandery, co pozwala im uzyskiwać parametry zapewniające najwyższą sprawność danej maszyny, jak również pozwala na uproszczenie rozwiązań projektowych w obrębie całego systemu. Z uwagi na sposób doprowadzenia oraz odprowadzenia ciepła w systemie magazynowania energii, w pełnym cyklu jego pracy, można wyróżnić trzy główne typy systemów CAES:

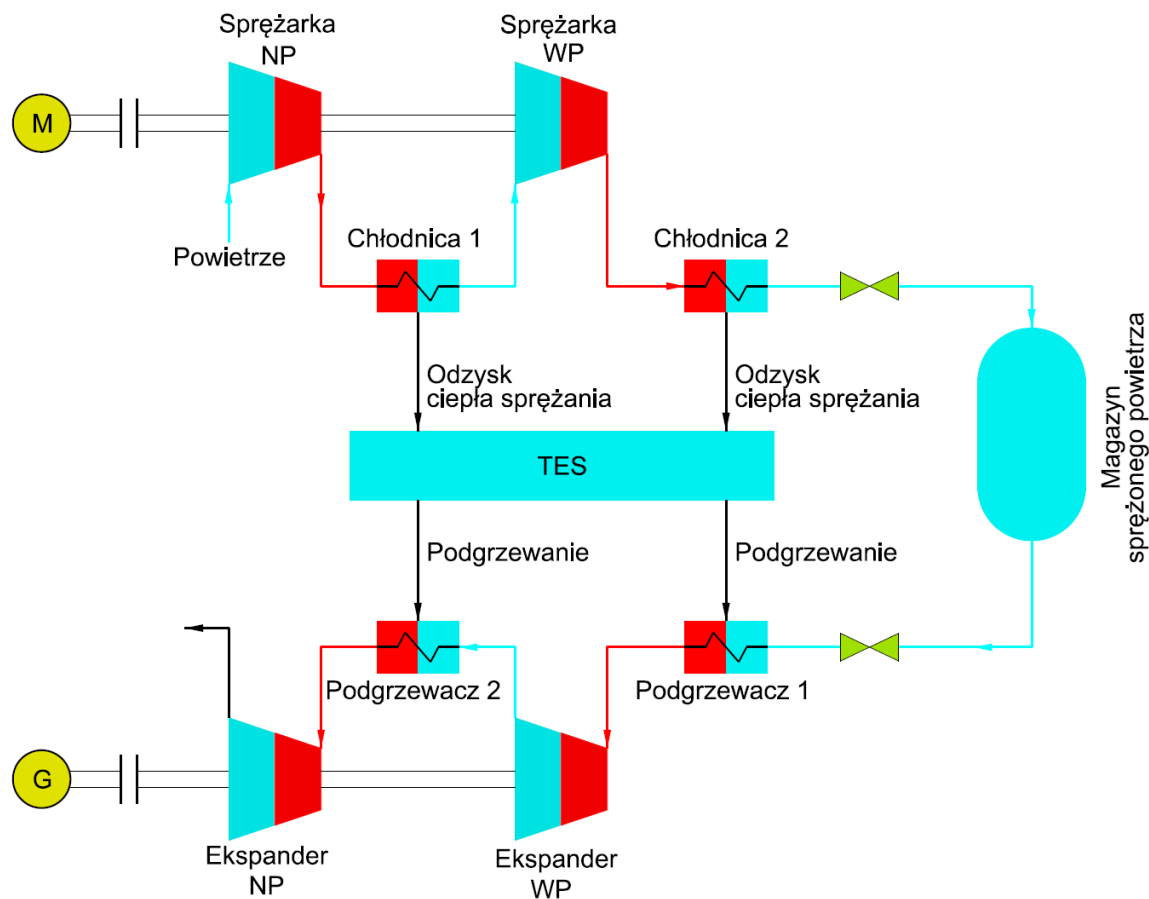
- system diabatyyczny (DCAES),
- system adiabatyyczny (ACAES lub AACAES),
- system „izotermiczny” (ICAES).

System diabatyyczny, zwany również konwencjonalnym systemem CAES polega na tym, że ciepło sprężania jest traktowane jako ciepło odpadowe i rozpraszane jest do otoczenia za pomocą różnego typu wymienników ciepła. Ubytek energii spowodowany takim podejściem musi zostać zrekompensowany na drodze wykorzystania ciepła z zewnętrznego źródła, którym jest paliwo gazowe. Ciepło doprowadzane jest do systemu na drodze realizacji procesu utlenienia paliwa gazowego w atmosferze wysokociśnieniowego powietrza. Realizowane jest to na etapie rozładowywania systemu magazynowania energii i odbywa się w komorze spalania zabudowanej przed ekspanderem. Schemat ideowy dla systemu diabatyycznego pokazano na rysunku 3.4. Na świecie pracują dwie komercyjne instalacje DCAES. Pierwszą z nich jest niemiecki system Huntorf, pracujący od 1987 roku [26] oraz system McIntosh w Stanach Zjednoczonych Ameryki, uruchomiony w 1991 roku. Sprawność w pełnym cyklu pracy systemu magazynowania energii w Huntorf to 42% (przed modernizacją przeprowadzoną w 2006 roku), a magazynu McIntosh to 54%. Różnica w wartościach na korzyść instalacji McIntosh spowodowana jest zastosowaniem tutaj rekuperatora, który umożliwia podgrzew powietrza przed jego wprowadzeniem do komory spalania na drodze wykorzystania ciepła spalin opuszczających ekspander. Dwa przytoczone systemy diabatyyczne szczegółowo omówiono w punktach 3.3.1 oraz 3.3.2.



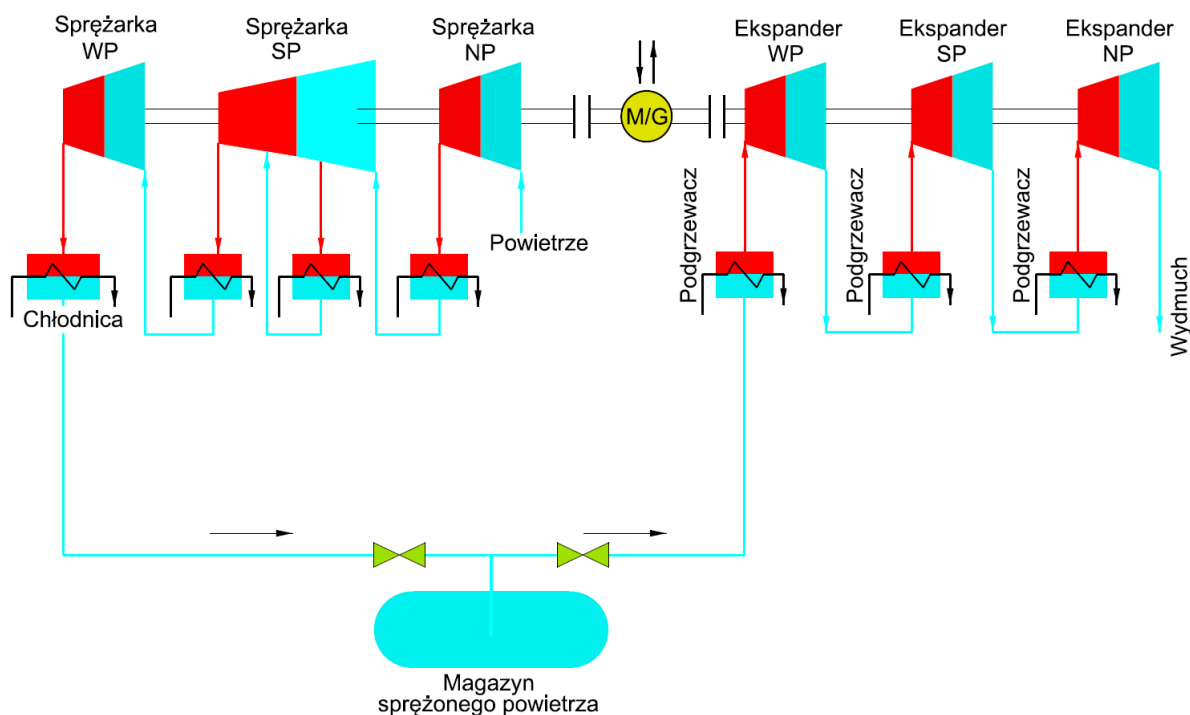
Rysunek 3.4 Schemat ideowy systemu DCAES

Systemy adiabatyczne (ACAES) oraz zaawansowane systemy adiabatyczne (AACAES) są nazywane systemami trzeciej generacji. Ciepło sprężania jest magazynowane w zasobnikach ciepła (TES), które następnie są używane do ponownego podgrzania sprężonego powietrza przed podaniem go do ekspandera. W odróżnieniu od systemów diabaticznych nie jest używane żadne paliwo do podgrzania sprężonego powietrza. Sprawność teoretyczna tych systemów, w zależności od skali oraz konfiguracji, wynosi od około 50% do ponad 75% [27], [28], [29], [30]. Kryzys paliwowy z lat 70tych XX-go wieku zaowocował pojawieniem się pierwszych publikacji dotyczących systemów adiabatycznych [31], które znalazły się w obszarach zainteresowania między innymi brytyjskiej agencji rządowej ds. produkcji, przesyłu i sprzedaży energii elektrycznej (CEGB). System adiabatyczny był rozpatrywany w 2008 roku przez niemiecką firmę RWE [32]. Jedyną zrealizowaną i pracującą (od 2019 roku) instalacją opierającą swą zasadę działania o system adiabatyczny, to projekt „Goderich A-CAES” z Ontario w Kanadzie [33]. Schemat ideowy systemu adiabatycznego wykorzystującego dwusekcyjną sprężarkę oraz dwusekcyjny ekspander z międzysekcyjnie zabudowanymi wymiennikami ciepła pokazano na rysunku 3.5.



Rysunek 3.5 Schemat ideowy systemu AACAES

System „izotermiczny”, a w zasadzie bliski izotermicznemu (ICAES), opiera się na maszynach wirnikowych podzielonych na znaczną ilość sekcji, pomiędzy którymi zabudowane są wymienniki ciepła, co pozwala na osiągnięcie niewielkich przyrostów temperatury powietrza odpowiednio w procesie sprężania oraz rozprężania. W przypadku sprężarek ciepło sprężania jest oddawane do otoczenia za każdą sekcją, a w przypadku ekspanderów ciepło jest dostarczane przed każdą sekcją. System magazynowania bliski izotermicznemu pracował w latach 2012 -2016 w Gaines w Teksasie w Stanach Zjednoczonych. W wielu publikacjach pojawia się sprawność tego systemu na poziomie ~75%.



Rysunek 3.6 Schemat ideowy systemu ICAES

Oprócz trzech podstawowych systemów pracowano w przeszłości nad innymi, dużo bardziej egzotycznymi systemami [34], [35], do których można zaliczyć:

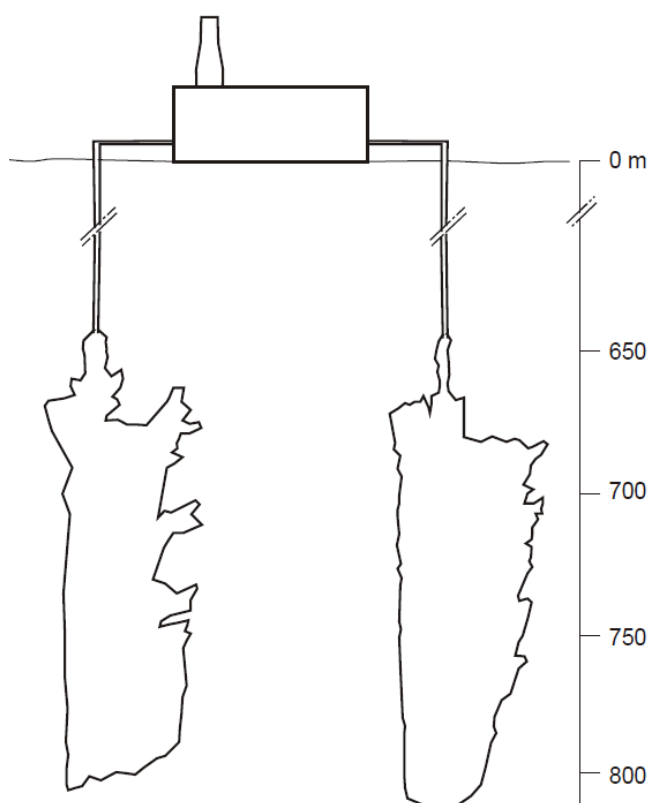
- CAES ze złożem fluidalnym, spalającym węgiel kamienny (CAES/FBC),
- CAES zintegrowany z instalacją zgazowania węgla w cyklach (CAES/CG),
- CAES zintegrowany z instalacją zgazowania węgla do pracy ciągłej (CAES/CCG),
- Koncepcją hybrydowa, która była przedmiotem zainteresowania na wczesnym etapie realizacji niniejszego doktoratu.

3.3. Przykładowe instalacje CAES

W niniejszym punkcie scharakteryzowano cztery systemy CAES, z których trzy obecnie pracują na świecie. Są to zarówno instalacje komercyjne, jak również demonstratory badawcze. W załączniku 1 zamieszczono również zestawienie projektów, jakie są lub miały być realizowane w obszarze przedmiotowej technologii.

3.3.1. Huntorf

Elektrownia Huntorf zlokalizowana jest w Dolnej Saksonii w Niemczech, około 30 km na północny-zachód od miejscowości Brema. Jest to pierwsza komercyjna instalacja CAES na świecie, która została uruchomiona w 1978 roku. Elektrownia ta została zaprojektowana z myślą zapewnienia energii elektrycznej niezbędnej do uruchomienia pobliskiej elektrowni jądrowej Unterweser (elektrownia wyłączona z eksploatacji w 2011 roku - Ostatnie pręty paliwowe zostały usunięte w lutym 2019 roku) na wypadek jej blackout'u. Jako struktury magazynowania zostały użyte dwie kawerny solne o łącznej objętości 310 000 m³. Kawerny rozciągają się na głębokości od około 650 m do około 850 m, gdzie w najszerszym miejscu osiągają średnicę około 60 m.



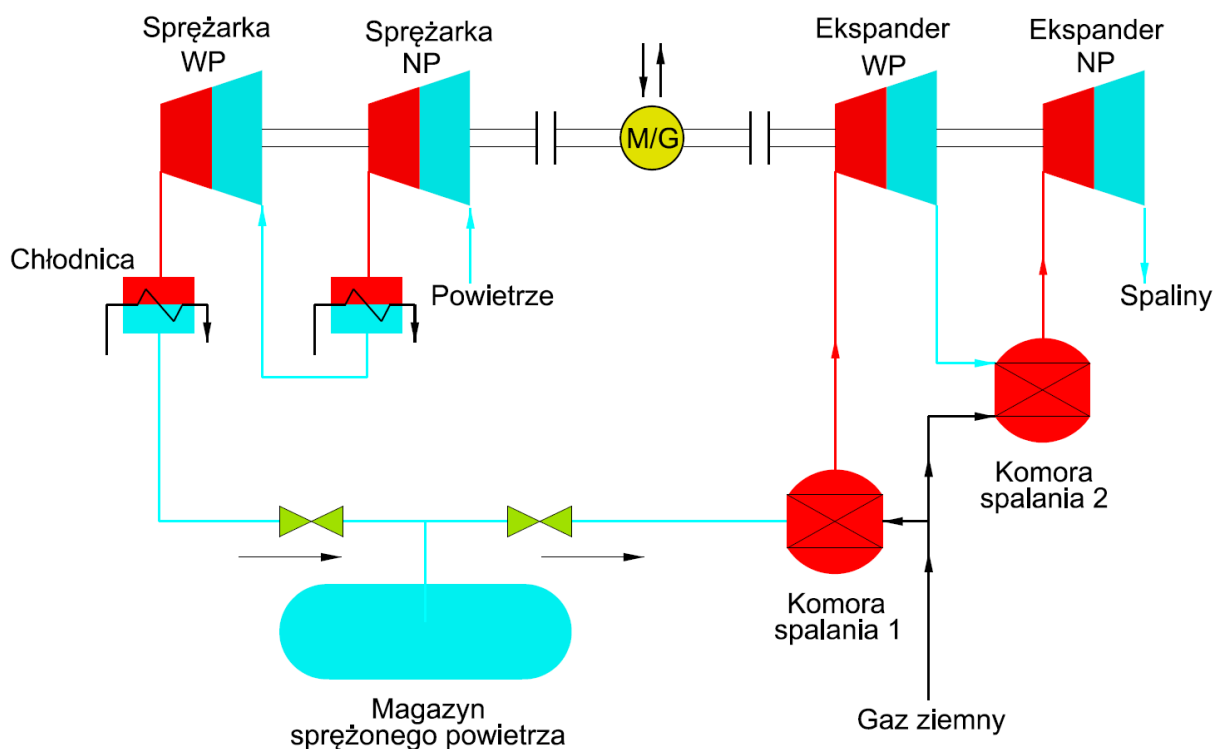
Rysunek 3.7 Kawerny solne elektrowni Huntorf [26].

Elektrownia w Huntorf została zaprojektowana jako elektrownia typu diabatycznego, gdzie zainstalowano zespół ekspandera gazowego o mocy 290 MW, a za sprężanie odpowiada zespół sprężarki o mocy 60 MW. Część turbinowa przeszła modernizację w 2006 roku i obecnie osiąga moc 321 MW. Charakterystyczne wartości ciśnień panujące w instalacji to:

- minimalne dopuszczalne 0,1 MPa,

- minimalne robocze (sporadycznie) 2,0 MPa,
- minimalne robocze (regularnie) 4,3 MPa,
- maksymalne robocze i dopuszczalne 7,2 MPa.

W roku 2018 operator elektrowni, firma Uniper, złożyła wniosek o wydanie zezwolenia na podniesienie maksymalnego ciśnienia dopuszczalnego, a tym samym na zwiększenie pojemności magazynu energii.

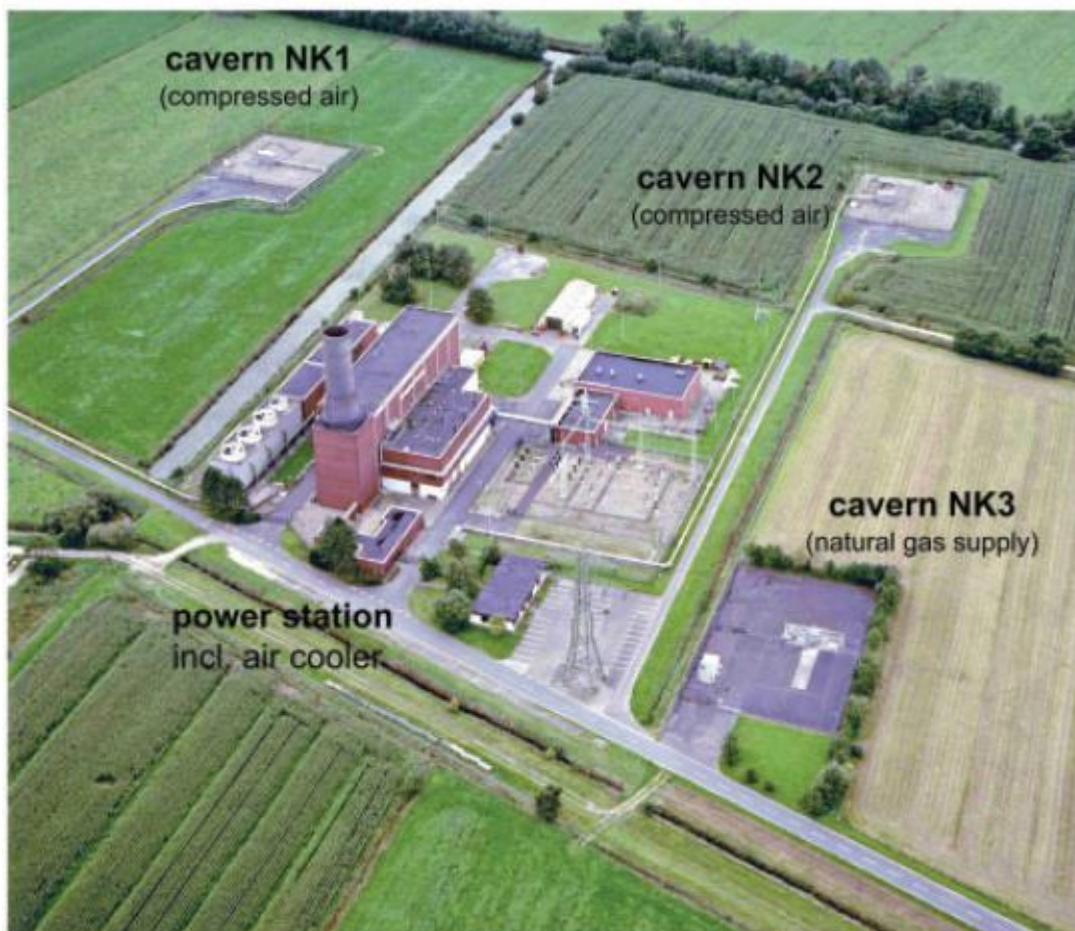


Rysunek 3.8 Schemat ideowy systemu DCAES Huntorf

Tabela 3.1 Parametry techniczne elektrowni Huntorf [10]

Parametr	Jednostka	Wartość	Uwagi
Rok budowy	rok	1978	
Typ instalacji	-	Diabatyczna	
Łączna moc elektryczna turbozespołu	MW	321	
Zakres regulacji mocy	MW	100 ÷ 321	
Strumień masowy powietrza przy rozładowywaniu	kg/s	455	
Ilość turbozespołów	szt.	1	

Parametr	Jednostka	Wartość	Uwagi
Moc pobierana do sprężania	MW	60	
Strumień masowy powietrza przy ładowaniu	kg/s	108	
Ilość sekcji sprężania	szt.	2	
Struktura magazynująca sprężone powietrze	-	Kawerny solne	
Pojemność magazynu sprężonego powietrza	m ³	310000	W dwóch kawernach solnych
Czas ładowania magazynu	h	~ 12	Przy pełnej mocy
Czas rozładowywania magazynu	h	~ 2	Elektrownia jest zdolna do dłuższej pracy (+10 h) przy mocno ograniczonej mocy [36]
Zakres ciśnień roboczych	MPa	4,6 ÷ 7,5	
Pojemność magazynowa	MWh	642	
Czas uruchomienia - warunki normalne	min	14	
Czas uruchomienia - w nagłych sytuacjach	min	8	
Sprawność	%	42	

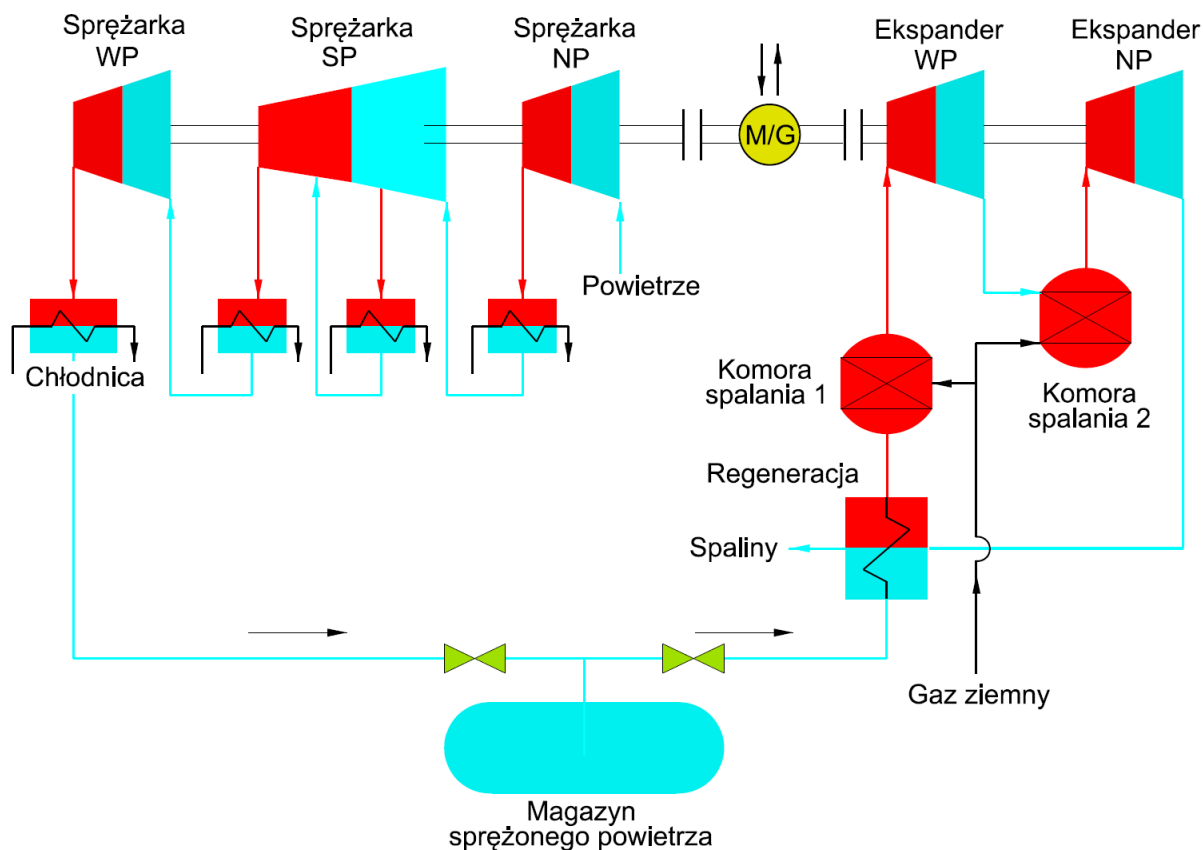


Rysunek 3.9 Widok na elektrownię Huntorf [37]

W kwietniu 2021 firmy EWE oraz Uniper podały do publicznej wiadomości plany huba wodorowego wykorzystującego infrastrukturę elektrowni Huntorf do produkcji energii elektrycznej [38].

3.3.2. McIntosh

W 1993 roku została oddana do użytku druga i jak na razie ostatnia wielkoskalowa instalacja CAES, która została zlokalizowana na terenie po nieczynnej kopalni soli w południowo zachodniej Alabamie. Budowa instalacji, łącznie z ługowaniem kawerny solnej, trwała około trzydziestu miesięcy. Podobnie jak Huntorf, instalacja ta opiera się o założenia systemu diabatycznego, z tą różnicą, że już na etapie projektu przed komorą spalania nr 1 został przewidziany do zabudowy rekuperator pozwalający na obniżenie zużycia paliwa, jakim może być gaz ziemny lub olej opałowy, o około 25% [36].



Rysunek 3.10 Schemat ideowy systemu DCAES McIntosh

Tabela 3.2 Parametry techniczne elektrowni McIntosh [10]

Parametr	Jednostka	Wartość	Uwagi
Rok budowy	rok	1991	
Typ instalacji	-	Diabatyczna	
Łączna moc elektryczna turbozespołu	MW	110	
Zakres regulacji mocy	MW	10 ÷ 100	
Strumień masowy powietrza przy rozładowywaniu	kg/s	154	
Ilość turbozespołów	szt.	1	
Moc pobierana do sprężania	MW	50	
Strumień masowy powietrza przy ładowaniu	kg/s	90	
Ilość sekcji sprężania	szt.	4	

Parametr	Jednostka	Wartość	Uwagi
Struktura magazynująca sprężone powietrze	-	Kawerna solna	
Pojemność magazynu sprężonego powietrza	m ³	538000	Jedna kawerna
Czas ładowania magazynu	h	~ 38	Przy pełnej mocy
Czas rozładowywania magazynu	h	~ 24	
Zakres ciśnień roboczych	MPa	4,6 ÷ 7,5	
Pojemność magazynowa	MWh	2640	
Czas uruchomienia - warunki normalne	min	12	
Czas uruchomienia - w nagłych sytuacjach	min	7	
Sprawność	%	54	

3.3.3. Hydrostor Goderich A-CAES

Instalacja Goderich A-CAES firmy Hydrostor [33], [39] to obecnie trzeci komercyjny i pracujący magazyn energii w sprężonym powietrzu, a jednocześnie jedyny system adiabatyczny.

Instalacja została oddana do ruchu w 2019 roku i osiągnęła pojemność magazynowania na poziomie >10 MWh, przy wcześniej planowanej i zakontraktowanej pojemności 7 MWh. Moc znamionowa zabudowanych sprężarek to 2,2 MW, a moc ekspanderów to 1,75 MW. Instalacja współpracuje z kawerną solną zlokalizowaną na głębokości 550m (brak informacji o zakresach ciśnień oraz wielkości kawerny).

Instalacja zlokalizowana jest w Goderich, w Ontario, w Kanadzie.

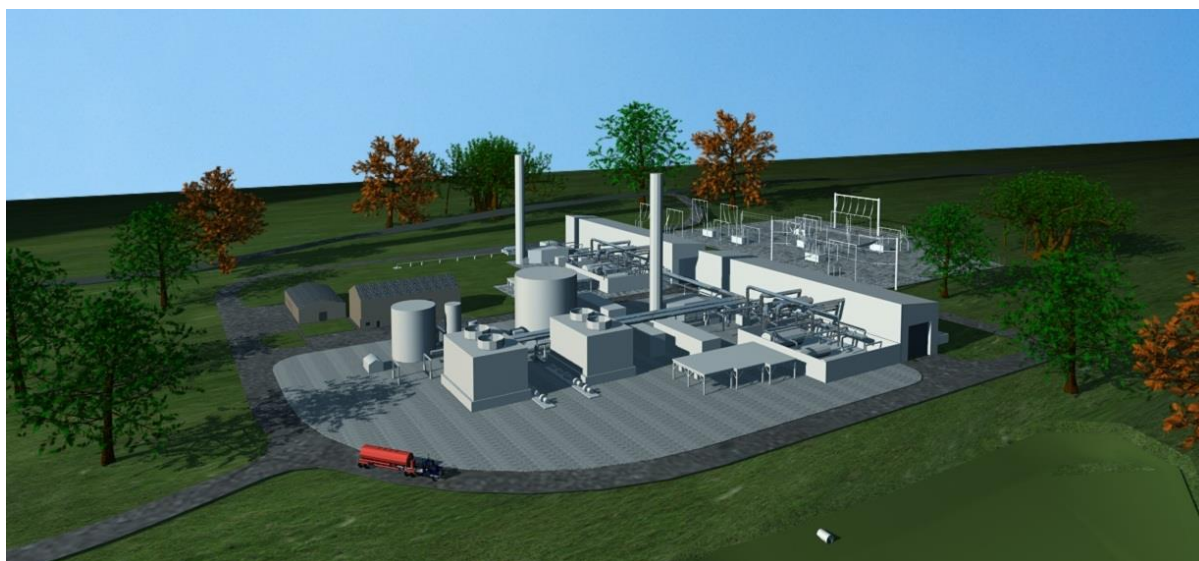


Rysunek 3.11 Instalacja Hydrostor Goderich A-CAES

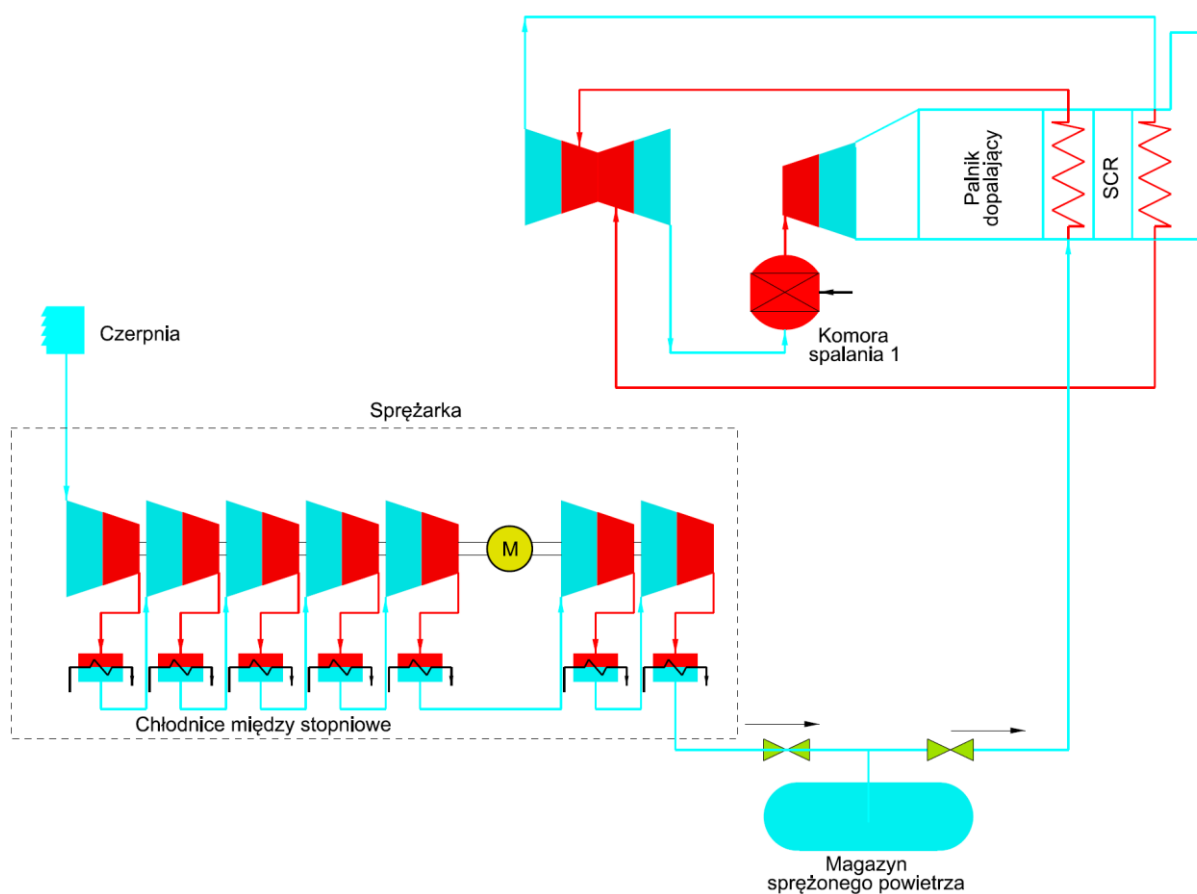
Warto zauważyć, iż w styczniu 2022r Goldman Sachs, jeden z największych banków inwestycyjnych na świecie, zainwestował 250 milionów USD w firmę Hydrostor [40], co jednoznacznie wskazuje na duży potencjał technologii ACAES.

3.3.4. Centrum Energetyczne Bethel

W 2013 roku firma APEX Compressed Air Energy Storage zapowiedziała budowę instalacji diabatycznej o mocy 324 MW [41] z możliwością dalszej rozbudowy do 487 MW, której ukończenie było pierwotnie planowane na rok 2020. Termin rozpoczęcia został przesunięty na czwarty kwartał 2021 roku z planowanym zakończeniem budowy i uruchomieniem zimą 2025 roku. Przewidywana pojemność magazynowa to około 16000 MWh, gdzie jako struktura magazynująca zostanie użyta kawerna solna, która wcześniej przez ponad 25 lat była wykorzystywana jako magazyn gazu ziemnego. Ciśnienie magazynowania sprężonego powietrza osiągać ma do 20 MPa, a czasy ładowania i rozładowania mają wynosić odpowiednio 10 do 16 godzin oraz 10 do 14 godzin [42].



Rysunek 3.12 Wizualizacja instalacji Bethel [41]



Rysunek 3.13 Schemat ideowy instalacji "Bethel" [43]

4. Możliwości budowy systemu CAES w Polsce

4.1. Struktury magazynujące sprężone powietrze

Najważniejszym elementem każdego systemu CAES, bez którego nie byłoby możliwe jego zbudowanie, jest odpowiedni magazyn sprężonego powietrza. Jak wspomniano w rozdziale 2, obecnie pracujące systemy wykorzystują kawerny solne, które są najtańszą strukturą magazynującą sprężone powietrze dla wielkoskalowych systemów CAES [44], przy czym, struktura magazynująca jest najdroższym elementem składowym całego systemu [45]. W niniejszym punkcie przybliżona zostanie tematyka struktur geologicznych używanych do magazynowania gazów.

4.1.1. Naziemne zbiorniki magazynowe

Naziemne zbiorniki magazynowe nie znajdują zastosowania w wielkoskalowych systemach CAES. Jednak dla systemów o pojemnościach magazynowych od 10 kWh do 10 MWh podziemne magazynowanie sprężonego powietrza nie jest odpowiednim sposobem [46] i dla takich systemów należy rozpatrywać zbiorniki ciśnieniowe o odpowiednich parametrach technicznych [47], [48].

Od 2012 roku zaczęły pojawiać się informacje na temat modułowego systemu ICAES [49], [50], za którym stała firma SustainX. Magazyn sprężonego powietrza miał być realizowany w oparciu o rury używane przy montażu rurociągów gazowych dużych średnic [51]. W raporcie przygotowanym dla Amerykańskiego Departamentu Energii [52] można znaleźć informacje, że dla komercyjnych instalacji opartych na projekcie SustainX przewiduje się wykorzystanie zbiorników cylindrycznych typu rurowego lub kawern skalnych, natomiast dla instalacji wielkoskalowych o długim czasie magazynowania, w celu ograniczenia kosztów, konieczne jest wykorzystanie kawern solnych. Finalnie firma SustainX porzuciła swój projekt właśnie z powodu wysokich kosztów zbiorników naziemnych, skupiając się na większych układach, które będą mogły współpracować z tanimi i możliwymi do wykorzystania kawernami solnymi [53].

Aktywną firmą w zakresie rozwoju mniejszych systemów CAES jest izraelska firma Augwind, która będzie realizować trzy magazyny energii - pierwszy o pojemności 120 MWh, a dwa kolejne o pojemności 20 MWh każdy [54], w których mają zostać wykorzystane baterie zbiorników magazynowych w oparciu o elastyczne zbiorniki polimerowe. Polimerowe zbiorniki mają posiadać stalową obudowę, która będzie

posadowiona około 3,5 m poniżej poziomu terenu i zalana betonem [55].



Rysunek 4.1 Polimerowy zbiornik firmy Augwind [55].

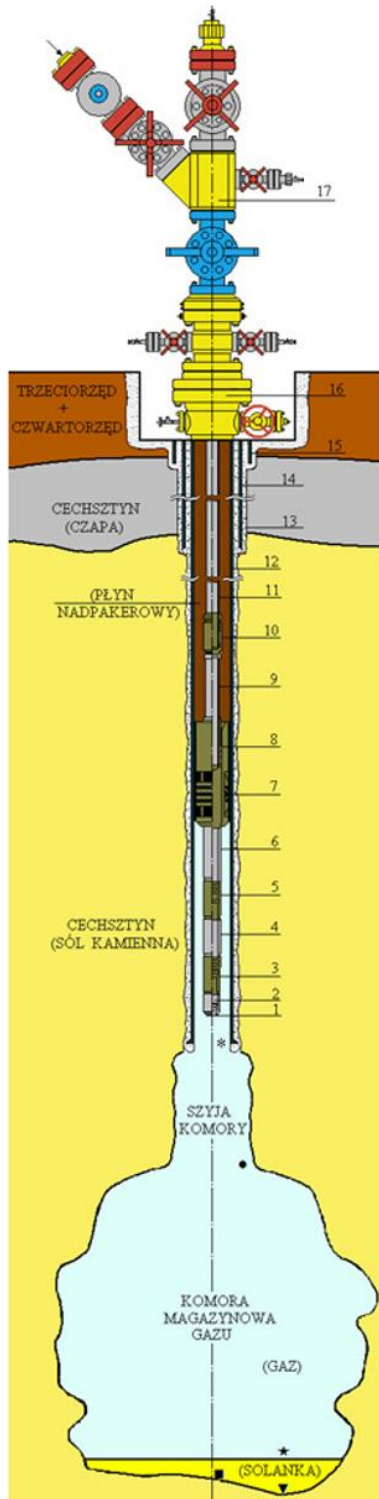
System magazynowania energii „Air Battery” proponowany przez firmę Augwind jest hybrydą systemu ICAES oraz systemu szczytowo-pompowego [56].

4.1.2. Kawerny solne

Stosowanie kawern solnych jest jednym z najlepiej rozpoznanych sposobów podziemnego magazynowania gazu ziemnego. Doświadczenia z tego obszaru zastosowań są wykorzystywane dla budowy magazynów sprężonego powietrza dla instalacji CAES. Sól kamienna (NaCl) posiada doskonałe właściwości fizyczne, w tym wysoka szczelność oraz zdolność do samoregeneracji uszkodzeń [57], które pozwalają na wykorzystanie jej złóż do budowy dużych, wysokociśnieniowych magazynów cieczy i gazów, w tym nawet tlenu oraz wodoru [58].

Budowa kawerny solnej polega na wykonaniu odwiertu, który po uzbrojeniu w Budowa kawerny solnej polega na wykonaniu odwiertu, który po uzbrojeniu w odpowiedni

osprzęt umożliwia prowadzenie kontrolowanego wstrzykiwania wody, która rozpuszcza strukturę solną. W ten sposób wykonano na świecie magazyny o objętościach od kilkudziesięciu tysięcy metrów sześciennych do ponad 1 000 000 m³. Rysunek 4.2 przedstawia schemat poglądowy kawerny solnej wraz z osprzętem umożliwiającym zatłaczanie i pobór gazu.



Rysunek 4.2 Przykładowa kawerna solna [59]

1 – but części podpakerowej, 2 – rura grubościenna, 3 – łącznik posadowy/wgłębny zawór bezpieczeństwa, 4 i 6 – rury grubościenne, 5 – łącznik posadowy, 7 – paker, 8 – zamek, 9 i 11 – rury wydobywcze, 10 – łącznik teleskopowy, 12 – kolumna rur eksploatacyjnych, 13 – kamień cementowy, 14 – kolumna rur przewodnikowa, 15 – kolumna rur wstępna, 16 – wieżba rurowa, 17 – głowica eksploatacyjna; * – but rur eksploatacyjnych, ● – strop komory, ■ – spąg komory w osi, ▼ – najniższy spąg komory, ☆ – lustro gaz-solanka.

Kawerny solne są wytwarzane na głębokościach mieszczących się w zakresie od około 300 do 2000 m od poziomu terenu. Docelowa geometria kawerny uzależniona jest od materiału skalnego otaczającego komorę, a w szczególności jego stabilności, na którą wpływ ma również ciśnienie panujące w kawernie oraz ilość i częstotliwość cykli. Kawerny solne są głównie wykorzystywane do sezonowego magazynowania gazu ziemnego, podczas którego występują cykle zmiany ciśnienia kilka razy do roku. Cykle są powolne i charakteryzują się niewielkimi zmianami ciśnienia, które mieści się na poziomie od 0,8 do 2,0 MPa/dzień [60]. Już na początku bieżącego wieku krajowy rynek gazu wymagał, aby kawerny były eksploatowane z większą niż dotychczas częstotliwością, gdzie opróżnienie następuje w 10 dni, a ponowne napełnienie w 30 dni lub nawet mniej [61]. Obecnie ta tendencja będzie się nasilać, z uwagi na problemy z zaopatrzeniem gazu z kierunku wschodniego. W przypadku systemów CAES cykle są znacznie częstsze i o wiele szybsze – spadek ciśnienia w kawernie może wynosić od 0,5 do 1,5 MPa/h, czyli ponad dwudziestokrotnie szybciej niż ma to miejsce w kawernach używanych jako magazyn gazu ziemnego. Tak gwałtowne zmiany ciśnienia generują równie gwałtowne i znaczące obciążenia termiczne i mechaniczne na ściany i strop kawerny [60]. W pracy [26], dotyczącej ponad dwudziestu lat pracy elektrowni Huntorf autorzy wskazują, iż bardzo ważnym aspektem jest uwzględnienie procesów termodynamicznych zachodzących w kawernach solnych w trakcie fazy ich ładowania i rozładowywania.

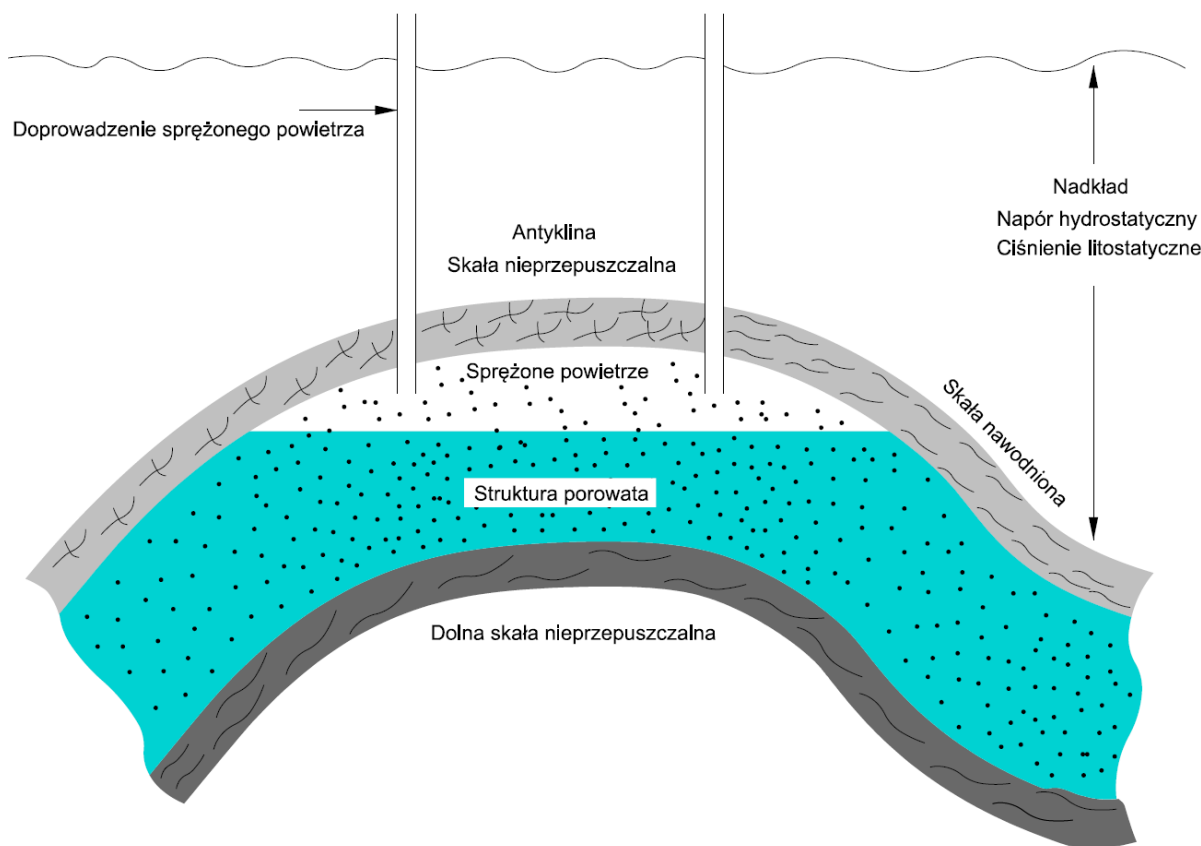
4.1.3. Struktury porowate, warstwy wodonośne i wyeksploatowane złoża węglowodorów

Porowate skały osadowe, takie jak piaskowce, zawierają mikroskopijne puste przestrzenie lub pory, w których może znajdować się woda, a w niektórych przypadkach płynne lub gazowe węglowodory. Jeśli pory te są ze sobą połączone, skała jest przepuszczalna, co pozwala na przepływ cieczy i gazów. Taka struktura jest interesującą pod względem magazynowania gazu, a tym samym możliwe jest wykorzystanie jej jako zbiornika sprężonego powietrza dla systemu CAES. Gaz do struktury porowatej wprowadzany jest za pomocą rurociągu, przechodzącego przez uszczelniony odwiert wykonany w skale macierzystej. Prędkość napełniania, a tym samym natężenie przepływu, ograniczona jest oporami przepływu jakie stawia matryca porów. Nawet w przypadku dobrej porowatości/przepuszczalności, aby zwiększyć

prędkość zatłaczania i pozyskania gaz z powrotem, zwykle konieczne jest wykonanie dodatkowych odwiertów. Porowatość i przepuszczalność mogą być również obecne w skałach węglanowych, które uległy rozpuszczeniu, lub w systemach szczelinowych w skałach o niskiej porowatości, w tym w skałach ilastych, często bogatych w złoża węglowodorów [62] oraz stanowiących warstwy wodonośne, które to posiadają duży potencjał dla systemów CAES.

Przygotowanie magazynu w warstwie wodonośnej wiąże się zazwyczaj ze sporymi problemami, wynikającymi przede wszystkim z ograniczonej ilości danych geologicznych, które możliwe są do pozyskania na drodze testów, badań sejsmicznych o wysokiej rozdzielczości i analiz dla danego terenu, co generuje znaczne koszty. Jaskrawym przykładem może być projekt *Iowa Stored Energy Park*, gdzie przez ponad osiem lat prowadzono testy, które pokazały, że nie jest możliwa budowa systemu o planowanej mocy 270 MW z uwagi na zbyt niską przepuszczalność struktur geologicznych [63].

Rysunek 4.3 przedstawia ideę magazynu sprężonego powietrza zrealizowanego z wykorzystaniem warstwy wodonośnej, gdzie powietrze zostaje uwięzione w objętości ograniczonej przez szczelne skały nadkładowe od góry oraz przez lustro wody znajdujące się w wykorzystywanej warstwie wodonośnej.



Rysunek 4.3 Magazyn sprężonego powietrza w warstwie wodonośnej [64]

Wg danych za rok 2018 [65], wyeksploatowane złoża węglowodorów stanowią najliczniejszą grupę podziemnych magazynów gazu ziemnego, zarówno pod względem ilościowym 492 magazyny jak i pojemnościowym (381,6 miliarda m³ łącznie we wszystkich magazynach opierających się o struktury porowate). Do podstawowych zalet wyeksploatowanych złóż węglowodorów można zaliczyć dobrze rozpoznaną i udokumentowaną ogólnie pojętą geologią, co znacząco przyspiesza rozpoczęcie prac budowlanych i obniża koszty przygotowania magazynu. Kluczowymi cechami decydującymi o możliwości wykorzystania wyeksploatowanego złoża jest jego głębokość (zwykle od 500 do 2500 m pod poziomem terenu) oraz przede wszystkim jego porowatość i przepuszczalność. Kolejnym elementem mającym korzystny wpływ ekonomiczny to ewentualna możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury, takiej jak uzbrojone odwierty, rurociągi, fundamenty i inne podobne obiekty. O ile możliwe jest dostosowanie tej infrastruktury do wykorzystania w systemie CAES, o tyle w przypadku samego wyeksploatowanego złoża pojawiają się problemy związane z bezpieczeństwem eksploatacji [66], spowodowane resztkami węglowodorów znajdującymi się w wyeksploatowanym złożu, które przy kontakcie z powietrzem mogą

tworzyć mieszaniny wybuchowe. Przepuszczalność wewnątrz złoża jest na tyle niska, że nawet gdyby z jakiegoś powodu doprowadzić mieszaninę gazowo powietrzną do zapłonu, to płomień zgaśnie zanim dotrze do niego odpowiednia ilość powietrza. Według badań przeprowadzonych przez amerykański Instytut Badawczy Energii Elektrycznej (EPRI), dostawcę energii elektrycznej i gazu, firmę PG&E oraz Uniwersytet w Calgary, mieszanie się powietrza z gazem nie powinno stanowić zagrożenia w samym złożu, gdyż sprężone powietrze będzie wypychać zalegające węglowodory na zewnątrz pęcherza powietrza [67]. Problemem jest jednak ryzyko przedostania się mieszaniny wybuchowej poprzez uzbrojony otwór wiertniczy w stronę maszyn i urządzeń pracujących w systemie CAES.

4.1.4. Komory skalne

Komory skalne to wyrobiska wykonane specjalnie w skałach metodami górniczymi lub opuszczone/nieczynne wyrobiska pokopalniane. Komory skalne wykonane w litej skale są bardzo stabilne podobnie jak kawerny solne, jednak z uwagi na możliwe spękania nie są tak szczelne. W przypadku spękanych struktur możliwe jest wzmocnianie i uszczelnianie za pomocą różnych środków technicznych, na przykład poprzez wyłożenie na ścianach i stropie komory grubej warstwy żelbetu wraz z dodatkowym materiałem uszczelniającym. Rozwiązania takie proponowane są na potrzeby budowy podziemnych magazynów wodoru [68], gdzie jako warstwę uszczelniającą proponuje się stal. W przypadku wzmocnienia i/lub doszczelnienia komory mówimy o komorze skalnej wyłożonej, podczas gdy komory o ścianach z rodzimej skały nazywane są komorami skalnymi niewyłożonymi.

W komorach skalnych niewyłożonych szczelność uzyskiwana jest przez napór hydrostatyczny warstw wodonośnych znajdujących się nad komorą, jednak skutkuje to przedostawaniem się pewnych ilości wody do wnętrza magazynu, którą należy okresowo odpompowywać. W przypadku korzystnych struktur skalnych, przy jednoczesnym braku odpowiedniej warstwy wodonośnej, do budowy kawerny niewyłożonej, gwarantującej szczelność, stosowane są kurtyny wodne [69].

Ciśnienie, przy którym górotwór zaczyna się odkształcać, w większości przypadków analizowanych skał otaczających komory wyłożone, wynosiło powyżej 4,0 MPa [70]. Odkształcenie komory przybiera zarówno charakter sprężysty jak i plastyczny, ale

granica między nimi jest mała, przez co w większości przypadków dochodzi do trwałego uszkodzenia wykładziny, jak i samej komory skalnej. Z tego też powodu stosowane są bardzo wytrzymałe wyłożenia zdolne przenosić o wiele większe obciążenia. Jednak pojawiają się koncepcje budowy komór wyłożonych płaszczem stalowym, gdzie przy głębokości około 100 do 150 m planowane jest uzyskanie ciśnienia na poziomie 20 MPa [71].

Przykładem wykorzystania komory skalnej wyłożonej do magazynowania sprężonego powietrza jest pilotażowy projekt ALACAES [72], [73].

4.1.5. Nieczynne kopalnie

Wykorzystanie nieczynnych kopalń jako magazynów gazów jest możliwe w zależności od materiału górotworu w jakim były drożne tunele i ogólnej sytuacji geologicznej. Bardzo duży wpływ na przydatność wyrobisk jako magazynu ma technologia wydobywania, która zdeterminowana jest poprzez jak najekonomiczniejsze pozyskanie wydobywanych materiałów. Szczególnie niekorzystne są zakłady górnicze, gdzie wydobywanie odbywało się metodą na tzw. „zawał”, gdzie strop zawałany jest w miejsce wybranego urobku.

Przy rozpatrywaniu wykorzystania nieczynnej kopalni konieczne jest wykonanie szczegółowej analizy zagrożeń związanych z wcześniejszą aktywnością górniczą, takich jak na przykład wybuchy metanu, pożary podziemne węgla i inne [74]. Dodatkowo należy uwzględnić aktywność górniczą sąsiednich zakładów wydobywczych, w szczególności gdy przewidywane jest zastosowanie kompensacji wodnej. Jednak podobnie jak w przypadku komór skalnych możliwe jest stosowanie wykładzin na ścianach i stropie w celu zwiększenia wytrzymałości i szczelności korytarzy.

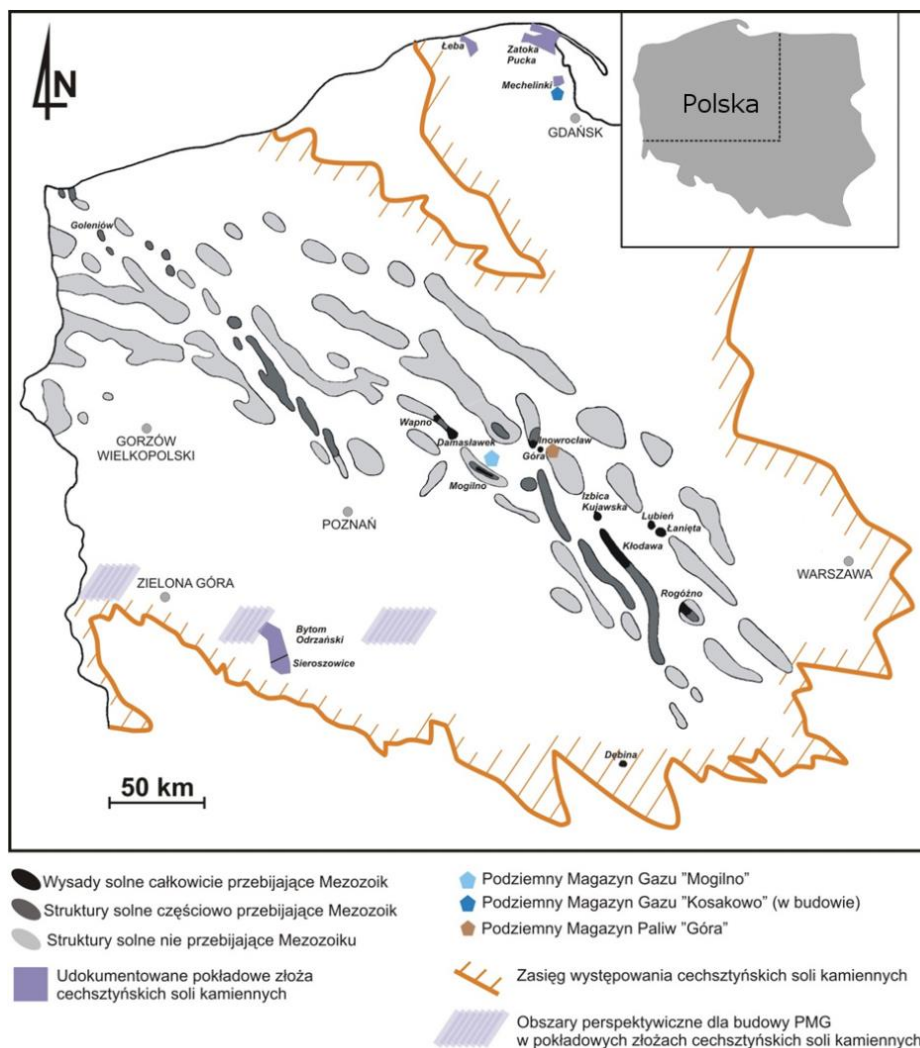
4.1.6. Dostępność struktur magazynowych na potrzeby budowy systemu CAES w Polsce - konkluzje

W literaturze można odnaleźć szereg artykułów, które wskazują regiony naszego kraju, posiadające odpowiednie struktury dla potrzeb magazynowania sprężonego powietrza w ramach systemów CAES [75], [76], [77]. Wnioski płynące z dostępnych, polskich i zagranicznych publikacji naukowych są proste: tam gdzie możliwe jest

magazynowanie gazu ziemnego lub wodoru, teoretycznie jest również możliwe magazynowanie sprężonego powietrza.

Zbiorniki naziemne z uwagi na wysokie koszty produkcji nie powinny być brane pod uwagę przy budowie systemów CAES o dużych mocach.

Kawerny solne są bardzo dobrą opcją budowy magazynu sprężonego powietrza. Na obszarze Niżu Polskiego do 2017 roku okonturowano 27 wysadów solnych, z czego jedynie 7 niezagospodarowanych wysadów uznano w świetle dotychczasowego rozpoznania geologicznego za spełniające kryterium odpowiedniej głębokości dla utworzenia kawerny (poziom 1000 m) [78]. Oprócz wysadów solnych możliwe jest również wykorzystanie złóż pokładowych soli do budowy magazynów podziemnych. Rysunek 4.4 pokazuje lokalizację wysadowych i pokładowych złóż soli kamiennej oraz perspektywicznych obszarów złożowych dla budowy magazynów podziemnych w Polsce. Należy jednak mieć na uwadze, że dotychczas kawerny solne wykorzystywano wyłącznie na potrzeby magazynowania gazu ziemnego oraz paliw ciekłych. W ramach projektu badawczego Hestor, którego liderem była Grupa Lotos SA, analizowane było wykorzystanie kawern solnych dla magazynowania wodoru. Projekt ten finansowany był ze źródeł Narodowego Centrum Badań i Rozwoju i realizowany był w latach 2015-2017 [79]. Obecnie tematyką wykorzystania kawern dla magazynowania wodoru interesuje się również Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA [80]. Biorąc dodatkowo pod uwagę zaangażowanie Państwowego Instytutu Geologicznego w badania nad możliwościami budowy podziemnych magazynów paliw i smarów, przy wykorzystaniu polskich złóż soli, na potrzeby baz wojskowych NATO [81] wydaje się być mało prawdopodobne wykorzystanie kawern solnych na potrzeby magazynów sprężonego powietrza. Rysunek 4.4 przedstawia mapę lokalizacyjną wysadowych i pokładowych złóż soli kamiennej oraz perspektywicznych obszarów złożowych dla budowy magazynów podziemnych w Polsce.



Rysunek 4.4 Mapa lokalizacyjna wysadowych i pokładowych złóż soli kamiennej oraz perspektywicznych obszarów złożowych dla budowy magazynów podziemnych w Polsce [59]

Z uwagi na specyfikę wyeksploatowanych złóż ropy i gazu są one najtańszą i najlepszą opcją do budowy podziemnych magazynów gazu ziemnego, posiadającą bezpośredni dostęp do odpowiedniej infrastruktury gazowej. Ich użycie jako magazynów sprężonego powietrza wiąże się ze sporym ryzykiem powstawania mieszanin wybuchowych [66], które w fazie rozładowywania będą kierowane do ekspandera, co po pierwsze skutkuje emisją węglowodorów do atmosfery, a po drugie grozi wybuchem w naziemnej części instalacji. Z tego też powodu struktury te nie powinny być brane pod uwagę jako magazyny sprężonego powietrza dla systemów CAES.

Ze zbioru opcji właściwych dla organizacji zbiorników ciśnieniowych dla potrzeb magazynowania sprężonego powietrza należy również wykluczyć komory skalne.

Wynika to głównie w uwagi na brak w kraju komór spełniających kryteria bezpieczeństwa eksploatacji.

Inaczej ma się sytuacja z nieczynnymi kopalniami, w szczególności kopalniami węgla kamiennego, których będzie przybywać w związku z postępującą dekarbonizacją energetyki i ogólnie pojętego przemysłu. Niemniej jednak agresja Rosji na Ukrainę może znów, przynajmniej częściowo, przywrócić węgiel do łask. Według danych Wyższego Urzędu Górniczego łączna ilość zakładów górniczych w Polsce wynosiła 36¹ [82], a wśród nich kopalni:

- węgla kamiennego – 20,
- węgla kamiennego w likwidacji – 8,
- węgla kamiennego w budowie – 1,
- rud miedzi – 3,
- rud cynku i ołowiu w likwidacji – 1,
- soli – 1,
- gipsu i anhydrytu – 1,
- solanki do celów leczniczych – 1.

Opcja wykorzystania nieczynnych zakładów górniczych jest bardzo atrakcyjna pomimo wszystkich wymienionych wcześniej wad i niebezpieczeństw, z uwagi na bardzo duże pojemności magazynowe. Tabela 4.1 zawiera pojemności poszczególnych wyrobisk dla jednej z kopalń znajdujących się na terenie Śląska.

Tabela 4.1 Pojemności wyrobisk w przykładowej kopalni węgla kamiennego [83]

Typ	Pojemność, m ³
Szyby	64 828,44
Poziom III (1050 m)	6 927,70
Połączenia poziomów III i II	26 805,60
Poziom II (850 m)	496 873,00
Połączenia poziomów II i I	153 442,10
Poziom I (650 m)	503 442,10
Łącznie	1 252 087,44

Przyjmując najbardziej niekorzystny przypadek, gdzie jedynym elementem

¹ Stan na 31.12.2021

infrastruktury możliwym do wykorzystania jest szyb kopalniany, pojemność magazynowa i tak jest znacząca, mogąc się tym samym stać podstawą dla budowy systemów o pojemnościach stawiających je w segmencie systemów magazynowania wielkoskalowego. Rysunek 4.5 przedstawia mapę czynnych i zlikwidowanych szybów na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). Czynnych szybów kopalnianych wchodzących w skład kopalni węgla kamiennego jest około 140. Dodatkowo identyfikuje się ponad 30 szybów w ramach kopalni rud miedzi oraz soli kamiennej. Pojemność pojedynczego szybu mieści się w zakresie od 28,5 tys. m³ do ponad 80,0 tys. m³. Łączna pojemność wszystkich szybów wynosi około 4 mln m³, co teoretycznie, mogłoby stanowić podstawę dla organizacji systemów CAES o łącznej pojemności energetycznej w zakresie od około 10 GWh (przy założeniu zapotrzebowania na pojemność na poziomie 400 m³/MWh, jak dla systemów adiabatycznych) do 22 GWh (przy założeniu zapotrzebowania na pojemność na poziomie 180 m³/MWh, jak dla systemów diabatyycznych).



Rysunek 4.5 Mapa czynnych i zlikwidowanych szybów na terenie GZW [84]

Niestety sporo szybów zostało już zlikwidowanych poprzez ich zasypanie. Przykładem może być kopalnia „Morcinek”, która posiadała łącznie cztery szyby, w tym trzy o

średnicy 8 m każdy, i głębokościach 1130, 1142 oraz 1213 m, co dawało łączną pojemność około 175 tys. m³, co stanowi około połowy pojemności kawerny elektrowni Huntorf.

W latach 1995-2000 częściowo zrealizowano program budowy podziemnego magazynu gazu ziemnego z wykorzystaniem likwidowanej kopalni „Nowa Ruda”, pole „Słupiec”, który został wstrzymany po wycofaniu się inwestora. Jeden z wariantów projektu (nie wybrany do realizacji) zakładał budowę magazynu wysokociśnieniowego, pracującego w zakresie od 1,0 do 4,0 MPa i pojemności geometrycznej na poziomie 220 tys. m³ [85]. Finalnie wybrano wariant niskociśnieniowy, dla którego pojemność geometryczna wszystkich wyrobisk była szacowana w zakresie od 7,6 do 12,5 mln m³.

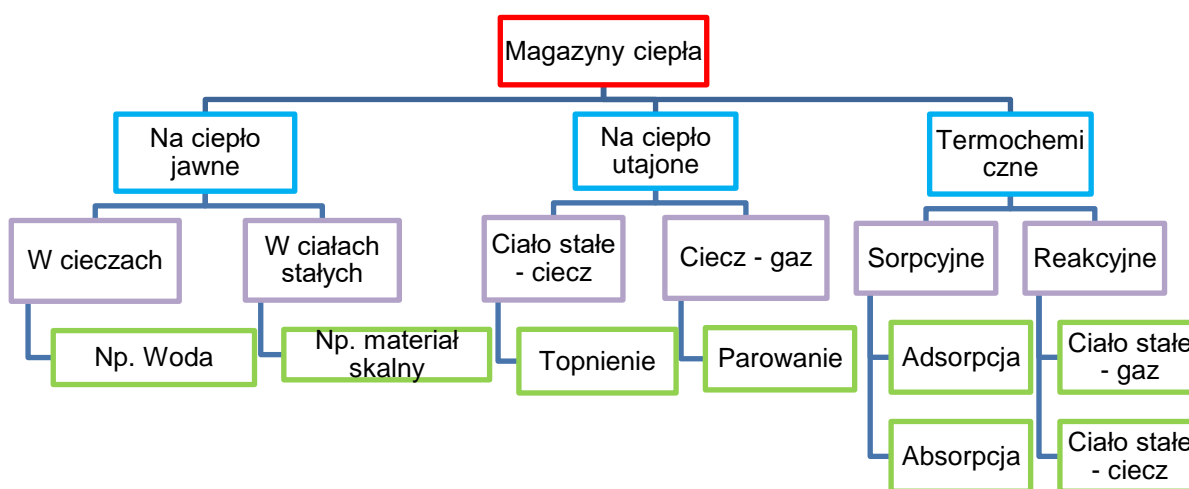
Tabela 4.2 przedstawia porównanie struktur magazynujących, gdzie kluczowym parametrem dla oceny poszczególnych struktur jest możliwość ich zastosowania w Polsce dla magazynowania powietrza dla potrzeb systemów CAES.

Tabela 4.2 Porównanie struktur magazynujących

Parametr	Naziemne zbiorniki magazynowe	Kawerny solne	Komory skalne	Nieczynne kopalnie	Struktury porowate i warstwy wodonośne
Szczelność	Wysoka	Wysoka	Średnia	Średnia	Wysoka
Wydajność masowa	Wysoka	Wysoka	Wysoka	Wysoka	Niska
Wykorzystanie w pracujących systemach	Nie	Tak	Nie	Nie	Nie
Koszt budowy magazynu	Wysokie	Średnie	Wysokie	Średnie	Niskie / Średnie
Niebezpieczeństwo eksploatacji	Niskie	Niskie	Średnie	Średnie / Wysokie	Średnie / Wysokie
Potencjalna dostępność w Polsce dla systemów CAES	Duża – tylko dla małych systemów	Niska / Brak	Brak	Wysoka	Niska / Brak

4.2. Magazynowanie ciepła

Wybór odpowiedniego miejsca dla magazynowania powietrza sprężonego jest kluczowy z punktu widzenia technicznej możliwości zabudowy, ale również ekonomiki pracy systemów CAES, niezależnie od wyboru technologii magazynowania. Dodatkowym wyzwaniem w przypadku technologii adiabatycznej jest zaprojektowanie oraz wybudowanie systemu magazynowania ciepła (TES). Ciepło w ramach takiego zasobnika może być magazynowane na wiele sposobów. Klasyfikację w tym zakresie zaprezentowano na rysunku 4.6.



Rysunek 4.6 Klasyfikacja magazynów ciepła

4.2.1. Magazyn ciepła jawnego

Magazyny ciepła opierające swoją zasadę działania na ciepłe jawnym są najstarszymi i najbardziej zaawansowanymi magazynami w kontekście rozwoju i wykorzystania tej technologii. W magazynach tego typu najczęściej wykorzystywane są ciecze i ciała stałe. Gazy nie znajdują zastosowania z uwagi na ich bardzo niską gęstość.

Spośród trzech wymienionych głównych typów magazynów ciepła, magazyny na ciepło jawne jako jedyne wykazują istotne cechy pozwalające na ich komercyjnie i wielkoskalowe wykorzystanie, w tym przy budowie adiabatycznych systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Pozwalają one na pełne dopasowanie do rozpatrywanej instalacji, przy uwzględnieniu wszystkich czynników konstrukcyjnych, jak i charakterystyk oraz parametrów technicznych urządzeń, a tym samym parametrów medium.

Magazyny ciepła jawnego można podzielić dodatkowo na dwie grupy, gdzie ciepło przekazywane jest:

- Pośrednio – w trakcie pracy magazynu ciepło jest przekazywane pomiędzy czynnikiem chłodzonym lub podgrzewanym, a materiałem akumulacyjnym na drodze wykorzystywania medium pośredniego, z wykorzystaniem wymiennika ciepła.
- Bezpośrednio – w trakcie pracy magazynu ciepło pomiędzy sprężonym powietrzem a materiałem akumulacyjnym wymieniane jest bezpośrednio, to znaczy bez udziału dedykowanego wymiennika ciepła oraz bez medium pośredniego.

Pośrednia wymiana ciepła znajduje przede wszystkim zastosowanie w magazynach, gdzie jako materiał akumulacyjny wykorzystywana jest ciecz, np. woda, albo olej termalny. Cieczowe magazyny ciepła w systemach CAES najczęściej przewidziane są jako układy dwu- lub trzy- zbiornikowe, gdzie ciepło magazynowane jest w formie nisko-, średnio- i wysokotemperaturowej. Przykładem systemu CAES z wykorzystaniem cieczowego zasobnika ciepła jest chińska instalacja pilotażowa TICC-500 [86], w której wykorzystano wodę jako nośnik ciepła i czynnik akumulacyjny.

Magazyny wykorzystujące bezpośrednią wymianę ciepła nie są tak często rozpatrywane w literaturze jak układy pośrednie [87], jednak posiadają wiele zalet, do których można zliczyć prostą zasadę działania, bardzo dużą powierzchnię wymiany ciepła, niskie starty ciepła oraz szerokie spektrum materiałów, które mogą zostać wykorzystane do wykonania złoża akumulacyjnego.

Właściwości termiczne, fizyczne oraz koszt pozyskania materiału do budowy złoża to podstawowe kryteria przy jego wyborze. W tabeli 4.3 przedstawiono zestawienie porównawcze wybranych materiałów, które mogą zostać użyte jako materiał złoża akumulacyjnego, mającego mieć zastosowanie w ramach zasobnika ciepła.

Istotnymi parametrami, które powinny być brane pod uwagę przy doborze materiału to [88]:

- masowa zdolność magazynowania (najkorzystniej duża pojemność cieplna lub wysokie ciepło reakcji),
- objętościowa zdolność magazynowania (najkorzystniej wysoka gęstość, przy

wysokiej masowej zdolności magazynowania),

- okres użytkowania, toksyczność, palność, wybuchowych, wymagania względem obsługi (najkorzystniej materiały trwałe na działanie warunków pracy, nietoksyczne, niepalne, niehigroskopijne),
- wpływ na tworzenie się ognisk korozji w odniesieniu do zbiornika, wymiennika ciepła i struktur wspomagających wymianę ciepła (np. uźebrowania) oraz koszt zabudowy zbiornika,
- zdolność do poddawania się cyklom ładowania i rozładowywania bez utraty wydajności i zdolności magazynowania przez wiele cykli (wysoka stabilność cykliczna i termiczna),
- koszty wymagane do zakupu materiałów,
- dostępność,
- możliwość wykorzystania w zasobnikach o prostej konstrukcji (najkorzystniej nie wymagające wykorzystania zbiorników o grubych ścianach, wytworzonych z drogich materiałów),
- dyfuzyjność cieplna i efektywność cieplna (najkorzystniej wysokie współczynniki przenikania ciepła),
- rozszerzalność termiczna (najkorzystniej niski wpływ na zmianę temperatury z uwagi na ryzyko pojawienia się naprężeń termo-mechanicznych).

Decyzyjnym kryterium przy doborze materiału akumulacyjnego powinny być:

- cena,
- koszt eksploatacji,
- koszt utylizacji po okresie eksploatacji.

Decydującymi czynnikami o wielkości magazynu jest masowa i objętościowa zdolność do magazynowania energii. Im wyższe objętościowe ciepło właściwe (ρc_p) tym objętość magazynu może być mniejsza.

Równanie (4.1) definiuje dyfuzyjność termiczną, a równanie (4.2) efektywność cieplną:

$$a = \lambda / (\rho \cdot c_p), \quad (4.1)$$

$$e = \sqrt{(\lambda \cdot \rho \cdot c_p)}, \quad (4.2)$$

gdzie:

- λ - przewodność cieplna materiału, W/(mK),
- ρ - gęstość materiału, kg/m³,
- c_p - pojemność cieplna właściwa materiału, kJ/(kgK).

Im wyższa jest dyfuzyjność termiczna materiału akumulacyjnego, tym większa jest podatność materiału do wyrównania temperatury podczas nagrzewania lub chłodzenia, a więc lepsza jest jego reakcja na zmiany temperatury w trakcie fazy ładowania i rozładowywania. Oznacza to, że stosując materiał złoża o wysokiej dyfuzyjności termicznej możliwe jest skrócenie czasu ładowania i rozładowywania magazynu ciepła. Wadą jednak wysokiej dyfuzyjności cieplnej jest możliwość szybkiego rozproszenia ciepła w objętości złoża akumulacyjnego przy częściowym stopniu naładowania magazynu, co ogranicza zdolność do podgrzewu czynnika odbierającego ciepło do wysokiej temperatury w fazie rozładowywania. Tabela 4.3 zawiera zestawienie podstawowych parametrów termicznych i fizycznych dla różnych materiałów wypełnienia złoża.

Tabela 4.3 Parametry termiczne i fizyczne materiałów wypełnienia złoża [89]

Materiał złoża	T , °C	ρ , kg/m ³	c_p , kJ/(kg·K)	λ , W/(m·K)	$a \cdot 10^6$, m ² /s	$e \cdot 10^{-3}$, J/(m ² ·Ks ^{1/2})
Aluminium 99,99%	20	2700	0,945	238,4	93,3	24,66
Miedź	20	8300	0,419	372	107	35,97
Stal	20	7850	0,465	59,3	16,3	14,7
Ołów	20	11340	0,131	35,25	23,6	7,24
Cegła	20	1800	0,84	0,5	0,33	0,87

Material złoża	T , °C	ρ , kg/m ³	c_p , kJ/(kg·K)	λ , W/(m·K)	$a \cdot 10^6$, m ² /s	$e \cdot 10^{-3}$, J/(m ² ·Ks ^{1/2})
Beton	20	2200	0,72	1,45	0,94	1,52
Granit	20	2750	0,89	2,9	1,18	2,67
Grafit	20	2200	0,61	155	120	14,41
Kamień wapienny	20	2500	0,74	2,2	1,19	2,02
Piaskowiec	20	2200	0,71	1,8	1,15	1,68
Żużel	20	2700	0,84	0,57	0,25	1,13
Chlorek sodu	20	2165	0,86	6,5	3,5	3,5
Glina	20	1450	0,88	1,28	1	1,28
Żwir	20	2040	1,84	0,59	0,16	1,49
Grys bazaltowy	20	2600	0,92	4,0	1,67	3,09

4.2.2. Magazyn ciepła utajonego

Metoda magazynowania za pomocą ciepła utajonego jest bardzo atrakcyjna, ponieważ pojemność cieplna związana z przemianą fazową wielu materiałów jest często większa niż pojemność magazynowania ciepła jawnego w danym zakresie temperatury magazynowania.

Wybór materiałów do przemiany fazowej zależy przede wszystkim od temperatury topnienia i wartości ciepła przemiany, ale równie ważne są kwestie stabilności materiału, zarodkowania (nukleacji) i nieodwracalności.

Do głównych wad tego typu magazynów należy zaliczyć:

- brak stabilności materiału magazynującego ciepło po wielu cyklach przemiany fazowej,
- słaba wymiana ciepła z uwagi na wysokie opory przepływu, tworzenie się pustych przestrzeni, przyleganie materiału do powierzchni wymiany ciepła.

- brak udokumentowanych komercyjnych, wielkoskalowych instalacji.

Ze względu na wymienione wady i potencjalnie wysokie koszty systemu, nie przewiduje się zastosowania systemów przemiany fazowej w jakichkolwiek dużych instalacjach TES na potrzeby adiabatycznych systemów CAES.

4.2.3. Termochemiczny magazyn ciepła

Magazynowanie energii w wiązaniach chemicznych jest procesem odwracalnym łączącym reakcję zużywania energii $-\Delta_R H$ (endotermiczną) i reakcję uwalniania energii $+\Delta_R H$ (egzotermiczną). Podczas magazynowania energii dostarczane jest ciepło, które powoduje rozpad związku chemicznego „A-B” na substraty „A” oraz „B”, które są fizycznie rozdzielane i magazynowane. Aby odzyskać zmagazynowaną energię, substraty „A” oraz „B” są ponownie łączone w reaktorze egzotermicznym, a ciepło reakcji jest odbierane do dalszego wykorzystania. Przykładem tego typu reakcji jest dehydratacja hydratów soli, np. wodorotlenku magnezu do tlenku magnezu, której towarzyszy wysoka temperatura, wynosząca od 250 do 300 °C.

Do głównych zalet systemów termochemicznych, w porównaniu z systemami magazynowania ciepła jawnego i utajonego, dla zastosowania w systemach ACAES można zaliczyć:

- wysoką gęstość magazynowanej energii,
- temperaturę magazynowania substratów reakcji bliską temperaturze otoczenia,

Podstawowymi wadami tego sposobu magazynowania energii są:

- wysoki stopień skomplikowania procesu technologicznego,
- wciąż brak komercyjnie dostępnych materiałów termochemicznych na rynku [90].

4.2.4. Dostępność TES na potrzeby budowy systemu CAES w Polsce - konkluzje

O ile w adiabatycznym systemie CAES magazynowanie ciepła nie występuje, o tyle dla zaawansowanego systemu adiabatycznego jest kluczowym elementem, który rozwiązuje problem występowania różnicy czasowej pomiędzy generacją ciepła w trakcie ładowania magazynu, a zapotrzebowaniem na nie w fazie rozładowywania. Przykładem na inny sposób obejścia tego problemu, bez udziału TES jest integracja

cieplna bloku energetycznego z systemem CAES [17], gdzie ciepło powstające w trakcie sprężania jest oddawane do obiegu wodno-parowego bloku, a zapotrzebowanie na ciepło dla ekspandera pokrywane jest na drodze poboru pary z upustu turbiny parowej.

Ze wszystkich rozważanych technologii magazynowania ciepła, najtańszą jest opcja magazynu na ciepło jawne z wykorzystaniem materiału skalnego z bezpośrednią wymianą ciepła [91]. Przykładem zastosowania takiego systemu TES w ramach systemu ACAES jest pilotażowy projekt ALACAES [92]. Podstawowym problemem w tym wypadku jest wysokie ciśnienie panujące za ostatnią sekcją sprężarki, które może wynosić nawet 8,0 MPa i o ile w przypadku projektu ALACAES poradzono sobie z tym problemem umieszczając zasobnik wewnątrz komory skalnej, o tyle w przypadku systemów CAES o dużych mocach może to być niemożliwe z uwagi na dostępność odpowiedniej struktury magazynującej sprężone powietrze. Przykładem zastosowania zasobnika jako konstrukcji naziemnej może być wstrzymany projekt ADELE-ING. Projekt ten zakładał wykorzystanie dla magazynowania sprężonego powietrza dwóch kawernach solnych. Ciepło miało być magazynowane w dwóch zasobnikach z wypełnieniem ceramicznym, co przy zakładanych parametrach (ciśnienie 7,0 MPa; temperatura 600 °C; pojemność cieplna do 2 GWh) skutkowało jego znacznymi wymiarami (średnica zewnętrzna ~24 m i wysokość ~50 m), gdzie ściany były zaprojektowane w technologii strunobetonu [93].

Znając podstawowe wyzwania związane z opracowaniem konstrukcji systemów magazynowania ciepła, których charakterystyka odpowiadałaby wymaganiom dużych, adiabatycznych systemów CAES, podjęto się opracowania koncepcji systemu TES, możliwie najbardziej korzystnej z punktu widzenia wykonalności technicznej oraz kosztów inwestycyjnych. Prace finalnie doprowadziły do opracowania koncepcji, która zakłada wykorzystanie poeksploatacyjnego szybu kopalnianego. Koncepcja stała się przedmiotem zgłoszenia patentowego - najpierw krajowego [15], a w dalszej kolejności europejskiego [16]. Koncepcja ta zakłada zabudowę w ramach objętości szybu hybrydowego magazynu na sprężone powietrze, z umieszczonym wewnątrz tego magazynu systemem TES. Rozwiązanie zostało szczegółowo opisane w rozdziale 5.

Opracowana koncepcja stała się przedmiotem badań prowadzonych przez szeroki zespół pracowników Politechniki Śląskiej, szczególnie w obszarze termodynamiki oraz

mechaniki płynów. W oparciu o założenia koncepcji, dla przeprowadzenia weryfikacji opracowywanych modeli numerycznych, w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej powstało stanowisko badawcze. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na bardzo dużą zbieżność z wynikami modelu numerycznego [94]. Równolegle powstaje stanowisko do badań przepływów sprężonego powietrza przy ciśnieniu do 35 MPa, które planuje się docelowo wyposażyć również w podobnej konstrukcji TES.

4.3. Maszyny przepływowe

W systemach CAES podstawowymi maszynami mającymi bardzo duży wpływ na sprawność pełnego cyklu są sprężarki oraz ekspandery, a ich dobór powinien być uzależniony od zasady działania systemu CAES, zarówno w ujęciu temperatury jak i ciśnienia. Szczególnie istotne jest to w przypadku sprężarek.

Sprężarki mające pracować w systemach ACAES powinny sprężać z wysoką sprawnością, w sposób jak najbardziej zbliżony do adiabaty odwracalnej. Wtedy procesowi sprężania towarzyszy niska energochłonność, a temperatura po procesie sprężania jest niższa, niż temperatura, jaka byłaby wynikiem procesu sprężania, któremu towarzyszy znaczny przyrost entropii. Najniższą energochłonnością odznacza się jednak proces sprężania izotermicznego. W systemach ICAES podejście do kwestii temperatury jest zbieżne z powszechnie stosowanymi rozwiązaniami w sprężarkach przemysłowych, gdzie maszyny są tak projektowane, aby minimalizować pracę jednostkową sprężania, stosując chłodzenie za każdym stopniem. Chłodzenie międzystopniowe jest kolejnym dodatkowym czynnikiem, obok strat tarcia i ewentualnych wycieków, który wpływa negatywnie na odwracalność procesu sprężania. Dodatkowo, sprężarki dla systemów ACAES powinny cechować się możliwie wysoką gęstością energii po stronie tłocznej. Możliwe jest to do osiągnięcia poprzez stosowanie możliwie wysokiego sprężu dla pojedynczego stopnia przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej sprawności izentropowej. Wymagania te są szczególnie trudne do spełnienia dla sprężarek osiowych, które są projektowane pod tak zwany punkt obliczeniowy. Wszystkie stopnie sprężarki osiowej zamontowane na tym samym wale są dopasowane aerodynamicznie, to znaczy, że przepływ na wlocie do każdego stopnia jest taki, że stopień pracuje w punkcie obliczeniowym i występuje to tylko dla jednej kombinacji prędkości obrotowej i przepływu [95]. Zmiany strumienia

przepływu przez maszynę mogą powodować jej dławienie lub wejście w zakres pompażu [96].

W systemach CAES o wiele lepszym wyborem są sprężarki odśrodkowe ze względu na ich uniwersalność, gdyż mogą osiągać duże wydajności przy zachowaniu wysokiego ciśnienia na wylocie, co ma niebagatelne znaczenie w systemach z izochorycznym magazynem sprężonego powietrza.

Ekspandery przewidywane do pracy w systemach CAES bardzo często oparte są na dostępnych na rynku konstrukcjach turbin gazowych oraz parowych. Ekspandery pracujące w Huntorf i McIntosh są przerobionymi turbinami parowymi z uwagi na zasilanie czynnikiem o wysokim ciśnieniu [97]. Wymagania wobec ekspanderów są najwyższe dla systemów ACAES, gdzie oprócz wysokiego ciśnienia po stronie dolotowej do ekspandera, należy się spodziewać również wysokich temperatur, jednak nie aż tak wysokich jak w turbinach gazowych, gdzie temperatury mogą sięgać poziomu nawet 1800 K [98].

Technologia maszyn przepływowych stosowanych we wszystkich gałęziach przemysłu nie będzie się znacząco różnić dla systemów CAES, a rozmowy prowadzone z producentami to potwierdzają, dlatego należy uznać, że maszyny te będą mogły dostarczać takie firmy jak:

- Siemens (Dresser-Rand),
- General Electric,
- Mitsubishi,
- Hitachi,
- MAN Turbo,
- Ingersoll Rand,
- Skoda,
- Rolls-Royce,
- Atlas Copco.

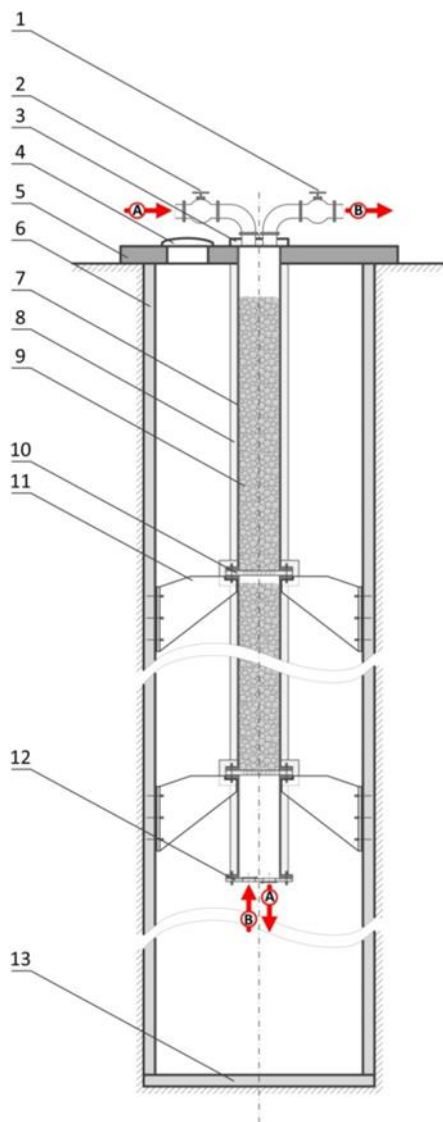
Jednak istnieje pewien prozaiczny problem. Doświadczenia Energoprojektu-Katowice S.A. (EPK) zebrane podczas realizacji projektów w ostatnich latach, w tematyce

sprężania i rozprężania gazów, od sprężonego powietrza, poprzez azot, wodór po bardzo złożone gazy procesowe, wskazują, iż wszędzie tam, gdzie wymagane jest zastosowanie maszyn spoza standardowego typoszeregu produkcji, nie jest możliwe pozyskanie danych i parametrów technicznych, umożliwiających rozpoczęcie prac projektowych. W oparciu o pozyskane informacje, stan ten spowodowany jest koniecznością zaangażowania przez producenta maszyny swoich zasobów, w tym wysoko wykwalifikowanej kadry inżynierskiej do analizy specyficznego, jednostkowego zagadnienia technicznego, przy jednoczesnym braku pewności możliwości pokrycia kosztów z tym związanych.

W przypadku systemów CAES należy spodziewać się, iż szczegółowe dane techniczne urządzeń będą udostępniane dopiero po zapewnieniu pokrycia kosztów producenta, wynikających z jego zaangażowania w dany projekt.

5. Koncepcja systemu ACAES z wykorzystaniem hybrydowego zbiornika

Podstawą opracowania niniejszej koncepcji są zgłoszenia patentowe, polskie [15] oraz europejskie [16], dotyczące podziemnego magazynu na sprężone powietrze zabudowanego w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym. Rysunek 5.1 ilustruje ideę wynalazku. Na etapie ładowania systemu CAES sprężone powietrze ze stacji sprężania kierowane jest przez zawór odcinający (2) do zasobnika ciepła (7), wyposażonego w izolację termiczną (8), w którym znajduje się złożo akumulacyjne (9). Po oddaniu ciepła do złoża akumulacyjnego, sprężone powietrze przepływa przez dennicę z klapami ciśnieniowymi (12) do magazynu sprężonego powietrza jakim może być szyb pokopalniany (6), ograniczony od dołu dnem (13), a od góry pokrywą (5). Wstępnie przewidziano, że pokrywa magazynu będzie posiadała właz rewizyjny (4), a zasobnik ciepła będzie przez nią przechodził, dzięki czemu, po zdjęciu jego pokrywy (3), będzie możliwy dostęp do złoża akumulacyjnego. Zasobnik będzie podparty za pomocą wsporników (11), na wysokości których, wewnątrz zasobnika, zostaną zlokalizowane dna sitowe (10), których zadaniem jest przenoszenie obciążeń od materiału akumulacyjnego na wsporniki. Na etapie rozładowywania przepływ powietrza odbywa się w przeciwną stronę. Chłodne, sprężone powietrze przepływa z wnętrza magazynu przez złożo akumulacyjne, odbierając zmagazynowane ciepło, aby po przejściu przez zawór odcinający (1) trafić do ekspandera.



Rysunek 5.1 Rysunek ideowy wynalazku polegającego na wykorzystaniu poeksploatacyjnego szybu kopalni jako magazynu sprężonego powietrza [15] [16].

Koncepcja podlegająca analizom w ramach niniejszej pracy zakłada budowę systemu ACAES składającego się z hybrydowego zasobnika sprężonego powietrza i ciepła, w dwóch konfiguracjach. Pierwsza konfiguracja przewiduje wykorzystanie jedynie objętości szybu pokopalnianego jako magazynu na sprężone powietrze (patrz rysunek 5.2), natomiast druga konfiguracja zakłada wykorzystanie tak zwanej kompensacji wodnej, która do prawidłowego działania wymaga wykorzystania korytarzy kopalni (patrz rysunek 5.3). Założono, iż system będzie zlokalizowany na terenie dawnego zakładu górniczego, co niesie za sobą spore korzyści związane z możliwością wykorzystania infrastruktury powierzchniowej takiej jak hale, estakady, place i drogi. Jednak jedną z najistotniejszych rzeczy jest przyłącze elektroenergetyczne dużej mocy, które umożliwi pobór dużej mocy w fazie sprężania, jak również produkcję

energii elektrycznej z dużą mocą w fazie rozprężania. Informację o mocach linii przesyłowych różnych zakładów górniczych można pozyskać analizując opisy awarii zamieszczone na stronach Wyższego Urzędu Górniczego. Przykładowo moc przyłączeniowa zakładu górniczego KWK „Zofiówka” wynosi około 95 MVA [99].

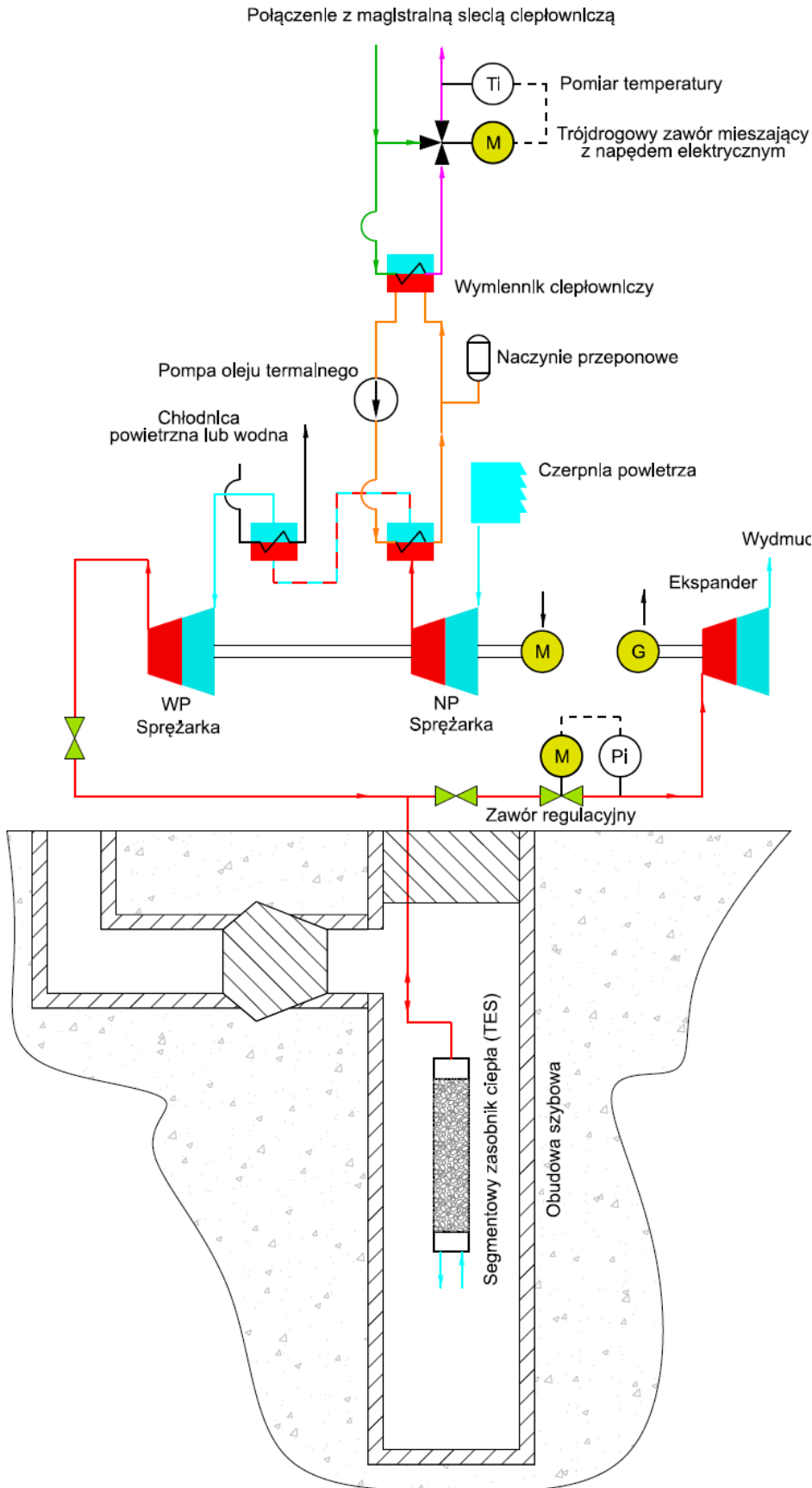
Niezależnie od przyjętej konfiguracji w systemie pracować będzie:

- sprężarka dwusekcyjna z chłodzeniem międzystopniowym,
- wymiennik ciepłowniczy,
- hybrydowy zasobnik sprężonego powietrza i ciepła,
- zawór regulacyjny,
- jednosekcyjny ekspandera sprężonego powietrza.

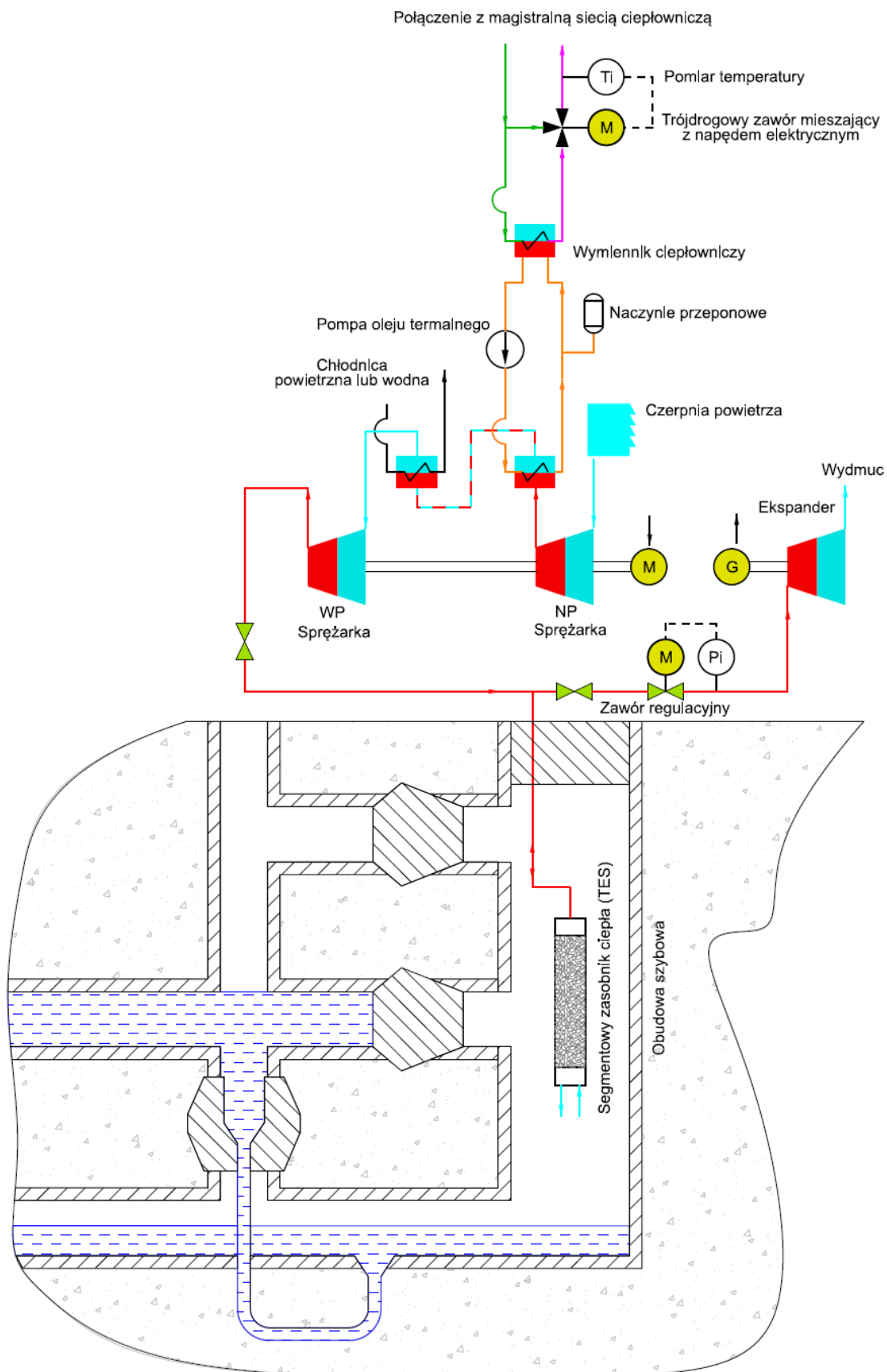
Powietrze będzie zasysane przez pierwszą sekcję sprężarki za pomocą czerpni powietrza, wyposażonej w maty filtracyjne i kierowane do wymiennika ciepłowniczego, którego zadaniem jest poprawa ekonomiczności procesu, poprzez przekazanie części wyprodukowanego ciepła do układu ciepłowniczego. Z uwagi na fakt, że na terenie zakładów górniczych lub w bezpośrednim ich sąsiedztwie funkcjonują lokalne ciepłownie o niewielkich mocach, założono przebieg magistralnej sieci ciepłowniczej w rejonie systemu CAES. W takiej sytuacji istnieje możliwość zabudowy wymiennika ciepła na rurociągu powrotnym magistrali ciepłowniczej i zastosowanie regulacji temperatury wyjściowej wody z wymiennika (za pośrednictwem trójdrogowego zaworu mieszającego). Układ regulacji ma za zadanie podnieść temperaturę powrotną przed głównym źródłem ciepła (np. przed kotłem wodnym), co obniży zapotrzebowanie na energię chemiczną paliwa w tym źródle, przy równoczesnym osiągnięciu założonej temperatury zasilania odbiorców ciepła. Dodatkowo przewiduje się, że temperatura do jakiej zostanie podgrzana woda powrotna umożliwi pracę głównego źródła ciepła co najmniej na poziomie minimum technicznego. Podobne rozwiązanie wykorzystania wymiennika ciepłowniczego było przedmiotem koncepcji odzysku ciepła na terenie kopalni „Bogdanka” [100]. Z uwagi na możliwość pojawienia się wysokiej temperatury sprężonego powietrza przed wymiennikiem ciepłowniczym, o wartościach powyżej 200 °C i stosunkowo niskiego ciśnienia w rurociągu powrotnym magistralnej sieci ciepłowniczej, które jest na poziomie 0,25 ÷ 0,3 MPa [101], nie jest technicznie zalecana bezpośrednia wymiana ciepła pomiędzy tymi dwoma obiegami. Spowodowane jest to ryzykiem odparowania wody w wymienniku. Podnoszenie

ciśnienia wody jedynie na potrzeby utrzymania stanu ciekłego w trakcie wymiany ciepła, nie dość, że jest nieekonomiczne, to dodatkowo wprowadza ryzyko wystąpienia poważnej awarii sprężarki. Ciśnienie wody musiałoby wynosić powyżej 2,0 MPa(g), co w przypadku rozszczelnienia wymiennika ciepłowniczego doprowadziłoby do przedostania się wody do części powietrznej wymiennika, z uwagi na panujące tam niższe ciśnienie. W zależności od wielkości nieszczelności do układu dostanie się para wodna albo woda. Z uwagi na zastosowanie dodatkowej chłodnicy w torze sprężonego powietrza, pewne jest, że pomimo układu odbioru kondensatu z chłodnicy, na sekcję wysokoprężną sprężarki przedostanie się wykroplony kondensat, co doprowadzić może do uszkodzenia wirnika, a w następstwie tego całej sekcji sprężarki. Dlatego też układ ciepłowniczy powinien zostać zrealizowany w oparciu o pośredni, niskociśnieniowy układ, w którym powinna zostać użyta ciecz o temperaturze wrzenia wyższej od temperatury sprężonego powietrza. Do tego celu mogą zostać wykorzystane na przykład oleje termalne, których temperatura wrzenia przy ciśnieniu otoczenia wynosi powyżej 300 °C [102].

W przypadku braku odbioru ciepła w wymienniku ciepłowniczym, przewiduje się jego rozpraszanie do atmosfery. Tu znów lokalizacja na terenie byłego zakładu górniczego daje sporo możliwości, gdyż często w ramach zakładów wydobywczych funkcjonują chłodnie kominowe lub chłodnie wentylatorowe.



Rysunek 5.2 Schemat ideowy koncepcyjnego systemu ACAES z izochorycznym zbiornikiem na sprężone powietrze.



Rysunek 5.3 Schemat ideowy koncepcyjnego systemu ACAES z izobarycznym zbiornikiem na sprężone powietrze.

Sprężone powietrze po schłodzeniu w chłodnicy międzysekcyjnej przepływa do drugiej sekcji sprężarki, gdzie następuje wzrost ciśnienia i kolejny wzrost temperatury. Podgrzane powietrze będzie kierowane do TES umieszczonego wewnątrz szybu kopalnianego, stanowiącego zbiornik magazynowy. Zespół TES i uszczelnionego szybu kopalnianego nazywany jest hybrydowym zasobnikiem sprężonego powietrza i ciepła.

Zasobnik hybrydowy ma szereg zalet. Szyb stanowi obudowę ciśnieniową dla samego magazynu sprężonego powietrza, jak również dla TES, co oznacza, że płaszcz systemu TES nie musi być elementem grubościennym. Różnica pomiędzy ciśnieniami działającymi na zewnętrzną stronę ścianki oraz wewnętrzną stronę ścianki płaszcza TES wynika jedynie z oporów przepływu sprężonego powietrza przez materiał akumulacyjny. Zaletą rozwiązania jest to, iż ciepło tracone przez materiał akumulacyjny, głównie na drodze przewodzenia przez zaizolowaną ściankę płaszcza, nie jest ciepłem bezpowrotnie traconym, jak ma to miejsce np. w przypadku zasobników naziemnych. W przypadku systemu zgodnego z opracowanym wynalazkiem ciepło takie w pierwszej kolejności trafi do powietrza zmagazynowanego w objętości szybu, a więc do medium, które w dużej ilości trafi na etapie rozładowywania, po pokonaniu drogi wiodącej przez materiał akumulacyjny, do ekspandera, gdzie wykona pracę. Jak wykazały badania numeryczne prowadzone w Politechnice Śląskiej [94], choć geometria szybu umożliwia zabudowę wyłącznie smukłych zasobników ciepła, to korzystne przy tym jest to, iż wraz ze wzrostem smukłości wzrasta sprawność egzergetyczna procesu magazynowania ciepła. Niekorzystne jest z kolei to, iż wzrost smukłości prowadzi równocześnie do zwiększania oporów przepływu.

Sprężone powietrze, po przepłynięciu i ochłodzeniu się na drodze przekazania ciepła materiałowi akumulacyjnemu, magazynowane jest wewnątrz szybu, po czym, już na etapie rozładowywania przepływa przez złożę w przeciwnym kierunku w celu ponownego podniesienia temperatury. Podgrzane powietrze następnie kierowane jest do ekspandera. Nim jednak tam trafi przepływa przez zawór regulacyjny, który odpowiedzialny jest za utrzymywanie stałego ciśnienia na wlocie do ekspandera, co gwarantuje jego pracę w punkcie projektowym lub w bliskim jego otoczeniu, niezależnie od poziomu w jakim zbiornik ciśnieniowy uległ opróżnieniu, co w przypadku zbiornika izochorycznego objawia się spadkiem ciśnienia powietrza. Koncepcja

zakłada wykorzystanie zaworu regulacyjnego również w przypadku konfiguracji systemu CAES z kompensacją wodną. Pozwoli to na lepsze dopasowanie warunków pracy systemu do wymagań ekspandera i dodatkowo będzie go zabezpieczać przed ewentualnymi niekontrolowanymi zmianami ciśnienia, na przykład będącymi wynikiem wystąpienia tak zwanego efektu „szampana” [103]. Dopasowanie o którym mowa wynika z faktu, iż chcąc utrzymać temperaturę wylotową z ekspandera na danym poziomie (na przykład nie dopuszczając do pracy przy temperaturach ujemnych na wylocie) możliwa jest praca tylko przy założonym stosunku ciśnień, co z kolei nie pozwoliłoby na zwiększanie pojemności magazynowej systemu poprzez zwiększenie ciśnienia ładowania.

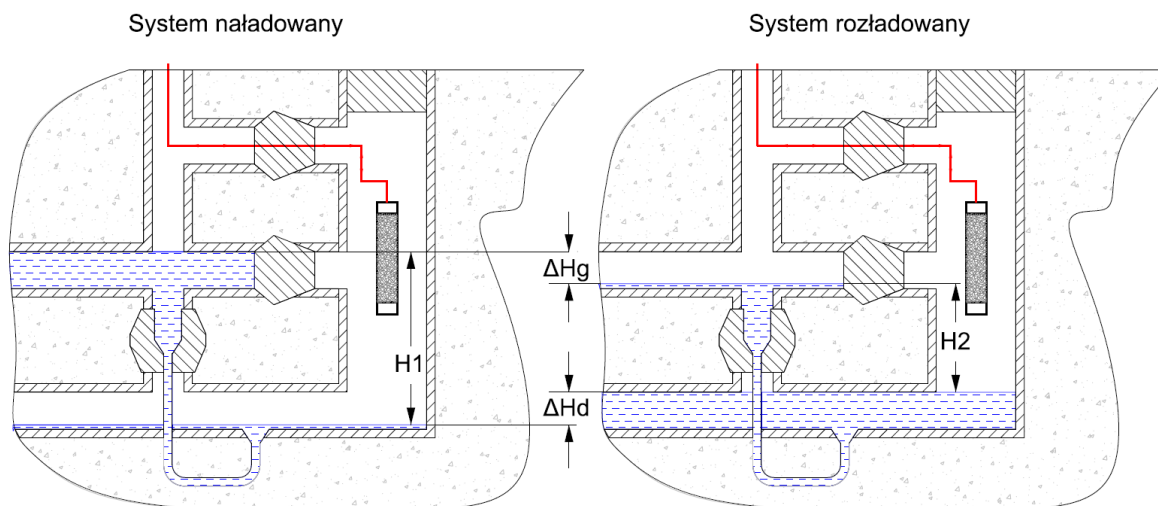
Rysunek 5.4 przedstawia dwa skrajne stany pracy systemu ACAES, w którym wykorzystana jest kompensacja wodna. Na rysunku zaznaczono charakterystyczne wysokości oraz różnice w wysokościach słupów wody, jakie są właściwe dla tych dwóch stanów. Aby kompensacja wodna była efektywna, różnica wysokości pomiędzy zwierciadłami wody w skrajnych położeniach, to znaczy przed rozpoczęciem ładowania i pod koniec ładowania systemu, powinna być możliwie jak najmniejsza, co wynika wprost z równania Bernoullego:

$$p_{m_max} = \rho \cdot g \cdot H1 + p_a, \quad (5.1)$$

$$p_{m_min} = \rho \cdot g \cdot H2 + p_a, \quad (5.2)$$

gdzie:

p_{m_max}	- maksymalne ciśnienie w magazynie, Pa,
p_{m_min}	- minimalne ciśnienie w magazynie, Pa,
p_a	- ciśnienie otoczenia, Pa,
$H1$	- maksymalna różnica wysokości pomiędzy zwierciadłami wody, m,
$H2$	- minimalna różnica wysokości pomiędzy zwierciadłami wody, m.



Rysunek 5.4 Różnica wysokości zwierciadeł wody w systemie ACAES z kompensacją wodną

Natura podziemnych wyrobisk kopalni umożliwia zastosowanie zilustrowanego rozwiązania, gdyż z racji ich rozległości wymiana masy wody pomiędzy oboma ośrodkami ciśnienia może odbywać się z zaangażowaniem stosunkowo dużych powierzchni. Jednak takie rozwiązanie będzie wiązać się ze znacznymi kosztami, związanymi z zapewnieniem szczelności korytarzy. Pojemności poszczególnych poziomów wyrobisk są bardzo duże, więc jest bardzo prawdopodobne odnalezienie stosownego układu geometrycznego. Tabela 4.1 przedstawia pojemności poszczególnych elementów infrastruktury podziemnej z podziałem na poziomy. Należy zwrócić uwagę, iż podane poziomy, to poziomy nominalne przy podszybiu, a układ poszczególnych korytarzy nie jest poziomy. Jest to istotne z uwagi na konieczność zapewnienia odpowiedniego naporu hydrostatycznego w systemie ACAES z kompensacją wodną.

Najpopularniejszym sposobem zabezpieczania wyrobisk chodnikowych są stalowe obudowy z łuków podatnych (obudowa ŁP) [104]. Wysokości mierzone w świetle obudów typu ŁP mieszczą się w zakresie od 3,1 m do około 5,6 m, w zależności od wielkości w danym typoszeregu [105], co w skrajnym przypadku, w trakcie przepływu z górnego zbiornika do dolnego, powoduje obniżenie lustra w pierwszym zbiorniku o około 5,6 m i podniesienie lustra wody w drugim zbiorniku o tę samą wysokość, co przełoży się na łączną różnicę ciśnienia około 0,11 MPa. Z uwagi na dużą ilość drobnych frakcji zanieczyszczeń nie zaleca się napełniania pełnego przekroju korytarza, tak aby w trakcie cykli pracy nie dochodziło do wypłukiwania tych

zanieczyszczeń ze stropu. Należy zatem przyjąć, że wykorzystane może zostać jedynie 75% przekroju każdego z korytarzy. W tym przypadku różnica ciśnień wynikająca ze zmiennego słupa wody wyniesie już tylko 0,08 MPa. Wydawać by się zatem mogło, że zastosowanie kompensacji wodnej, przy przyroście słupa wody w dolnym zbiorniku jedynie o około 5 m jest marnotrawstwem potencjału magazynowego kompletnego szybu, gdyż część kubatury nad lustrem wody byłaby martwą strefą, w której znajdzie się jedynie TES, a pozostała wysokość szybu nie byłaby wykorzystywana do magazynowania sprężonego powietrza. Rozwiązanie ma to jednak kilka istotnych zalet. Z uwagi na spodziewane niewielkie zmiany ciśnienia układ jest statyczny i nie występują tętniące obciążenia cykliczne, zarówno w szybie jak i w korytarzach. Dodatkowo niewypełnienie pełnego przekroju korytarzy i wykorzystanie większej ilości rur opadowych do połączenia zbiornika górnego z dolnym pozwoli na uniknięcie efektu „szampana” [103], który jest skutkiem przepływem dwufazowego czynnika w stronę zbiornika górnego, gdzie z uwagi na panujące coraz niższe ciśnienie dochodzi do separacji uprzednio rozpuszczonego przy wysokim ciśnieniu powietrza.

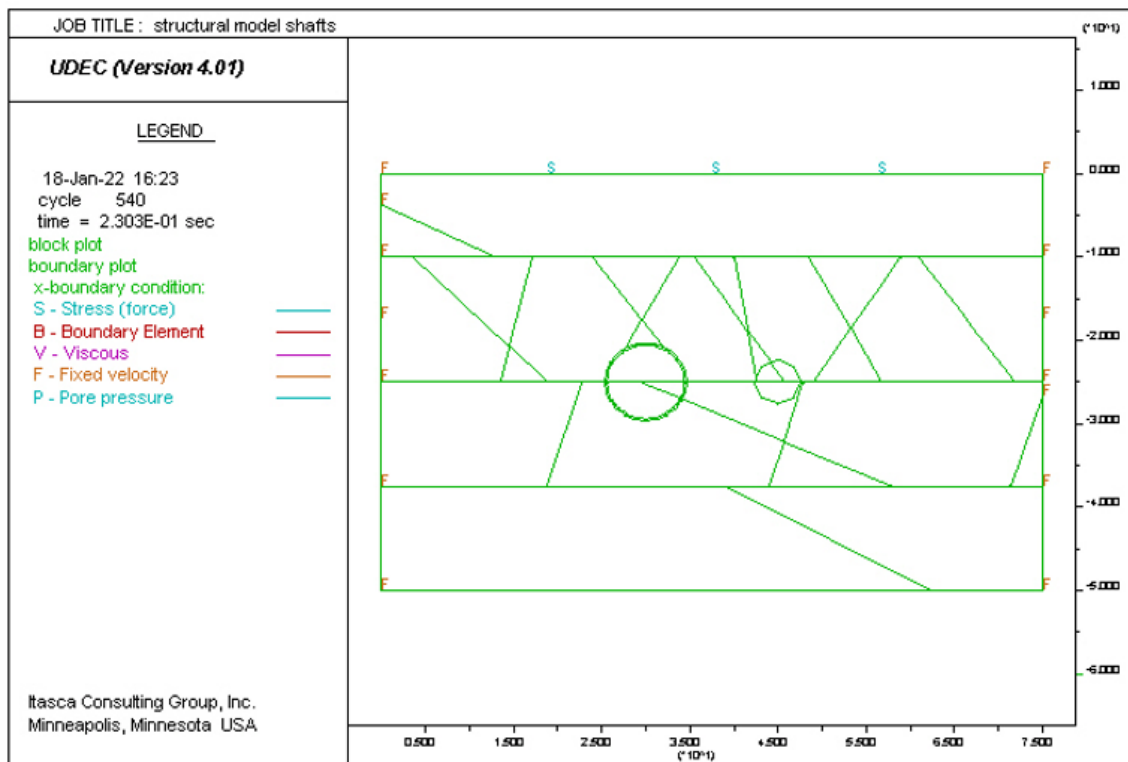
Niezależnie od konfiguracji systemu CAES konieczne jest „zakorkowanie” szybu i wykonanie gazoszczelnych tam (korków poziomych), co pozwoli na wydzielenie objętości magazynującej. W przypadku systemu z kompensacją wodną konieczne będzie również wykonanie wykładzin w korytarzach przewidzianych do zalewania wodą.

5.1. Wyzwania budowlane i konstrukcyjne

5.1.1. Magazyn sprężonego powietrza

Jako podstawową strukturę magazynującą sprężone powietrze przewiduje się szyb pokopalniany, którego możliwość wykorzystania w całości lub tylko częściowo determinuje docelową pojemność magazynową. Analiza stateczności wyrobiska szybowego jako podziemnego magazynu energii sprężonego powietrza i ciepła została wykonana w ramach prac Katedry Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców Politechniki Śląskiej w Gliwicach [106]. Do badań wykorzystano dwuwymiarowy program numeryczny Universal Distinct Element Code (UDEEC), który jest dedykowany do analiz geomechanicznych w nieciągłych, anizotropowych ośrodkach, takich jak masywy skalne, w których zazwyczaj wiercone są szyby górnicze.

Strukturalny model górotworu, pokazany na rysunku 5.5, jest przekrojem poprzecznym o wymiarach 75 na 50 m, gdzie w centralnej jego części zasymulowano istnienie dwóch szybów, większego o średnicy 9,5 m (w wylomie) oraz mniejszego o średnicy 5,24 m.



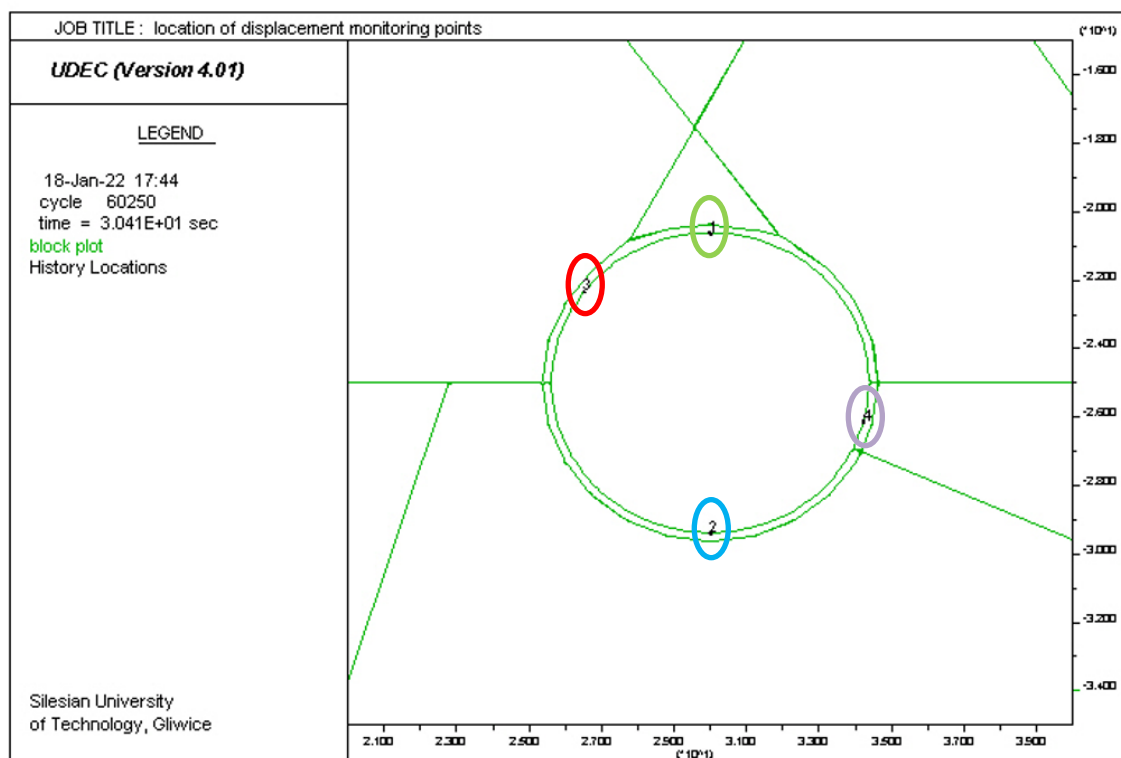
Rysunek 5.5 Strukturalny model górotworu w otoczeniu wyrobisk szybowych i warunki brzegowe

Obudowa wyrobiska szybowego przeznaczonego jako magazyn sprężonego powietrza została zamodelowana w postaci pierścienia wypełniającego szyb na całym jego obwodzie. Autor analizy przyjął następujące założenia:

- grubość pierścienia wynosi 0,45 m,
- obudowa wykonana jest z materiału o właściwościach szczelnego zbrojonego betonu, stosowanego powszechnie w budownictwie szybowym,
- zachowanie się pierścienia, jak i materiału skalnego masywu otaczającego szyb podlega prawu Hooke'a do osiągnięcia stanu wytrzymałości granicznej,
- granica wytrzymałości w złożonym stanie naprężenia definiowana jest za pomocą warunku wytrzymałościowego Coulomba (Coulomba-Mohra).

Rysunek 5.6 przedstawia miejsca monitorowania przemieszczeń, gdzie Autor, na potrzeby analizy, wprowadził odpowiednie „sensory”, które w celu łatwiejszej

identyfikacji wyników oznaczono kolorami, czerwonym, zielonym, niebieskim oraz fioletowym.



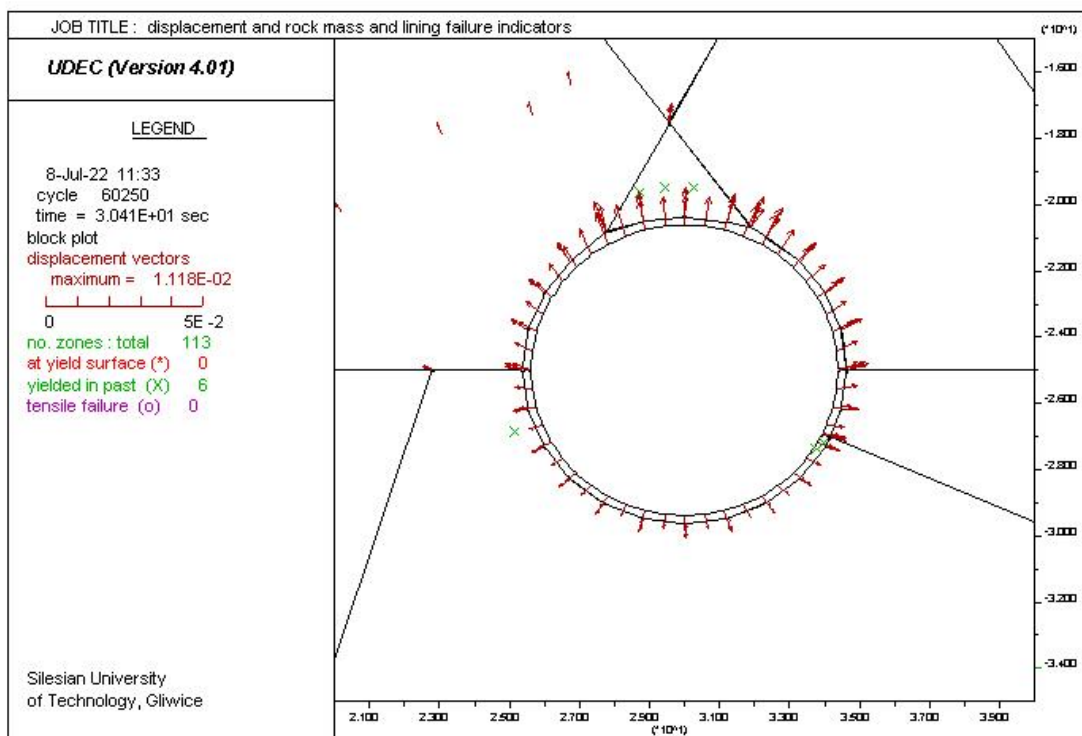
Rysunek 5.6 Miejsca monitorowania przemieszczenia punktów obudowy w trakcie symulacji cykli sprężania i rozprężania powietrza we wnętrzu szybu

Dodatkowo, w celu odwzorowania długiego okresu istnienia szybu jako wyrobiska górniczego i ustalenia się stanu naprężenia, przemieszczenia, odkształcenia i wyężenia, wykonana przez Autora została symulacja wydrążenia wyrobisk szybowych i doprowadzenie modelu do stanu równowagi.

Zasymulowany proces sprężania powietrza w wyrobisku zakłada stopniowy wzrost ciśnienia wewnątrz szybu o 0,1 MPa, a następnie doprowadzono model do stanu równowagi, co pozwala na odwzorowanie spodziewanego przebiegu rzeczywistego procesu sprężania i uniknięcie gwałtownego obciążenia obudowy wyrobiska i skał w jej sąsiedztwie.

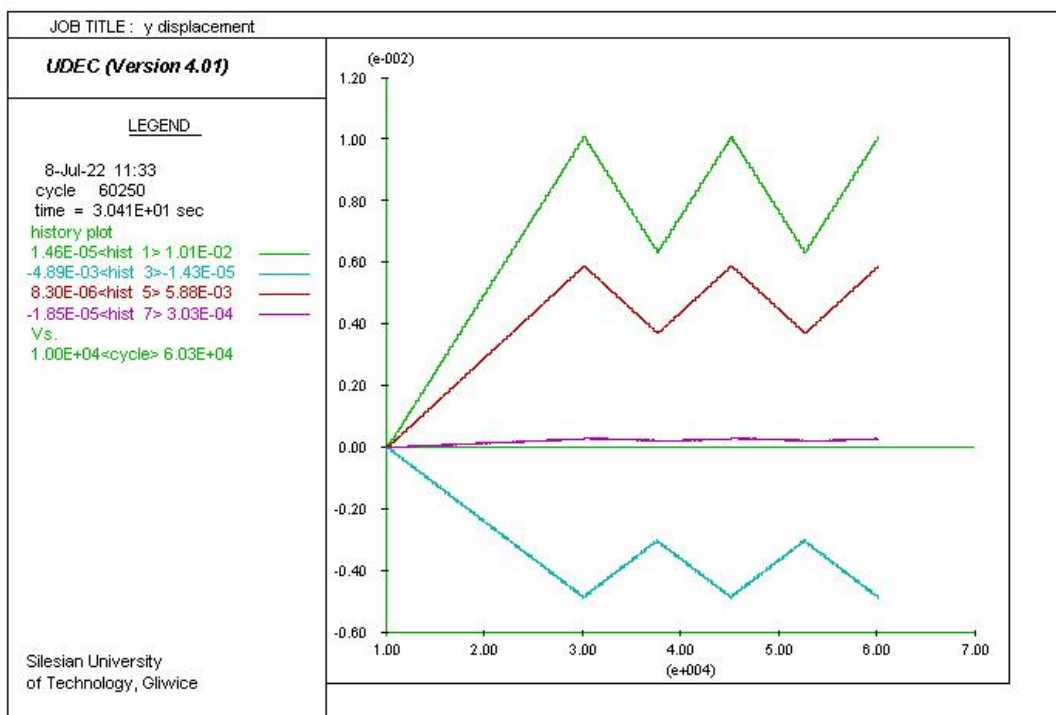
Pierwszą fazę sprężania prowadzono w 80 krokach od ciśnienia 0,1 MPa do 8,0 MPa, natomiast pierwszą fazę rozprężania już w 30 krokach do ciśnienia 5,0 MPa. Druga faza sprężania prowadzona już był od ciśnienia 5,0 MPa do 8,0 MPa, a rozprężanie przebiegło analogicznie do rozprężania pierwszego cyklu. W trzecim cyklu ponownie zwiększono ciśnienie od 5,0 MPa do 8,0 MPa.

Jak wskazuje Autor, cykle sprężania i rozprężania nie powodują pęknięcia obudowy, jak również materiału skalnego w jej sąsiedztwie czy to na skutek ścinania czy też rozciągania. Proces sprężania powietrza wywołuje odkształcenie obudowy i skał do niej przylegających. Rysunek 5.7 przedstawia wektory przemieszczeń oraz miejsca, gdzie doszło do osiągnięcia wytrzymałości granicznej na ścinanie pod koniec drugiej fazy sprężania powietrza. Przemieszczenie konturu obudowy nie jest równomierne, co wynika z założenia, że wyrobisko nie jest wydrążone w górotworze jednorodnym, ciągłym, izotropowym lecz w otoczeniu płaszczyzn ograniczonej spójności i bloków skalnych o różnej wielkości. Przy maksymalnej wartości ciśnienia, jaka została zadana, maksymalna wartość przemieszczenia wynosi około 0,1 m i występuje w północnej części obudowy wyrobiska, co najprawdopodobniej wynika z założonych spękań i utworzonego przez nie bloku skalnego dokładnie na północy od obudowy szybu.

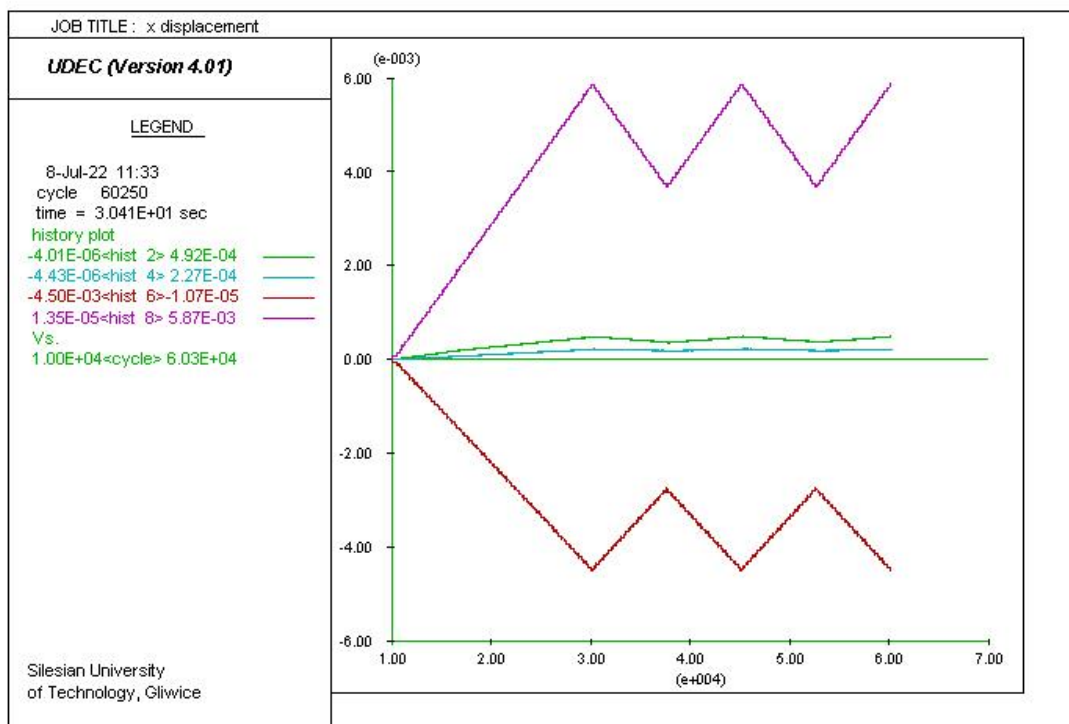


Rysunek 5.7 Wektory przemieszczeń oraz miejsca, gdzie doszło do osiągnięcia wytrzymałości granicznej na ścinanie na zakończenie drugiego cyklu sprężania powietrza

Rysunek 5.8 oraz rysunek 5.9 obrazują przemieszczenia sensorów obudowy szybu w trakcie trwania cykli. Odpowiednio w kierunku Y oraz X. Maksymalne wartości przemieszczenia rzędu kilkunastu milimetrów oznaczają, że względne wydłużenie przekroju szybu nie przekracza ani w kierunku X, ani Y 0,2 %.



Rysunek 5.8 Przemieszczenia sensorów obudowy szybu, w trakcie trwania cykli pracy, w kierunku Y.



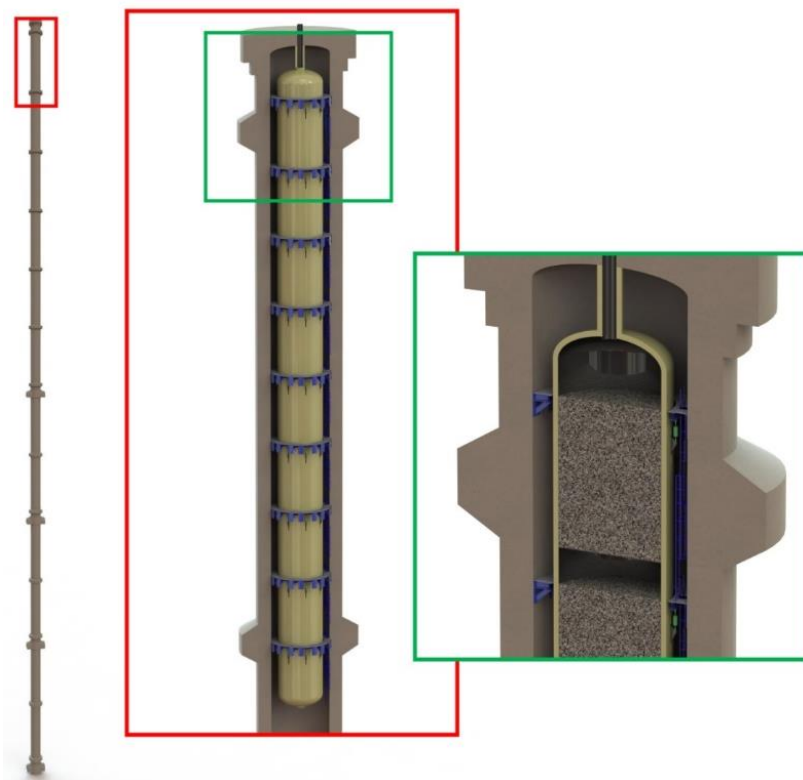
Rysunek 5.9 Przemieszczenia sensorów obudowy szybu, w trakcie trwania cykli pracy, w kierunku X

Autor analizy wskazuje, iż proces rozprężania wywołuje sprężyste odkształcenie obudowy, a ruch punktów następuje w kierunku wnętrza wyrobiska, które nie osiągają jednak swego położenia początkowego, ze względu na założoną minimalną wartość ciśnienia w magazynie sprężonego powietrza na poziomie 5,0 MPa (wobec 0,1 MPa na początku). Kolejne cykle sprężania i rozprężania skutkują takimi samymi zmianami położenia punktów obudowy, jakie zarejestrowano podczas pierwszego cyklu obciążania (sprężania) i rozprężania.

Wnioski wynikające z cytowanej analizy wskazuje wprost, że teoretycznie jest możliwe zastosowanie szybu pokopalnianego jako magazynu na sprężone powietrze. O możliwości adaptacji szybu dla celu budowy zbiornika ciśnieniowego decydować będą indywidualne cechy szybu oraz cechy górotworu, w którym szyp jest zabudowany. Prace związane z oceną szybu w kontekście jego potencjalnego wykorzystania w ramach inwestycji związanej z budową systemu ACEAS, powinny być wykonane w pierwszej kolejności, jeszcze w ramach etapu prac poprzedzających wykonanie projektu wstępnego.

5.1.2. Magazyn ciepła

Prace projektowe nad zasobnikiem ciepła rozpoczęto od opracowania wersji oznaczonej jako EPK_TES_1 (patrz rysunek 5.10), która zakładała budowę segmentowego TES, zawieszono wewnątrz szybu kopalnianego na zawiesiach stałosiłowych [107], w celu zapewnienie odpowiedniego zamocowania uwzględniającego wydłużenia termiczne zasobnika. Rozwiązanie to zostało porzucone z uwagi na bardzo duży koszt zawiesi stałosiłowych.

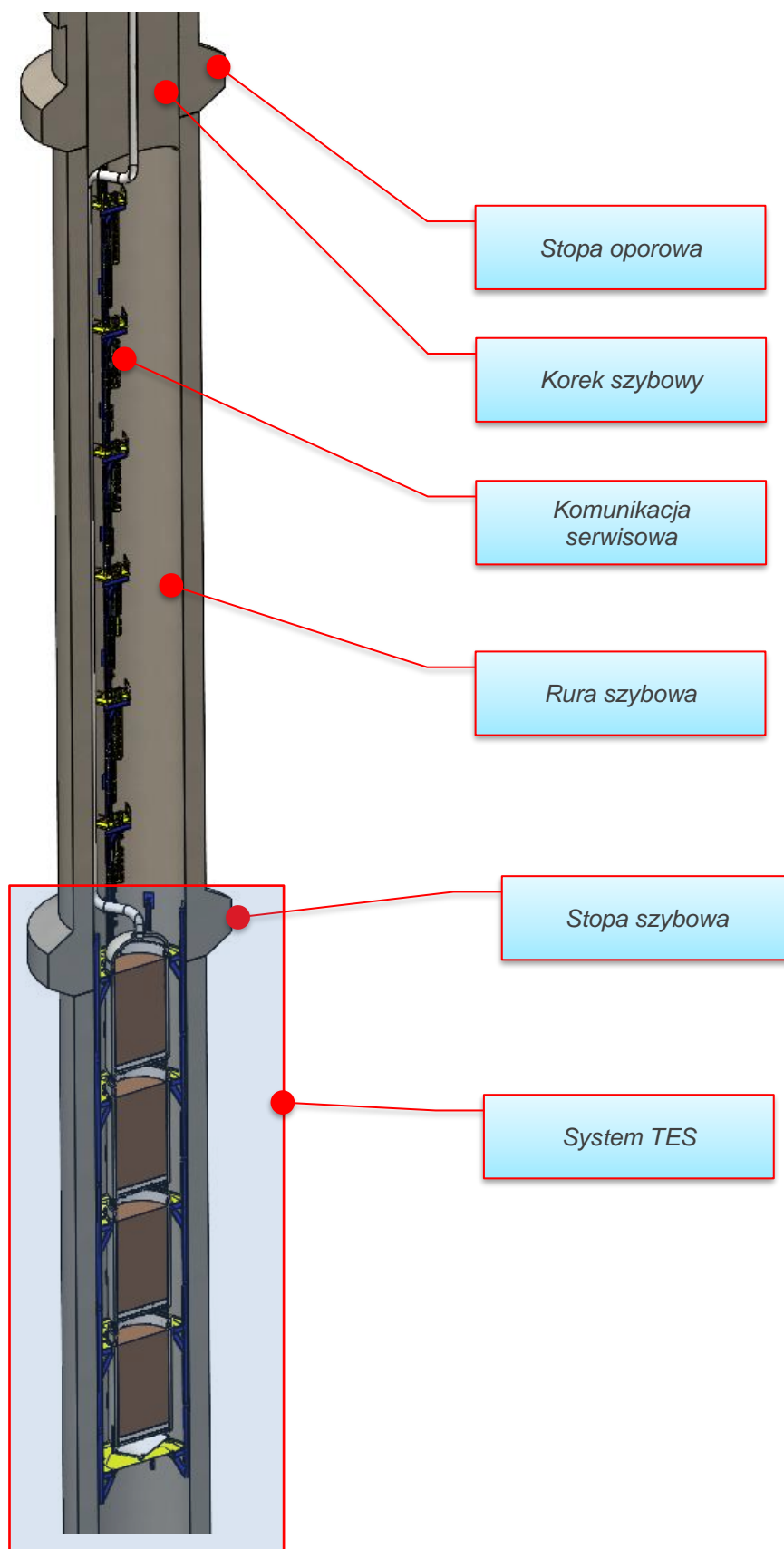


Rysunek 5.10 Zasobnik EPK_TES_1

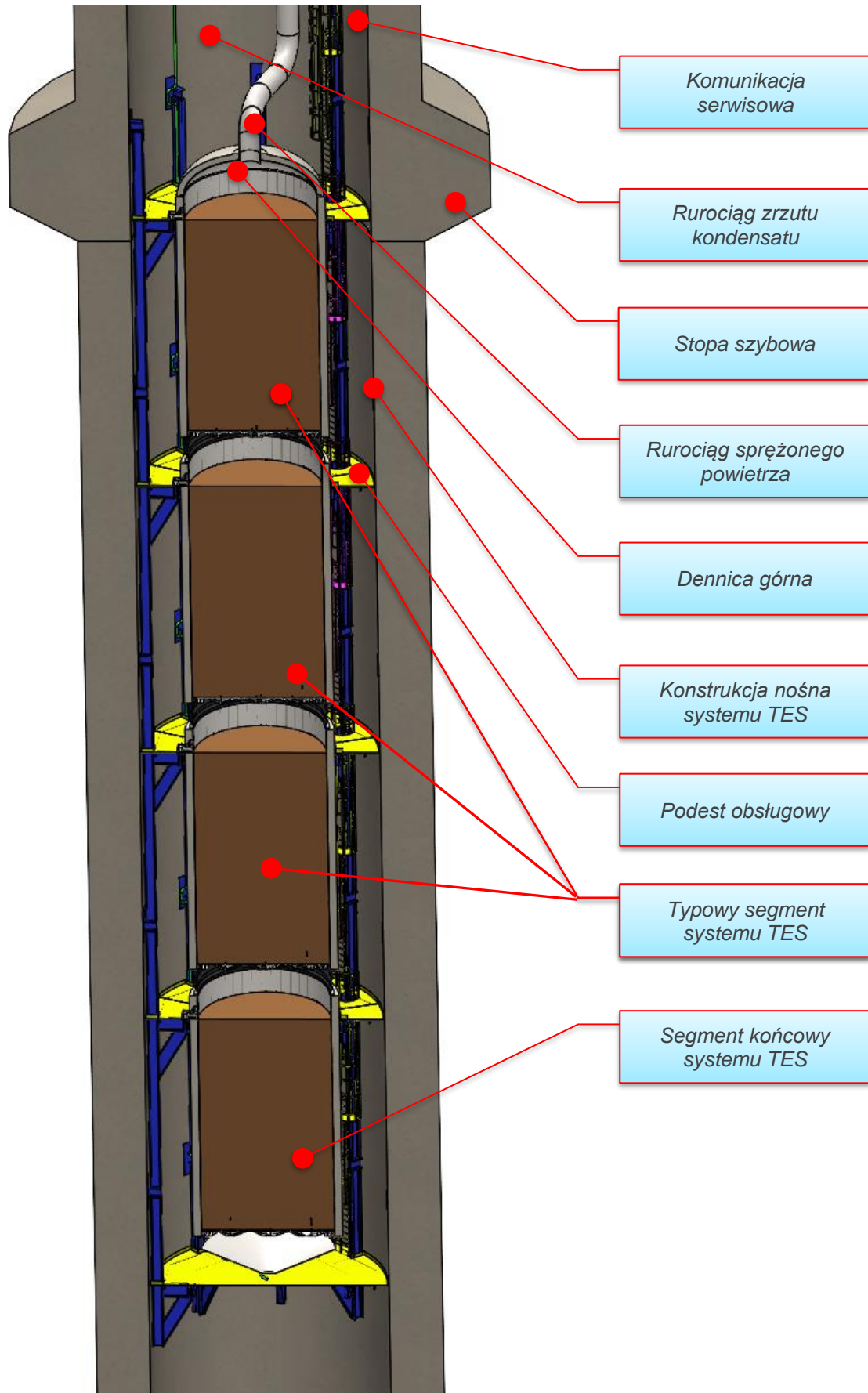
Kolejna wersja rozwojowa o oznaczeniu EPK_TES_2 zakładała rezygnację z zawiesi stałowych i wsparcie zasobnika za pomocą łap zlokalizowanych w rejonie górnego kołnierza segmentu zasobnika. W tym wypadku wydłużenia termiczne poszczególnych segmentów TES są kompensowane za pomocą kompensatorów. Z uwagi na wysoką temperaturę pracy oraz bardzo dużą średnicę zasobnika TES, nie jest możliwe zastosowanie kompensatorów tkaninowych, które cechują się relatywnie niską wytrzymałością. Z otrzymanych ofert wynika, iż maksymalna dopuszczalna różnica ciśnień jaka może wystąpić pomiędzy wnętrzem zasobnika, a otoczeniem zewnętrznym wynosi ~ 35 kPa, co jest wartością zbyt niską, wykluczającą możliwość zastosowania tego typu kompensatorów w niniejszej koncepcji. Dlatego do kompensacji wydłużeń termicznych przewidziano zastosowanie stalowych kompensatorów osiowych (falistych), które są dostępne w rozmiarze do DN5000 [108].

Na rysunkach od 5.11 do 5.14 pokazano zabudowę segmentową TES oraz szczegóły pojedynczego segmentu TES. Zakłada się, że segment zasobnika zostanie wykonany w formie stalowego zbiornika, zakończonego dnem sitowym, o średnicy dopasowanej do średnicy współpracującego szybu pokopalnianego. Każdy z segmentów będzie posiadać konstrukcję stalową umożliwiającą montaż do stopy szybowej i/lub do

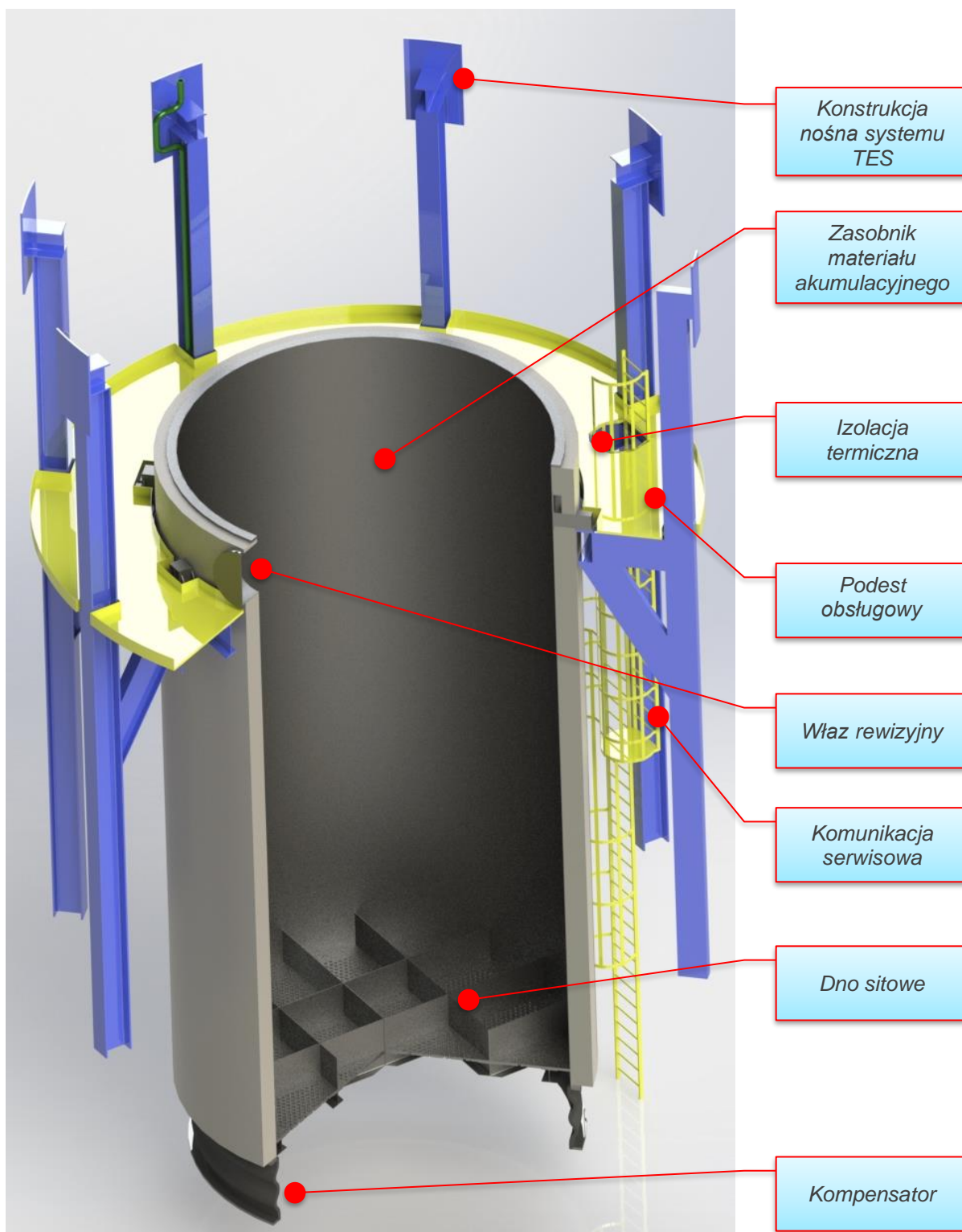
kolejnego segmentu. Na tej konstrukcji zostanie wsparty segment TES za pomocą łap stanowiących integralną część segmentu. Na wysokości łap przewiduje się wykonanie podestu obsługowego umożliwiającego dostęp do górnej powierzchni złoża akumulacyjnego przez króciec rewizyjny zlokalizowany w poboczniczy zasobnika. Każdy segment będzie izolowany matą z wełny mineralnej z osłoną z blachy stalowej. Ważne jest aby blacha osłonowa nie była szczelna, umożliwiając równomierny wzrost ciśnienia w pełnej objętości izolacji. W przeciwnym razie blacha stalowa będzie zginać materiał izolacyjny pogarszając jego właściwości. Pierwszy segment TES zostanie wyposażony w górną dennicę z króćcem umożliwiającym doprowadzenie sprężonego powietrza. Ostatni segment zostanie wyposażony w specjalnie uformowany okap zbierający ewentualnie wykroplony kondensat, który następnie będzie usuwany po każdej fazie ładowania, za pomocą rurociągu łączącego objętość zebranego kondensatu ze zbiornikiem naziemnym. Samoczynne opróżnianie okapu będzie możliwe wyłącznie przy wykorzystaniu różnicy pomiędzy ciśnieniem panującym w objętości szybu, a ciśnieniem otoczenia na powierzchni. Dodatkowo, pod ostatnim segmentem znajdować się będzie podest obsługowy umożliwiający inspekcję dolnych partii zasobnika. Pomiędzy podestami poszczególnych segmentów TES znajdować się będą drabiny umożliwiające komunikację.



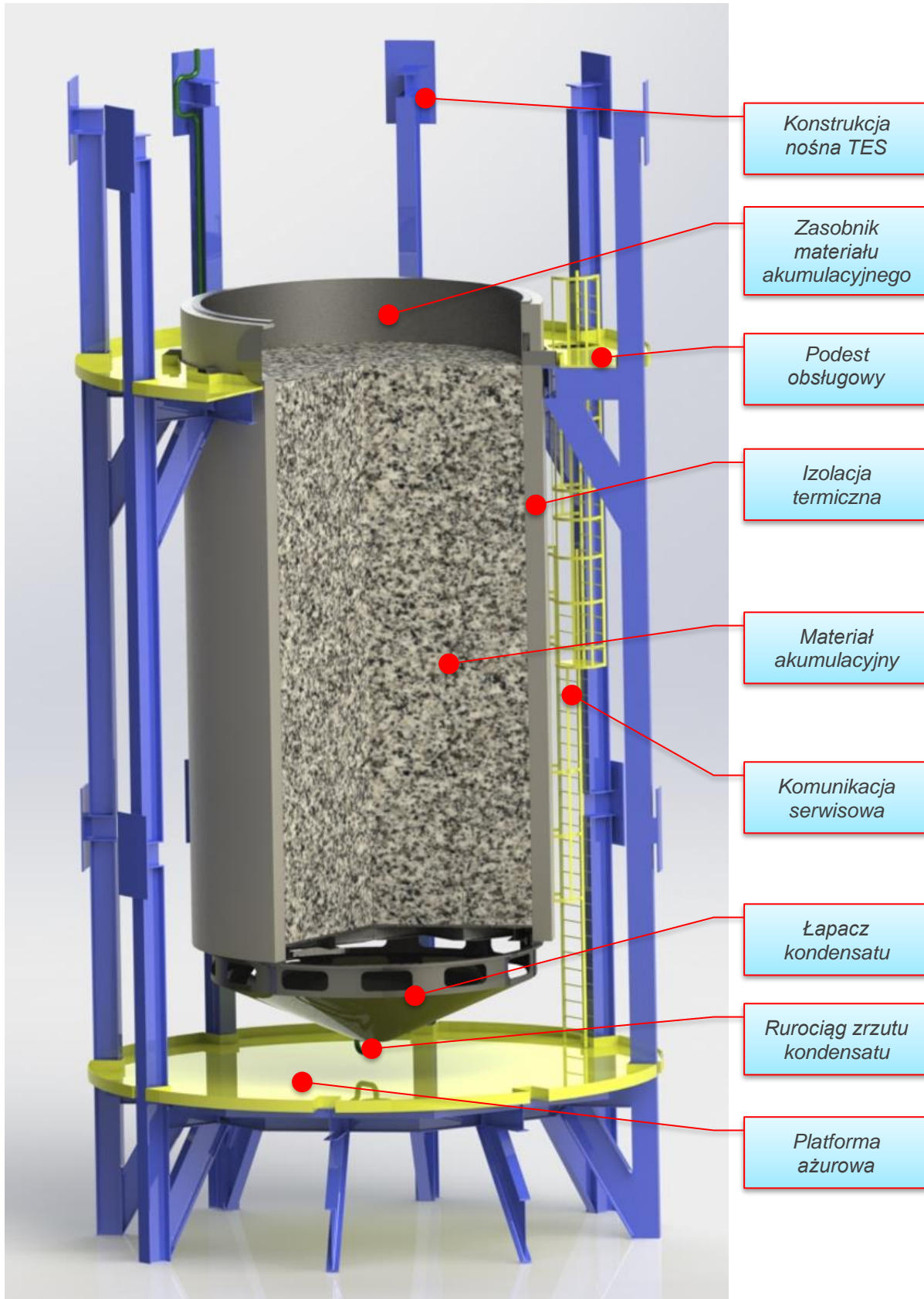
Rysunek 5.11 Zasobnik EPK_TES_2 – przykład zabudowy czterosegmentowego systemu TES wewnątrz szybu



Rysunek 5.12 Zasobnik EPK_TES_2 - podstawowe elementy systemu TES



Rysunek 5.13 Zasobnik EPK_TES_2 - przekrój częściowy przez typowy segment systemu TES bez wypełnienia

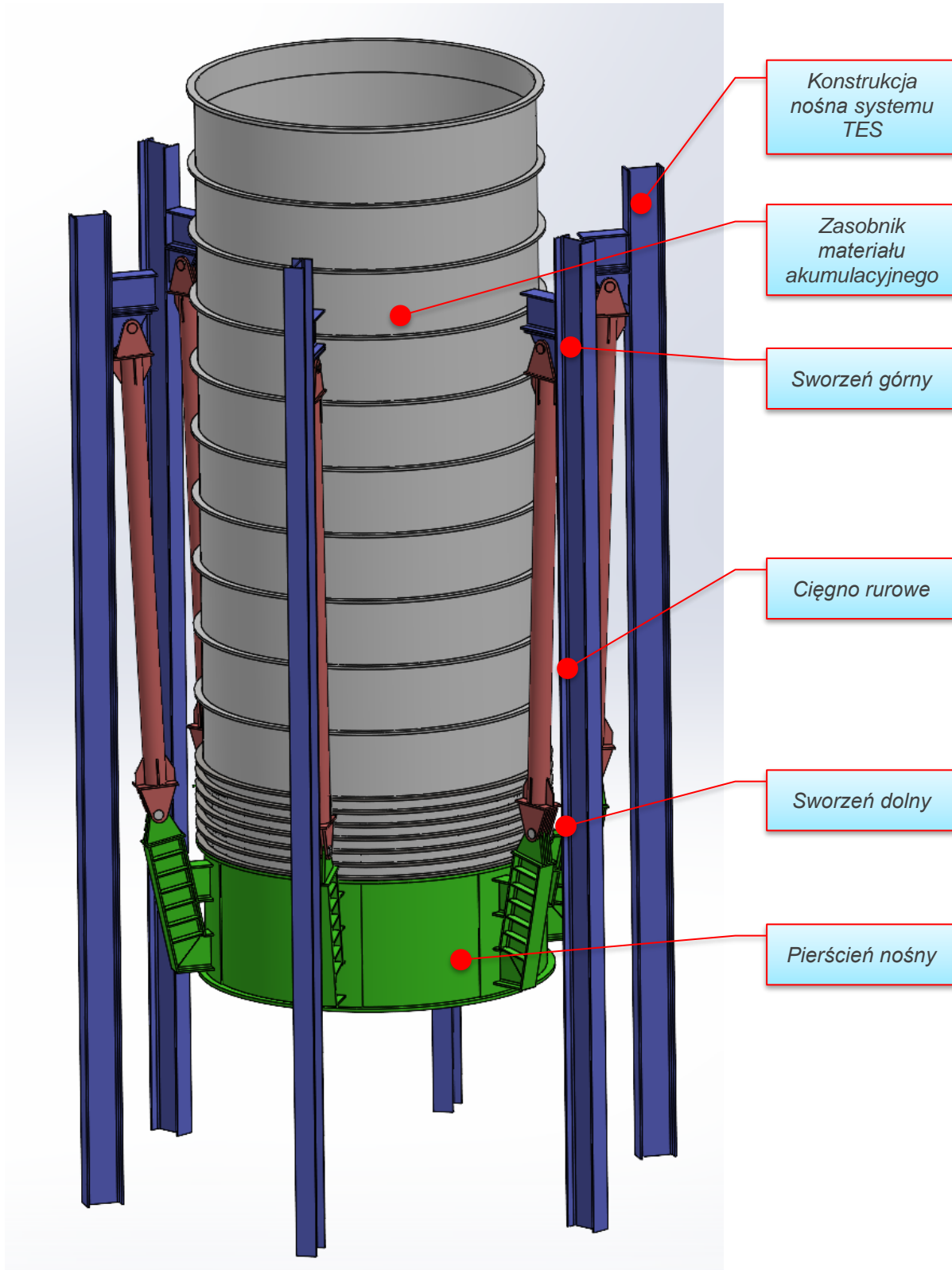


Rysunek 5.14 Zasobnik EPK_TES_2. Przekrój częściowy przez końcowy segment TES z wypełnieniem

Wersja EPK_TES_2 posłużyła jako podstawa do opracowania pierwszych modeli numerycznych TES oraz całego systemu [94], [109], [110], w trakcie których sprawdzano między innymi wpływ smukłości zasobnika na:

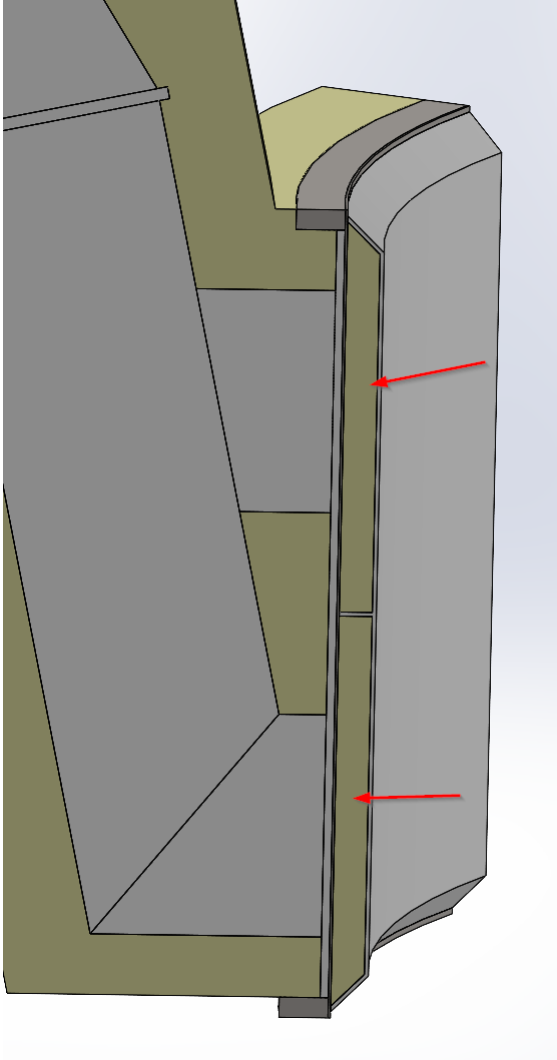
- osiągnięte temperatury sprężonego powietrza za zasobnikiem w trakcie ładowania systemu,
- osiągnięte temperatury sprężonego powietrza za zasobnikiem w trakcie rozładowywania systemu,
- opory przepływu,
- sprawność egzergetyczną zasobnika dla pełnego cyklu, która osiągnęła wartość 69%.

Z uwagi na stale podnoszone parametry pracy systemu, co było następstwem prowadzonych optymalizacji systemowych, zasobnik w wersji EPK_TES_2 (powyżej temperatury 250 °C) zaczął generować znaczne obciążenia mechaniczne na konstrukcję nośną zabudowaną w szybie, głównie z uwagi na wydłużenia termiczne w kierunku promieniowym. Ponadto problematyczne zaczęły być mostki termiczne, których obecność skutkowałą nadmiernym nagrzewaniem się konstrukcji nośnej. Dlatego w lipcu 2022 zapadła decyzja o rozpoczęciu prac nad wersją EPK_TES_3, która różni się od wcześniejszej wersji sposobem połączenia segmentu TES z główną konstrukcją nośną. W wersji EPK_TES_2 były to łapy wsparte na konstrukcji nośnej, natomiast w wersji EPK_TES_3 zasobnik TES ustawiony jest na pierścieniu nośnym wyposażonym w uszy montażowe, do których za pomocą sworzni zamocowane są ciężkie rurowe. Ciężkie rurowe będą podwieszane do głównej konstrukcji stalowej wewnątrz szybu, również za pomocą sworzni. Rozwiązanie to względem poprzedniego, z uwagi na zastosowanie dwóch przegubów (sworzni dolny i górny) nie generuje dodatkowych obciążeń w głównej konstrukcji nośnej. Dodatkowo zasobnik został doposażony w pierścieniu usztywniającym, w celu zwiększenia sztywności konstrukcji w trakcie rozładowywania systemu, gdzie z powodu oporów przepływu przez złożone różnice ciśnień pomiędzy wnętrzem zasobnika, a objętością szybu. Różnica ta jest szczególnie duża przy niskich wartościach ciśnienia minimalnego w szybie, co pokazały wyniki analizy systemu.



Rysunek 5.15 Zasobnik EPK_TES_3 - sposób połączenia zasobnika z główną konstrukcją nośną

Z uwagi na spodziewane duże starty ciepła w pierścieniu nośnym TES przez uszu montażowe, zdecydowano się zastosować podwójną ściankę stalową z wypełnieniem z wełny mineralnej na przeciwległej ścianie względem uszu (patrz rysunek 5.16).



Rysunek 5.16 Zasobnik EPK_TES_3 – izolacja cieplna w miejscu połączenia uszu montażowych z płaszczem pierścienia nośnego.

5.2. Adaptacja podziemnej części kopalni na potrzeby budowy magazynu sprężonego powietrza

5.2.1. Prace przygotowawcze

Możliwa jest adaptacja kopalń do magazynowania gazu, w tym sprężonego powietrza, polegająca na [111]:

- renowacji obudowy szybu w aspekcie ograniczenia wodoprzepuszczalności,
- likwidacji wszystkich szczelin i warstw przepuszczalnych w górotworze

bezpośrednio otaczającym wyrobiska, przez wypełnienie betonem lub cementacją,

- wzmocnieniu stropów i ociosów wyrobisk przez ich kotwienia w celu uniknięcia ryzyka powstania obwałów,
- gazoszczelnym zamknięciu szybów przez tamy izolujące,
- odcięciu nieszczelnych części kopalni za pomocą tam, gdy miejsca te są niemożliwe do uszczelnienia lub jest to wysoce nieopłacalne.

Aby eksploatacja kopalni jako magazynu sprężonego powietrza była możliwa należy spełnić dwa podstawowe warunki [111]:

- maksymalne ciśnienie magazynowania musi być niższe od ciśnienia szczelinującego górotwór w najpłytszym miejscu magazynu.
- maksymalne ciśnienie gazu musi być niższe od ciśnienia wód podziemnych otaczających magazyn.

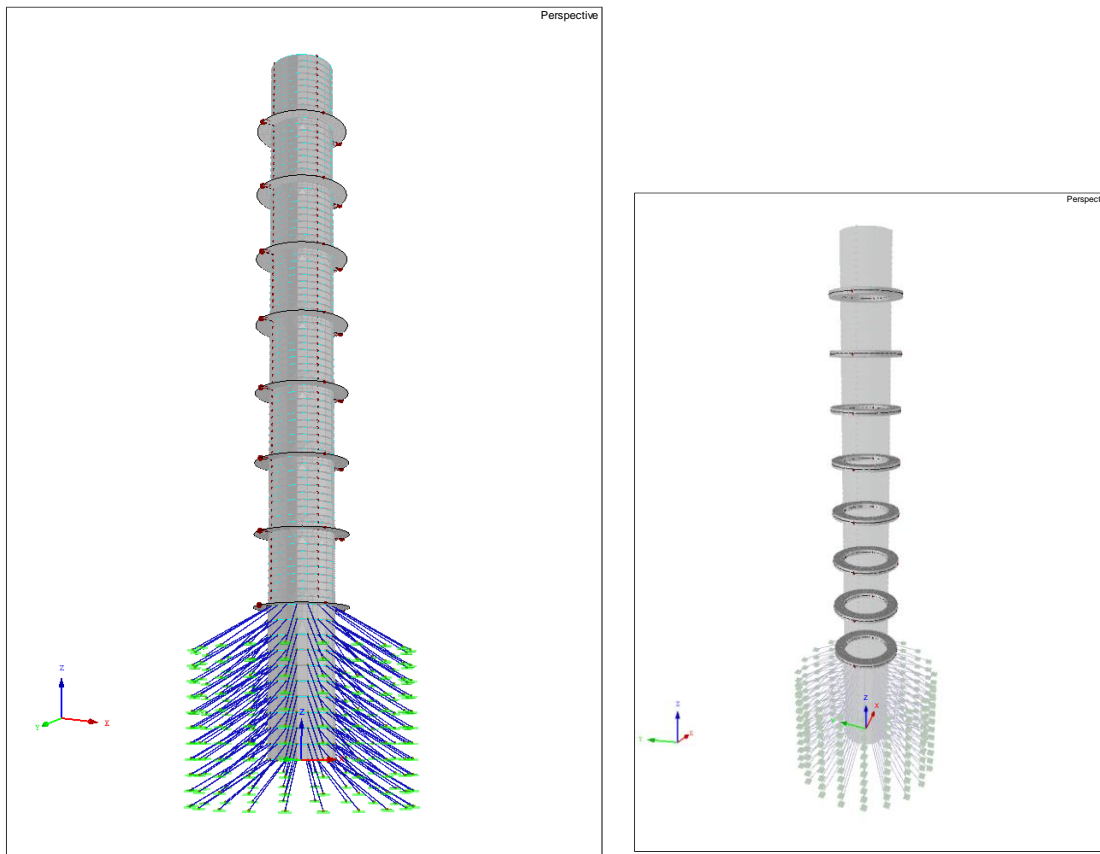
5.2.2. Korek szybowy i stopy szybowe

W ramach koncepcji systemu ACAES z wykorzystaniem pokopalnianego szybu podjęto próbę oszacowania możliwości wykonania korka szybowego, zdolnego utrzymać ciśnienie wewnątrz szybu na poziomie 8,0 MPa. Z uwagi na brak fachowej wiedzy z zakresu budownictwa, geologii oraz geomechaniki, treść niniejszego punktu należy traktować jedynie jako zapowiedź prac, które w przyszłości muszą zostać zrealizowane w zakresie opracowania bezpiecznego rozwiązania technicznego, zapewniającego szczelność magazynu oraz bezpieczeństwo podczas jego eksploatacji.

Obliczenia statyczne wytrzymałościowe zostały przeprowadzone przy pomocy oprogramowania Dlubal RFEM 5.18, w którym przyjęto wstępnie bryłowy model korka o średnicy 9 m oraz wysokości 100 m, wykonany z betonu C30/37. Założono zastosowanie zbrojenia rozproszonego, którego celem jest przeniesienia wewnętrznych naprężeń rozciągających. Zakotwienie korka w górotworze zrealizowano poprzez zespół kotew gruntowych oraz stóp oporowych.

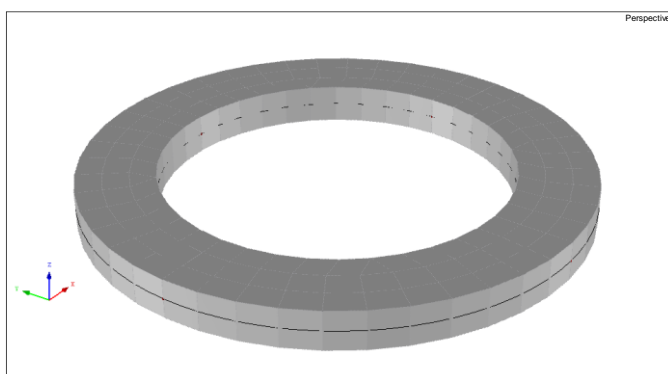
W koncepcji przyjęto 220 kotew gruntowych, które będą utrzymywać korek w jego dolnym odcinku o wysokości 20 m. Kotwy zamodelowano jako elementy prętowe, przenoszące jedynie siłę osiową. Założono długość kotew równą 12 m o pełnym

przekroju kołowym i średnicy 100 mm, ze stali S355. Założono również pełne utwardzenie kotew w górotworze. Rysunek 5.17 przedstawia model obliczeniowy korka szybowego z widocznymi kotwami w jego dolnej części.



Rysunek 5.17 Widok na model obliczeniowy korka szybowego

W celu dodatkowej stabilizacji i utwardzenia korka w górotworze przyjęto zastosowanie ośmiu stóp oporowych. Stopa oporowa została pokazana na rysunku 5.18.



Rysunek 5.18 Stopa oporowa korka szybowego

Każda stopa będzie wykonana w postaci żelbetowego pierścienia o grubości 2,0 m i wysokości 1,0 m.

Do obliczeń przyjęto, że oparcie stóp oporowych w górotworze będzie sprężyste.

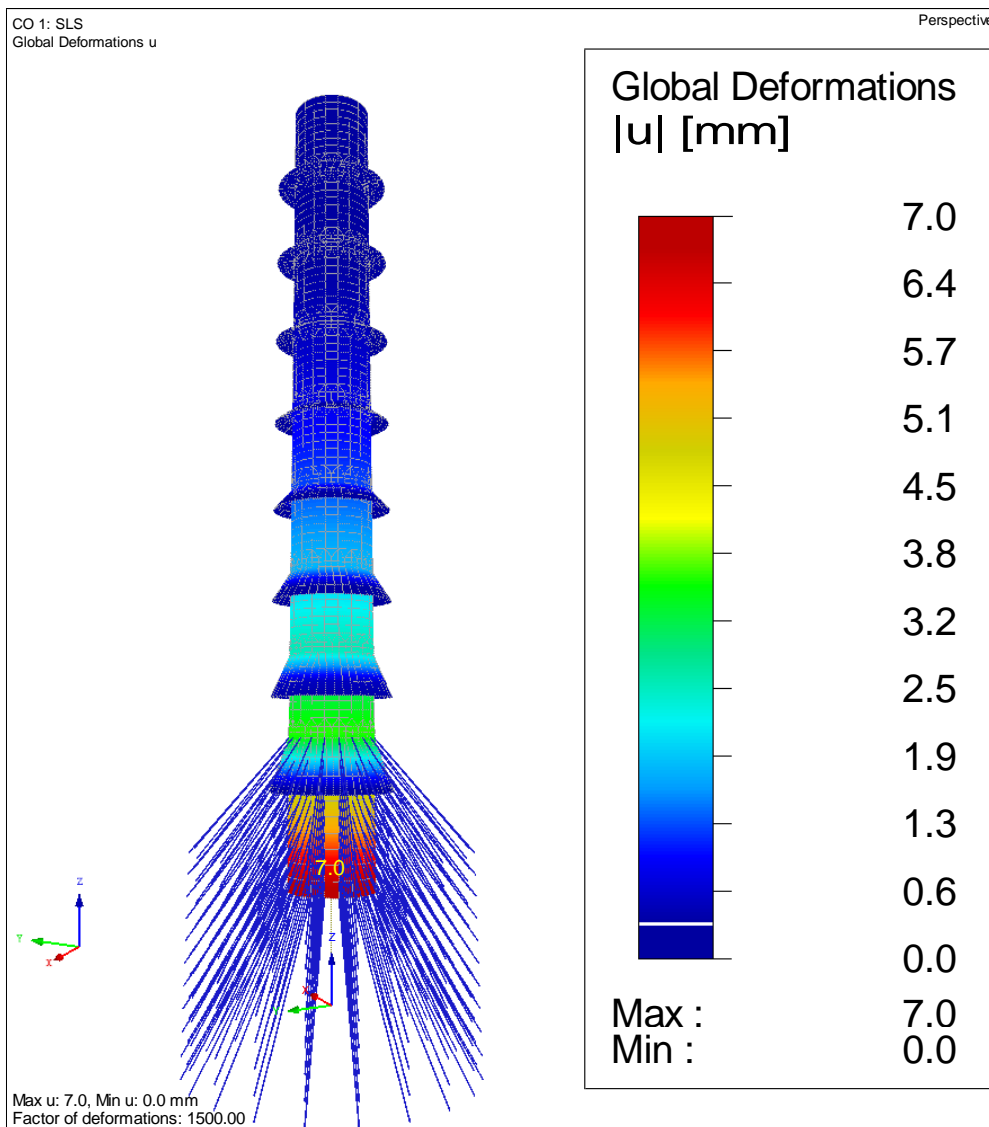
Przyjęte założenia:

- średnica szybu $d_{sz} = 9,0 \text{ m}$,
- ciśnienie działające na spód korka $p_{mag_max} = 8,1 \text{ MPa}$,
- brak współczynników korekcyjnych dla obciążeń,
- pominięto tarcie części cylindrycznych korka pomiędzy stopami oporowymi,
- do korka podwieszono zasobniki TES o łącznej wadze 5000 kg.

Wyniki obliczeń (patrz rysunek 5.19 oraz rysunek 5.20) wskazują na wyężenie kotew na poziomie 45%, co jest bardzo dobrym wynikiem, biorąc pod uwagę przyjęte do analizy założenia.

Design Internal Forces					
— Axial Force	N_{Ed}	1118.36	kN		
— Shear Force	$V_{y,Ed}$	0.00	kN		
— Shear Force	$V_{z,Ed}$	0.00	kN		
— Torsional Moment	T_{Ed}	0.00	kNm		
— Moment	$M_{y,Ed}$	0.00	kNm		
— Moment	$M_{z,Ed}$	0.00	kNm		
Design Ratio					
— Tension Force	$N_{t,Ed}$	1118.36	kN		
— Cross-Sectional Area	A	78.50	cm ²		
— Yield Strength	f_y	31.50	kN/cm ²		3.2.1
— Partial Factor	γ_{M0}	1.000			6.1
— Design plastic resistance to normal forces	$N_{pl,Rd}$	2472.75	kN		(6.6)
— Axial Force Resistance	$N_{t,Rd}$	2472.75	kN		
— Design Ratio	η	0.45		≤ 1	(6.5)
Design Formula					
$N_{t,Ed} / N_{t,Rd} = 0.45 \leq 1 \quad (6.5)$					

Rysunek 5.19 TES Rezultaty analiz wytrzymałościowych przeprowadzanych z wykorzystaniem oprogramowania Dlubal RFEM 5.18 dla opcji z podwieszonym zespołem TES (podkreślono rezultat prezentujący wyężenie kotew korka szybowego)



Rysunek 5.20 Przemieszczenia korka szybowego z podwieszonym zespołem TES

Z uwagi na bardzo optymistyczne wyniki analizy zdecydowano się na wykonanie dodatkowej symulacji korka bez dodatkowej masy stanowiącej masę zespołu TES.

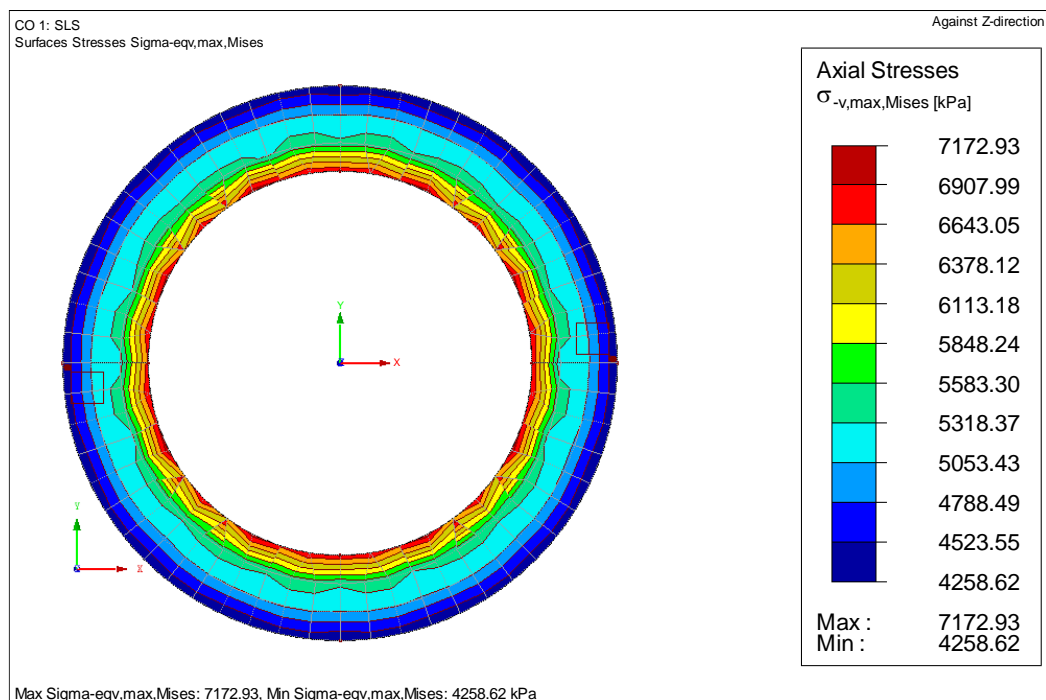
Wyniki analizy (patrz rysunek 5.21) wskazują wzrost wyężenia kotew do wartości 51% co również jest bardzo dobrym wynikiem i zdaje się potwierdzać możliwość wykonania korka szybowego dla ciśnienia w szybie o wartości 8,1 MPa.

Konieczne jest przeprowadzenie dalszych analiz w ramach zespołu projektowego o odpowiednich kompetencjach.

Details - Member 3 - x: 0.000 m - CO3					
Material Properties - Steel S 355 EN 10025-2:2004-11					
Cross-Section Properties - RD 100					
Design Internal Forces					
— Axial Force	N _{Ed}	1258.74	kN		
— Shear Force	V _{y,Ed}	0.00	kN		
— Shear Force	V _{z,Ed}	0.00	kN		
— Torsional Moment	T _{Ed}	0.00	kNm		
— Moment	M _{y,Ed}	0.00	kNm		
— Moment	M _{z,Ed}	0.00	kNm		
Design Ratio					
— Tension Force	N _{t,Ed}	1258.74	kN		
— Cross-Sectional Area	A	78.50	cm ²		
— Yield Strength	f _y	31.50	kN/cm ²		3.2.1
— Partial Factor	γ _{M0}	1.000			6.1
— Design plastic resistance to normal forces	N _{pl,Rd}	2472.75	kN		(6.6)
— Axial Force Resistance	N _{t,Rd}	2472.75	kN		
— Design Ratio	η	0.51		≤ 1	(6.5)
Design Formula					
N _{t,Ed} / N _{t,Rd} = 0.51 ≤ 1 (6.5)					

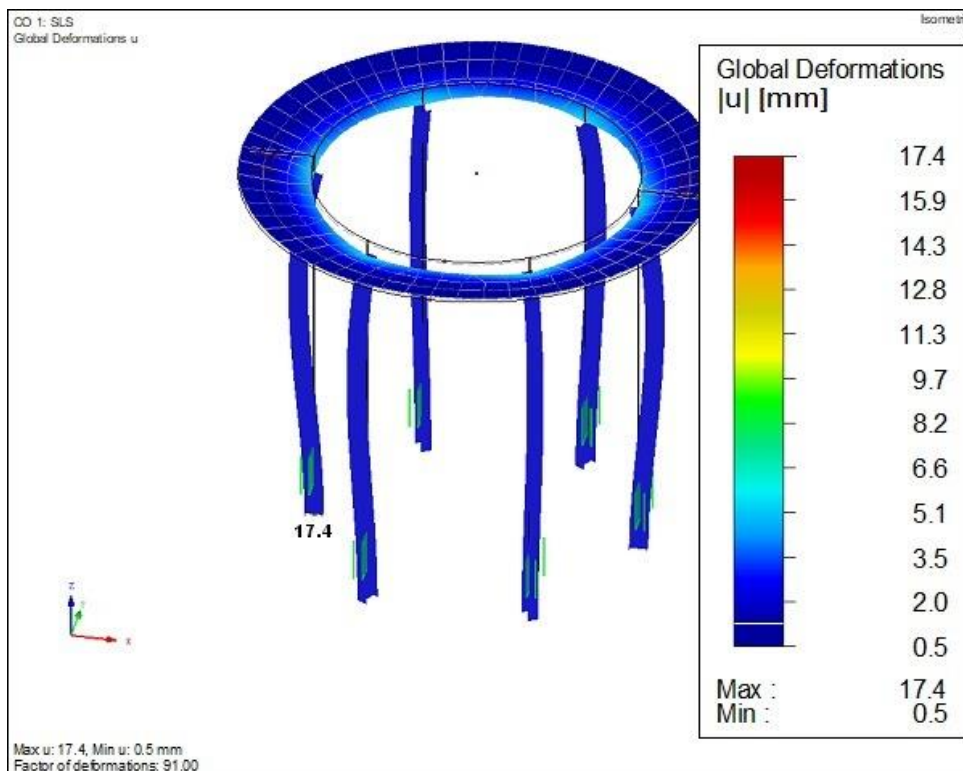
Rysunek 5.21 Rezultaty analiz wytrzymałościowych przeprowadzonych z wykorzystaniem oprogramowania Dlubal RFEM 5.18 dla opcji bez podwieszonego zespołu TES (podkreślono rezultat prezentujący wyłączenie kotew korka szybowego)

Obok montażu korka uszczelniającego przestrzeń szybu mającego mieć zastosowanie jako zbiornik wysokociśnieniowy bardzo dużym wyzwaniem natury konstrukcyjnej jest opracowanie optymalnego (pod względem bezpieczeństwa eksploatacji oraz kosztów) rozwiązania dla montażu systemu TES w objętości szybu. Analiza najbardziej wyczerpanej stopy oporowej znajdującej się w dolnej części korka (patrz rysunek 5.22) wskazuje, że teoretycznie istnieje możliwość zawieszenia zasobnika o masie przekraczającej 5000 ton tylko na jednej stopie szybowej.



Rysunek 5.22 Naprężenia w najbardziej wyężonej stopie szybowej korka

W związku z powyższym wykonano wstępną analizę przemieszczeń stopy szybowej, wraz z zamocowanymi sześcioma profilami nośnymi HEM 460, dedykowanymi do podwieszenia systemu TES o wadze 5000 ton. Rysunek 5.23 przedstawia deformację stopy szybowej oraz stalowej konstrukcji nośnej, gdzie widać że największa deformacja zachodzi w rejonie gdzie przyłożono obciążenie od zasobnika i wynosi około 17 mm.



Rysunek 5.23 Deformacja stopy szybowej i konstrukcji nośnej dla kompletnego systemu TES

W artykule [109] poruszono tematykę stóp szybowych, jako elementów, które mogą posłużyć do kotwienia konstrukcji nośnej systemu TES. Autorzy analizowali przypadek, gdzie w tym celu wykorzystuje się cztery stopy szybowe. Jak podkreślają to autorzy publikacji, obciążalność stopy szybowej zależy od materiału górotworu, w którym ta jest posadowiona.

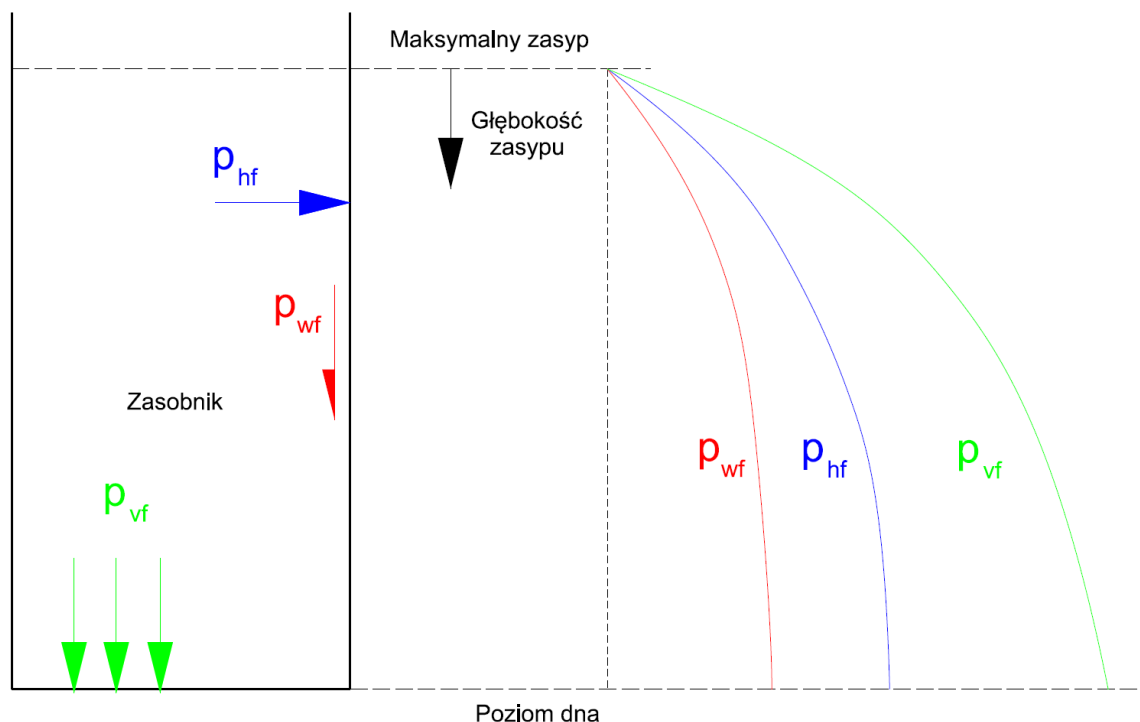
5.3. Wstępne analizy mechaniczna i ocena mostków termicznych systemu TES

Przewiduje się wykonanie zasobnika TES jako stalowego zbiornika cylindrycznego, o średnicy dostosowanej do szybu, wewnątrz którego ma zostać zabudowany. Wstępnie przyjęto smukłość pojedynczego segmentu $H/d = 2$.

5.3.1. Wstępna analiza mechaniczna segmentu zasobnika

Z uwagi na zastosowanie wypełnienia zasobnika materiałem skalnym o stosunkowo drobnej frakcji konieczne jest prawidłowe zdefiniowanie obciążeń działających na wewnętrzną ścianę cylindryczną oraz dno płaskie. Z uwagi na podobieństwo zasobnika do silosów na materiał sypki przy wyznaczaniu obciążeń oparto się na wymaganiach normy Eurokod 1 - Oddziaływania na konstrukcje - Część 4: Silosy i

zbiorniki [112]. Rysunek 5.24 przedstawia typowy schemat obciążeń w zasobniku wypełnionym materiałem skalnym.



Rysunek 5.24 Schemat obciążeń w zasobniku od wypełnienia materiałem skalnym.

Dla potrzeb analizy przyjęto następujące założenia dla zasobnika z wypełnieniem skalnym:

- średnica wewnętrzna $d_c = 5,0 \text{ m}$,
- wysokość wypełnienia $H_c = 10,0 \text{ m}$,
- grubość ścianki $g_o = 8 \text{ mm}$,
- silos smukły $H_c / d_c \geq 2,0$,
- silos cienkościenny $d_c / g_o = 625 > 200$,
- brak stożka nasypowego $H_0 = 0,0 \text{ m}$,
- płaszcz spawany kategoria ścian D2 - tarcie umiarkowane.

Aby w zasobniku, w zależności od potrzeb, można było stosować jak największą ilość materiałów o zróżnicowanych parametrach zdecydowano się zastosować „materiał standardowy” („default material”). Norma zaleca stosowanie tego materiału w przypadku, gdy nie są dostępne parametry materiału, który będzie znajdował się w

zasobniku.

Parametry materiału standardowego (zgodnie z normą):

- gęstość nasypowa „dolna” $\gamma_l = 6,0 \text{ kN/m}^3$,
- gęstość nasypowa „górna” $\gamma_u = 22,0 \text{ kN/m}^3$,
- kąt nasypowy $\Phi_r = 40,0^\circ$,
- kąt tarcia wewnętrznego (uśredniony) $\Phi_{im} = 35,0^\circ$,
- współczynnik konwersji tarcia wewnętrznego $a_\Phi = 1,3$,
- stosunek ciśnienia bocznego (uśredniony) $K_m = 0,5$,
- współczynnik konwersji ciśnienia bocznego $a_K = 1,5$,
- współczynnik tarcia (uśredniony; ściana D2) $\mu_m = 0,39$,
- współczynnik konwersji tarcia $a_\mu = 1,4$,
- współczynnik zwiększenia obciążenia dna $C_b = 1,0$.

Biorąc po uwagę powyższe założenia, zasobnik TES będzie klasyfikowany według normy jako silos klasy 2.

Współczynniki konwersji służą do wyznaczania górnych i dolnych zakresów dla wyżej wymienionych wartości średnich poszczególnych parametrów. Tabela 5.1 zawiera najbardziej niekorzystne warunki obciążeń oraz przynależne im wartości graniczne dla odpowiednich współczynników.

Tabela 5.1 Maksymalne obciążenia i współczynniki graniczne

Maksymalne obciążenie	Zakres współczynnika tarcia μ	Zakres stosunku ciśnienia bocznego K	Zakres kąta tarcia wewnętrznego Φ_i
Nacisk na ścianę pionową (kierunek normalny do ściany)	Dolny μ_l	Górny K_u	Dolny Φ_{il}
Obciążenie pionowe od tarcia	Górny μ_u	Górny K_u	Dolny Φ_{il}

Maksymalne obciążenie	Zakres współczynnika tarcia μ	Zakres stosunku ciśnienia bocznego K	Zakres kąta tarcia wewnętrznego Φ_i
materiału o ścianę (równoległe do ściany)			
Obciążenie dna zbiornika	Dolny μ_l	Dolny K_l	Górny Φ_{iu}

Wartości graniczne dla odpowiednich współczynników oblicza się na podstawie równań (5.3) do (5.8):

górna i dolna wartość współczynnika tarcia:

$$\mu_u = a_\mu \mu_m, \quad (5.3)$$

$$\mu_l = \frac{\mu_m}{a_\mu}, \quad (5.4)$$

górna i dolna wartość stosunku ciśnienia bocznego:

$$K_u = a_K K_m, \quad (5.5)$$

$$K_l = \frac{K_m}{a_K}, \quad (5.6)$$

górna i dolna wartość kąta tarcia wewnętrznego:

$$\Phi_{iu} = a_\Phi \Phi_{im}, \quad (5.7)$$

$$\Phi_{il} = \frac{\Phi_{im}}{a_\Phi}. \quad (5.8)$$

Nacisk na pionowe ściany zasobnika jest funkcją wysokości napełnienia (głębokości zasypu) i wyznacza się je na podstawie równania:

$$p_{hf}(z) = p_{ho}Y_J(z), \quad (5.9)$$

w którym:

$$p_{ho} = \gamma K_u z_0, \quad (5.10)$$

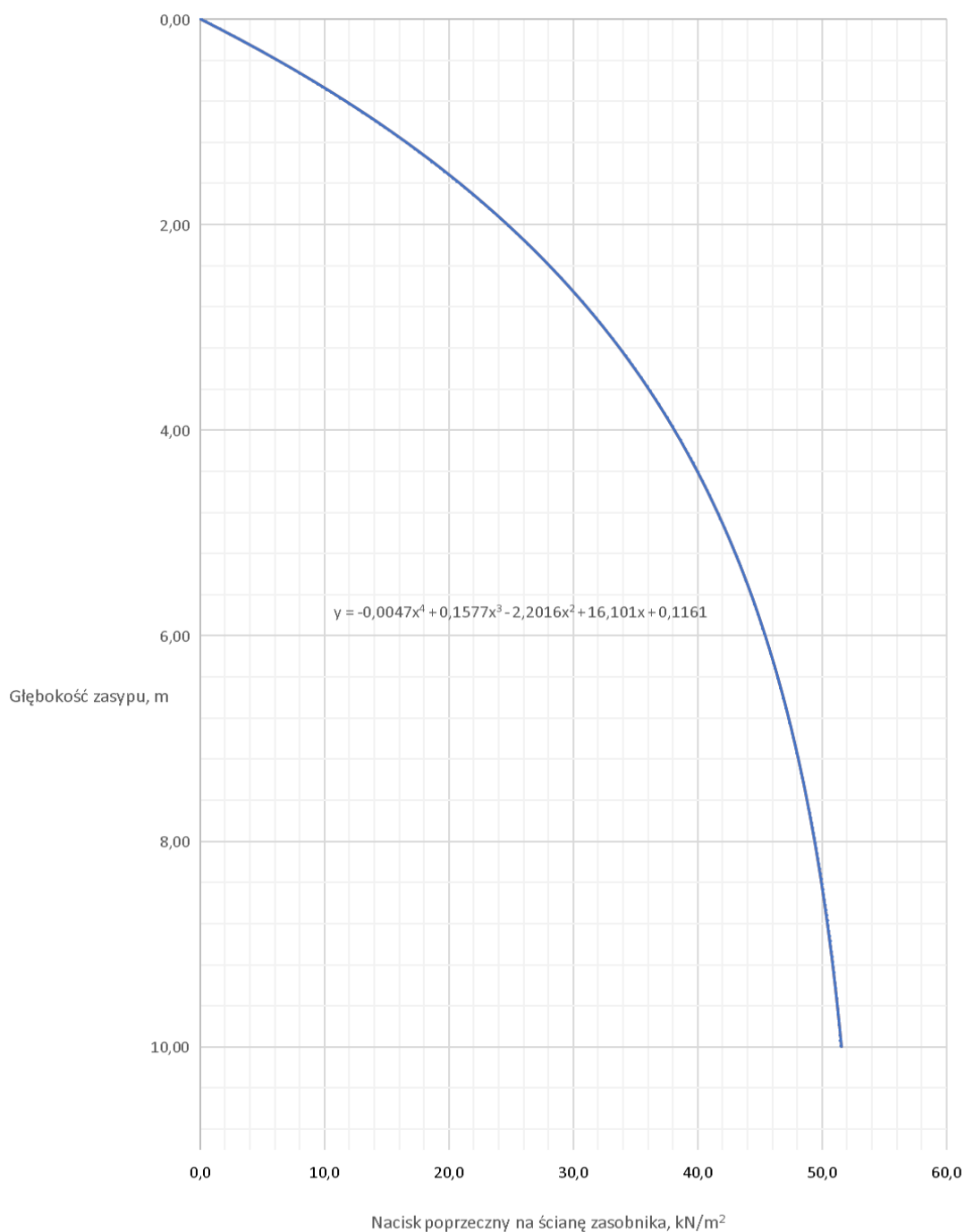
$$z_0 = \frac{1}{K_u \mu_1} \frac{A}{U}, \quad (5.11)$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-z/z_0}, \quad (5.12)$$

gdzie:

p_{ho}	- asymptotyczne ciśnienie poziome na dużej głębokości spowodowane zmagazynowanymi cząstkami stałymi, kN/m^3 ,
$Y_J(z)$	- funkcja Jensena zmiany głębokości nacisku, -,
z_0	- głębokość charakterystyczna Jensena, m,
A	- pole przekroju poprzecznego zasobnika, m^2 ,
U	- obwód wewnętrzny zasobnika, m.

Rysunek 5.25 przedstawia wykres nacisku poprzecznego oddziaływującego na ściankę, który został obliczony na podstawie równania (5.9).



Rysunek 5.25 Nacisk na pionowe ściany zasobnika w funkcji wysokości napełnienia (głębokości zasypu)

Obciążenie pionowe od tarcia materiału o ścianę jest również funkcją wysokości napełnienia (głębokości zasypu) i wyznacza się je na podstawie równania:

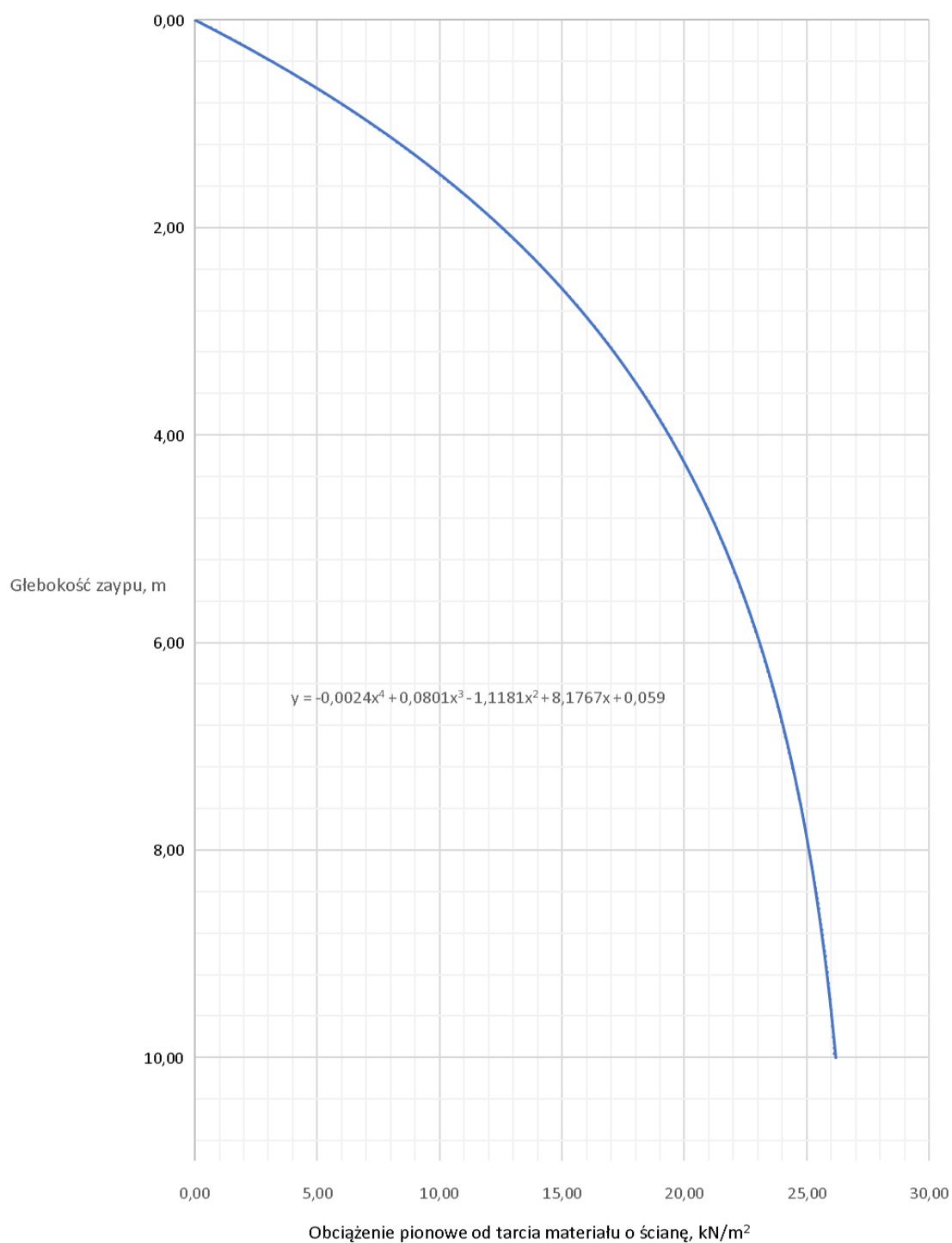
$$p_{wf}(z) = \mu p_{ho} Y_J(z), \quad (5.13)$$

w którym:

$$p_{ho} = \gamma K_u z_0, \quad (5.14)$$

$$z_0 = \frac{1}{K_u \mu_u} \frac{A}{U}. \quad (5.15)$$

Rysunek 5.26 przedstawia wykres obciążenia pionowego od tarcia materiału o ścianę, który został wyznaczony na podstawie równania (5.13).



Rysunek 5.26 Obciążenie pionowe od tarcia materiału o ścianę (równoległe do ściany)

Nacisk na dno zbiornika wyznacza się na podstawie równania:

$$p_{vft} = C_b p_{vf} \quad (5.16)$$

w którym:

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K_1} Y_J(z), \quad (5.17)$$

gdzie:

C_b - współczynnik zwiększający obciążenia dna, -

Dla zbiornika klasy 2 współczynnik $C_b = 1$.

Obliczony na podstawie wzoru (5.13) nacisk na dno zbiornika wynosi $p_{vft} = 155,74 \text{ kN/m}^2$.

Grubość ścianki zasobnika została obliczona na podstawie wzoru [113]:

$$g_o = \frac{p_o \cdot D_w}{2,3 \cdot k \cdot \frac{Z}{x} - p_o}, \quad (5.18)$$

gdzie:

g_o - obliczeniowa grubość ścianki, mm,
 p_o - ciśnienie obliczeniowe, MPa,
 D_w - średnica wewnętrzna, mm,
 k - naprężenia dopuszczalne na rozrywanie, MPa,
 Z - współczynnik zmniejszający na spawanie, -,
 x - współczynnik bezpieczeństwa, -.

Z uwagi na przewidywane zabezpieczenie zbiornika na wypadek wystąpienia znacznych różnic ciśnień w fazach ładowania i rozładowywania, przewidziano zastosowanie płytek bezpieczeństwa, które zostaną rozerwane po przekroczeniu założonej wartości różnicy ciśnień. Przyjęte założenia:

- stal P355GH,
- maksymalna temperatura pracy $t_r = 400 \text{ }^\circ\text{C}$,
- $p_o = 0,1 \text{ MPa}$,
- $D_w = 5016 \text{ mm}$,

- $k = 355 \text{ MPa}$,
- $k_{400^\circ\text{C}} = 196 \text{ MPa}$,
- $Z = 0,7$,
- $x = 1,65$.

Obliczeniowa grubość ścianki na podstawie wzoru (5.18) wynosi $g_0 = 6,6 \text{ mm}$.
Po uwzględnieniu tolerancji, nadatku na korozję oraz dodatkowych obciążeń:

- ciężar izolacji termicznej 4500 kg,
- obciążenie od kompensatora 100 kN,
- ciśnienia dla fazy ładowania:
 - ciśnienie w zasobniku 8,1 MPa,
 - ciśnienie na zewnątrz zasobnika 8,0 MPa,
- ciśnienia w fazie rozładowywania:
 - ciśnienie w zasobniku 7,9 MPa,
 - ciśnienie na zewnątrz zasobnika 8,0 MPa,

do dalszych obliczeń przyjęto ściankę o grubości 10 mm.

Za pomocą oprogramowania Solidworks Simulation Premium 2021 została wykonana analiza metodą elementów skończonych.

W tabeli 5.2 pokazano założenia dla analizowanych wariantów.

Jako jedna z pierwszych została wykonana analiza termiczna, która wykazała praktycznie pełne wygrzanie zasobnika TES do wartości temperatury roboczej, w związku z czym zaprzestano dalszych analiz termicznych i przyjęto, zakres dopuszczalnych naprężeń na poziomie 196 MPa w temperaturze 400 °C dla stali P355GH.

Kolejną analizą była analiza wyboczeniowa, która została przeprowadzona z uwagi na smukłość zasobnika oraz brak przeprowadzonych obliczeń pod kątem utraty stateczności konstrukcji z uwagi na występujące nadciśnienie po stronie zewnętrznej zasobnika w fazie rozładowywania. Z analizy zostały wykluczone obciążenia wynikające z wypełnienia materiałem skalnym. Pierwsze analizy wykazywały ujemne

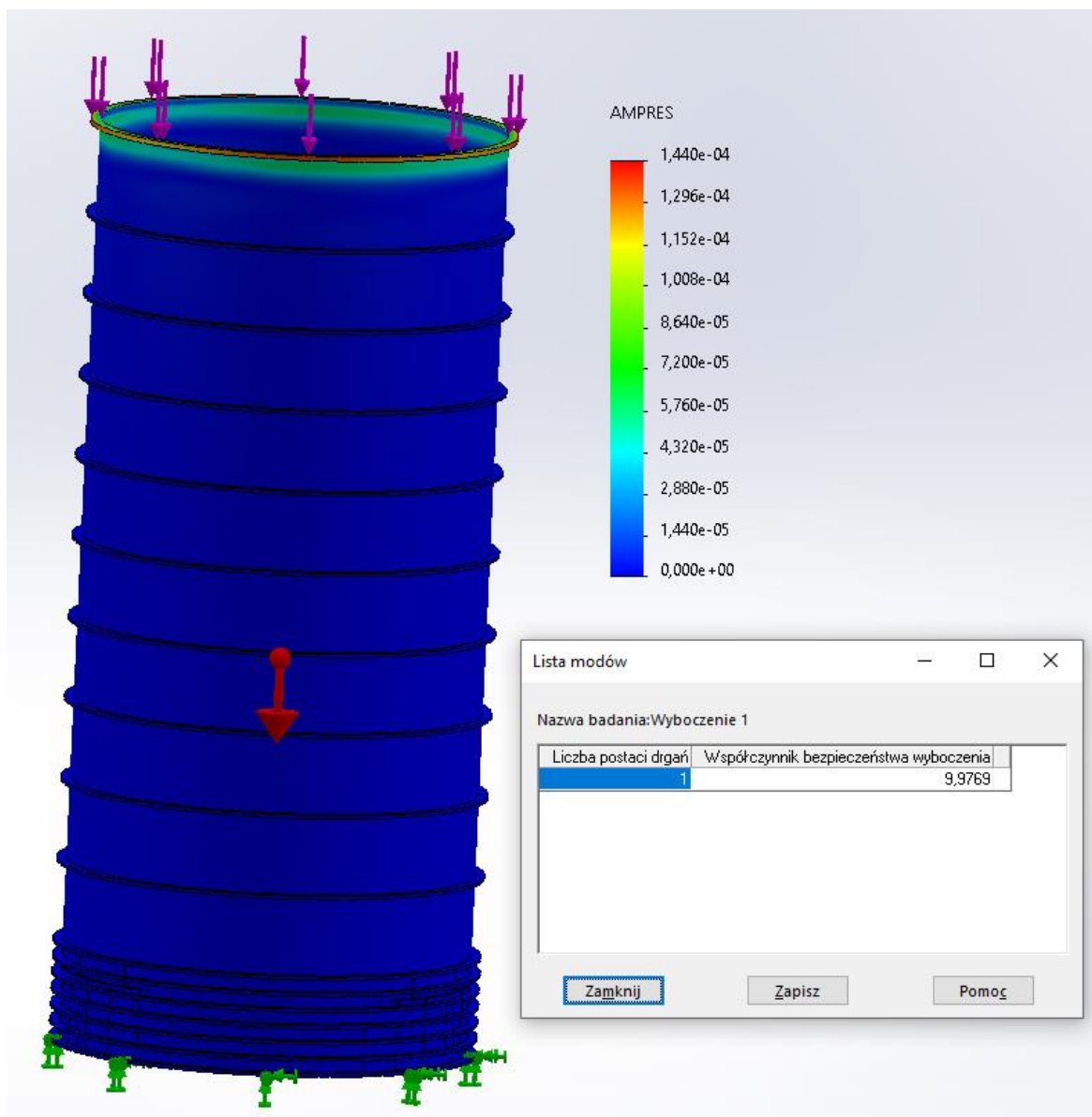


współczynniki bezpieczeństwa w wariacie rozładowywania, co wymusiło konieczność stosowania żebrowania usztywniającego w postaci pierścieni założonych na obwodzie zasobnika.

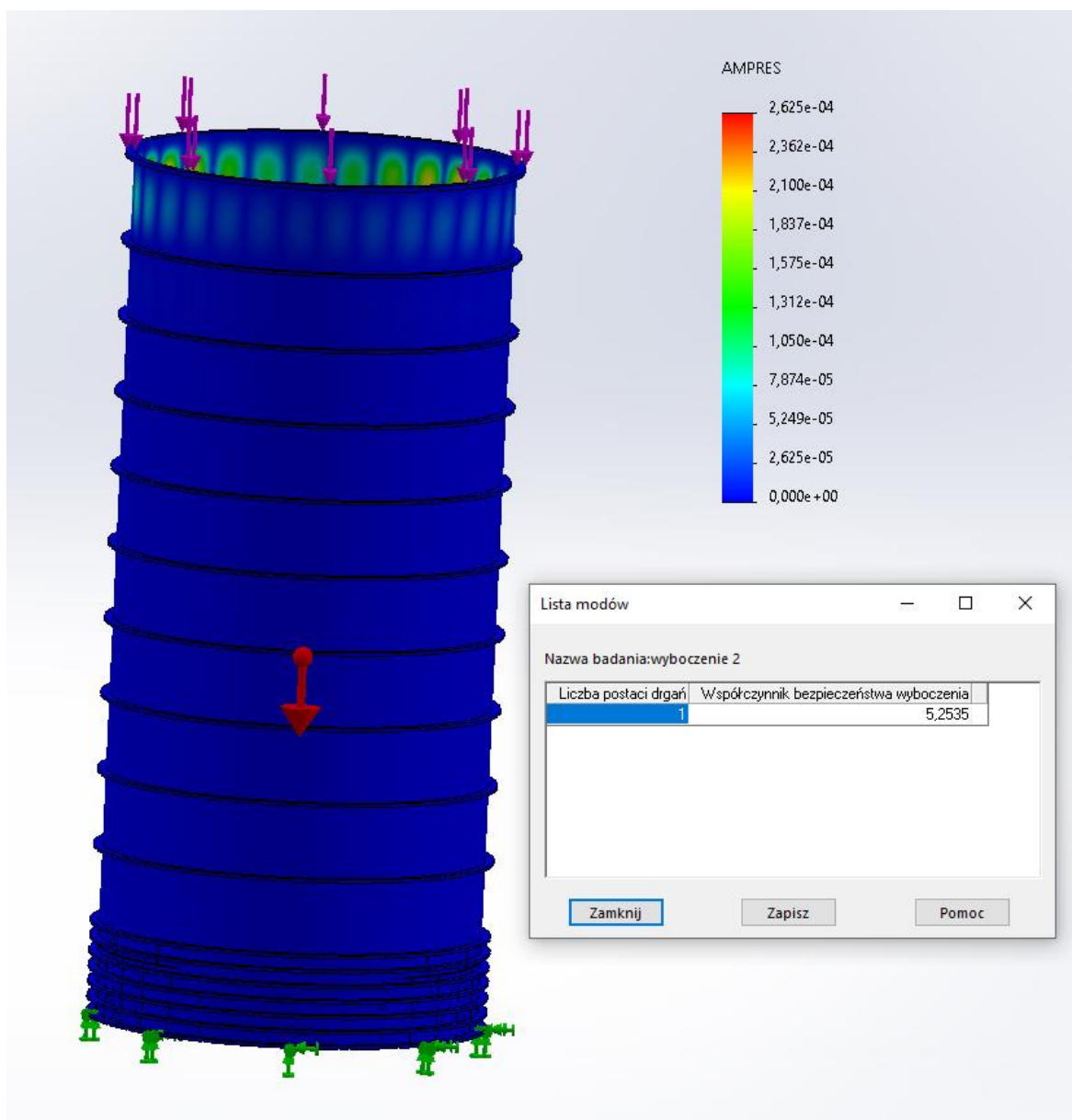
Tabela 5.2 Warianty analizy i obciążenia

Obciążenie	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4
	Wyboczenie przy ładowaniu	Wyboczenie przy rozładowywaniu	Ładowanie zasobnika	Rozładowywanie zasobnika
Ciśnienie w zasobniku MPa	8,1	7,9	8,1	7,9
Ciśnienie na zewnątrz zasobnika MPa	8,0	8,0	8,0	8,0
Grawitacja	tak	tak	tak	tak
Nacisk na ścianę pionową (kierunek normalny do ściany) Funkcja niejednorodnego rozkładu obciążenia w Solidworks względem lokalnego układu współrzędnych: $\{0 \cdot x + 0 \cdot z - 0.0047 \cdot (y^4) + 0.1577 \cdot (y^3) - 2.2016 \cdot (y^2) + 16.101 \cdot y + 0,1161\}$ x 1000 kN	nie	nie	tak	tak
Nacisk na ścianę pionową (kierunek normalny do ściany) Funkcja niejednorodnego rozkładu obciążenia w Solidworks względem lokalnego układu współrzędnych: $[0 \cdot x + 0 \cdot z - 0.0024 \cdot (y^4) + 0.0801 \cdot (y^3) - 1.1181 \cdot (y^2) + 8.1767 \cdot y + 0.059]$ x 1000 kN	nie	nie	tak	tak
Obciążenie dna zbiornika, [kN/m ²]	155	155	155	155
Izolacja termiczna, kg	4500	4500	4500	4500
Obciążenie od kompensatora, kN	100	100	100	100

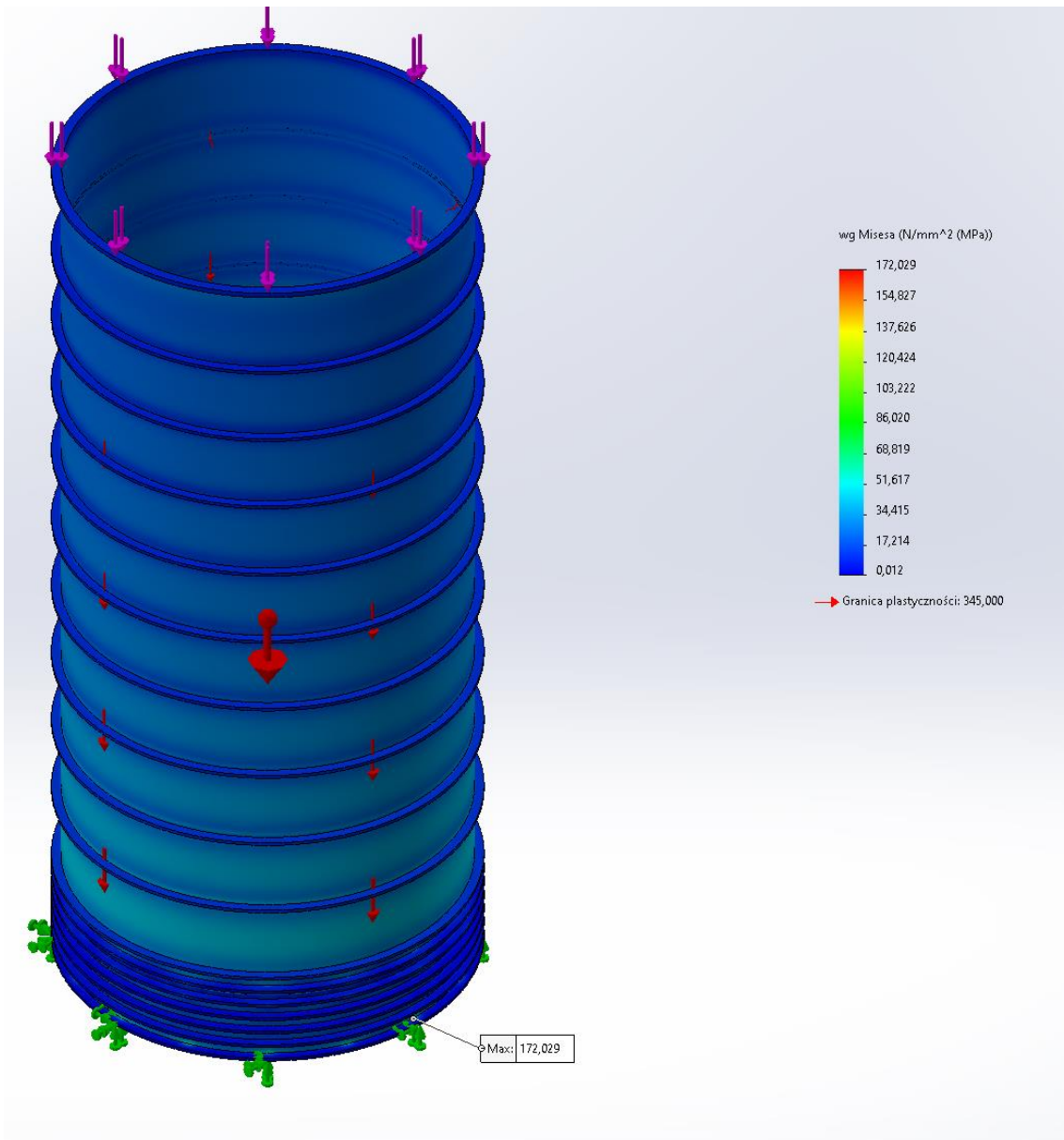
Wyniki wstępnej analizy mechanicznej dla poszczególnych wariantów obciążeń pokazano na rysunkach 5.27 - 5.34.



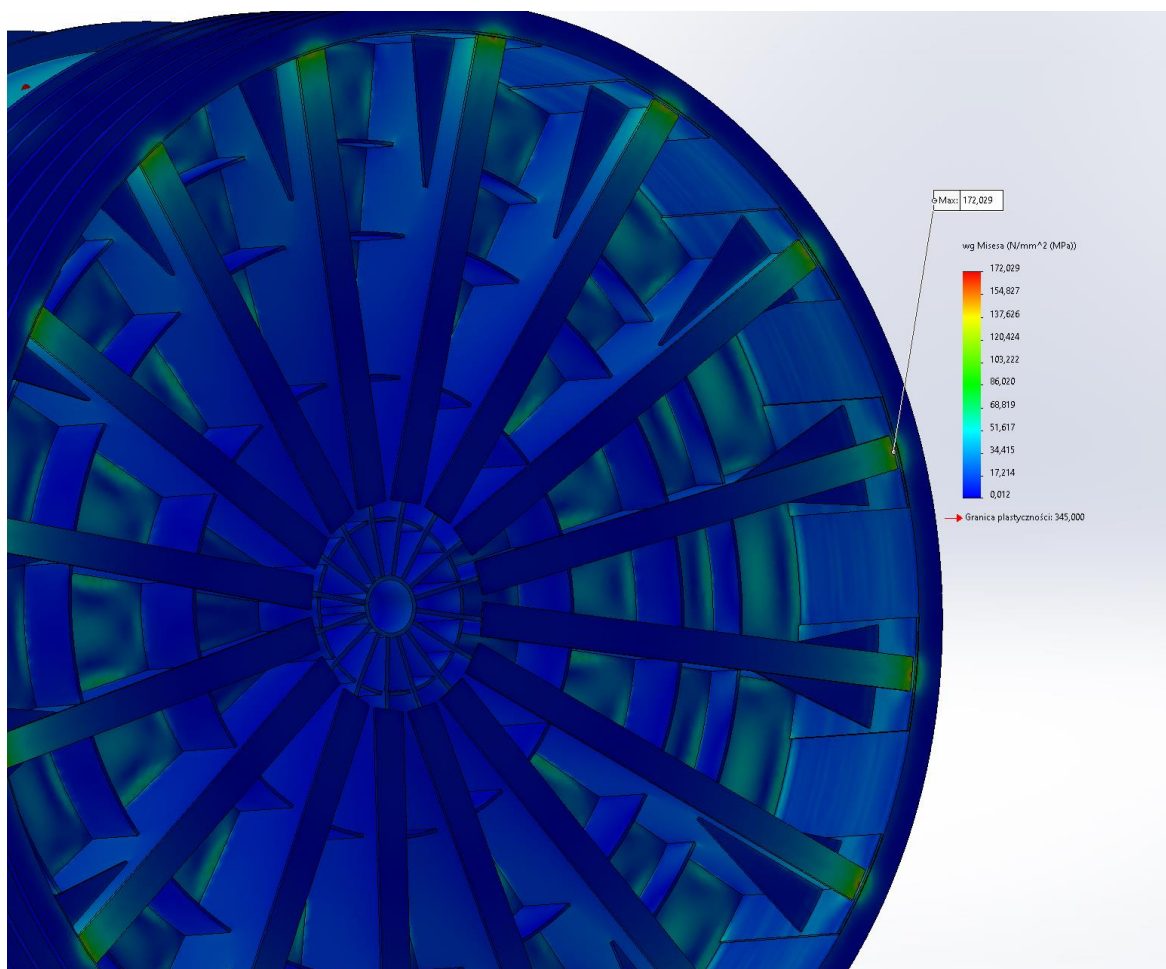
Rysunek 5.27 Wariant W1, ładowanie - oszacowany współczynnik bezpieczeństwa 9,97



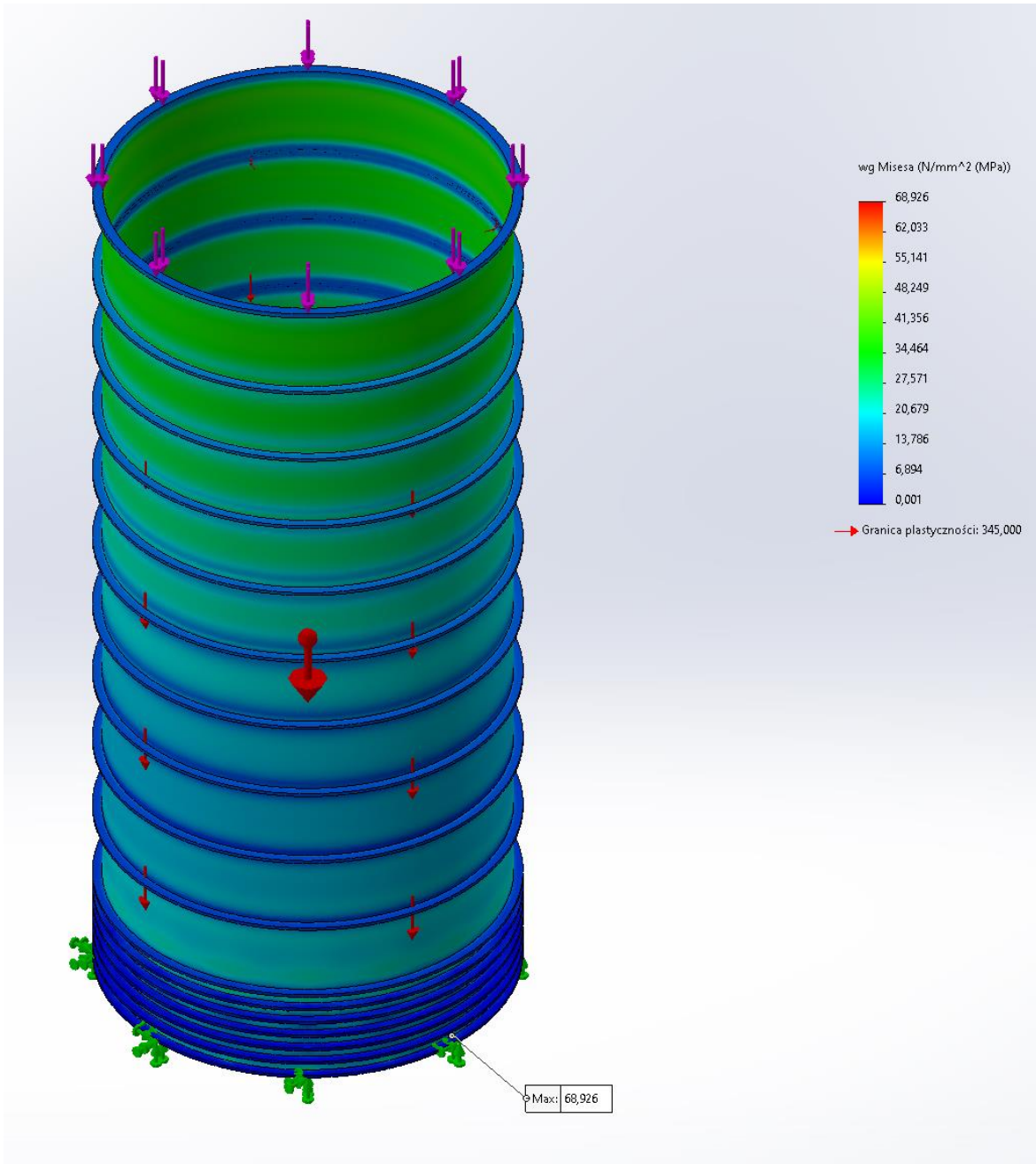
Rysunek 5.28 Wariant W2, rozładowywanie - oszacowany współczynnik bezpieczeństwa 5,25



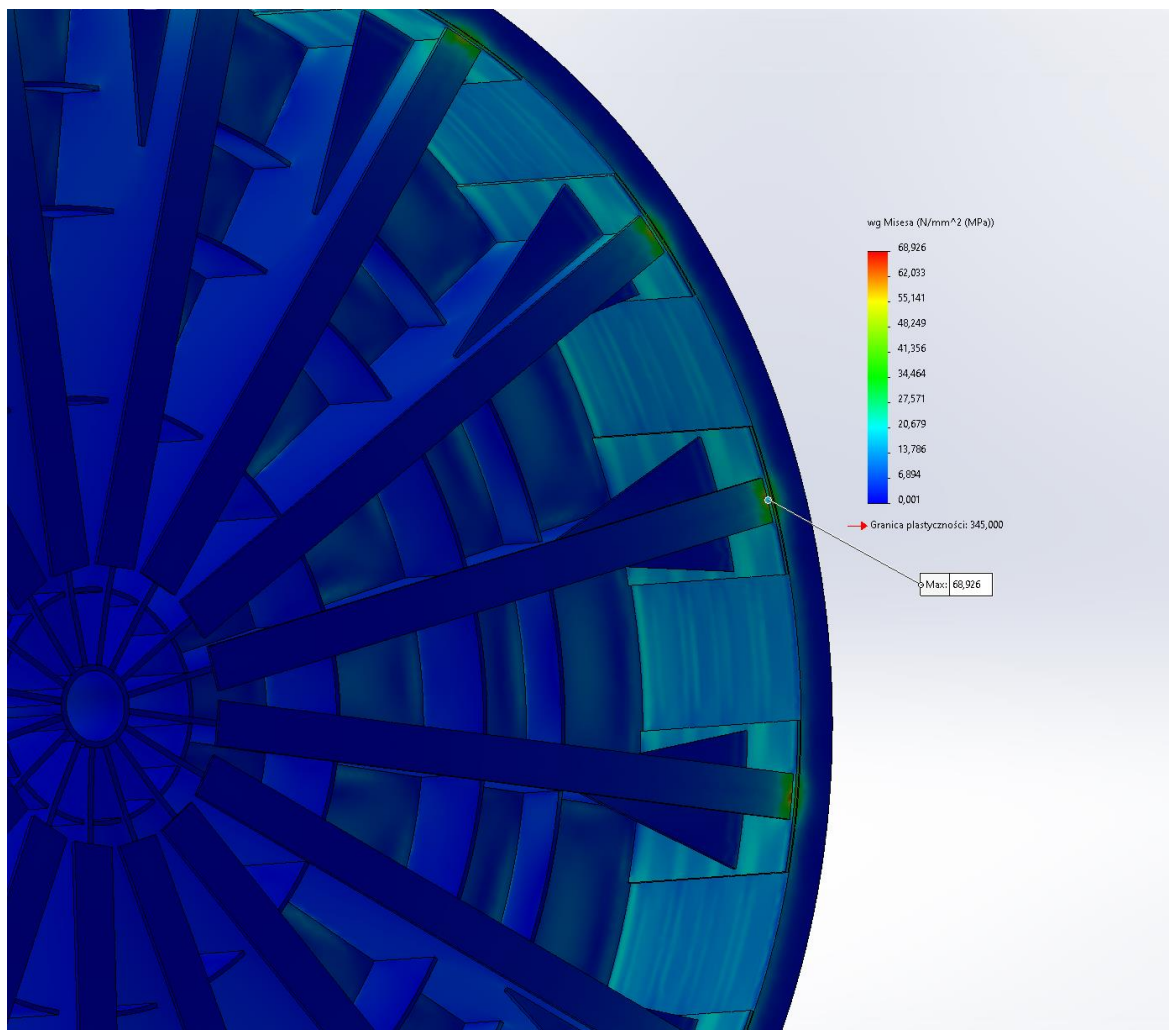
Rysunek 5.29 Wariant W3, ładowanie – rozkład naprężeń zredukowanych



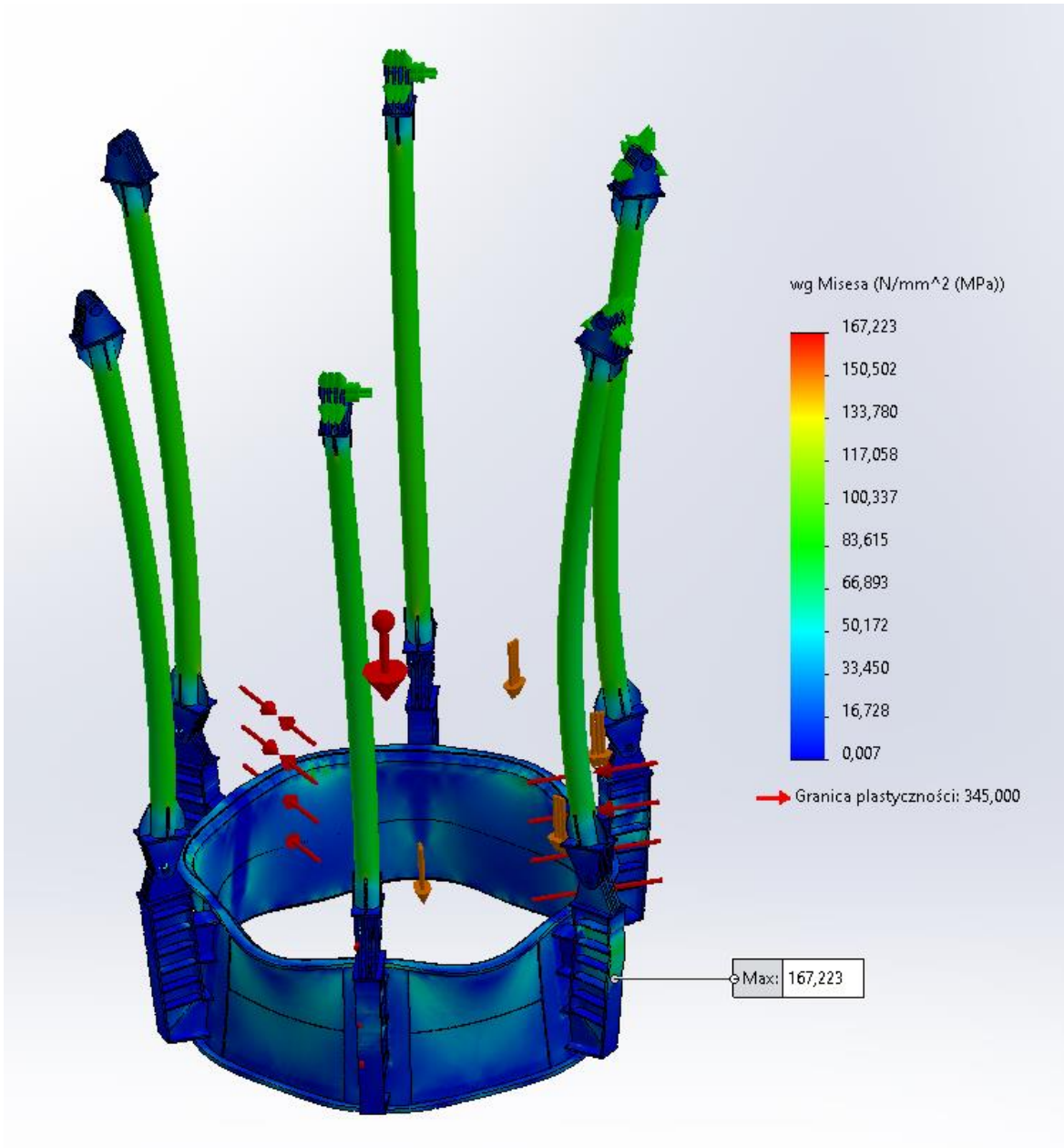
Rysunek 5.30 Wariant W3, rozładowywanie – widok na region występowania największych naprężeń



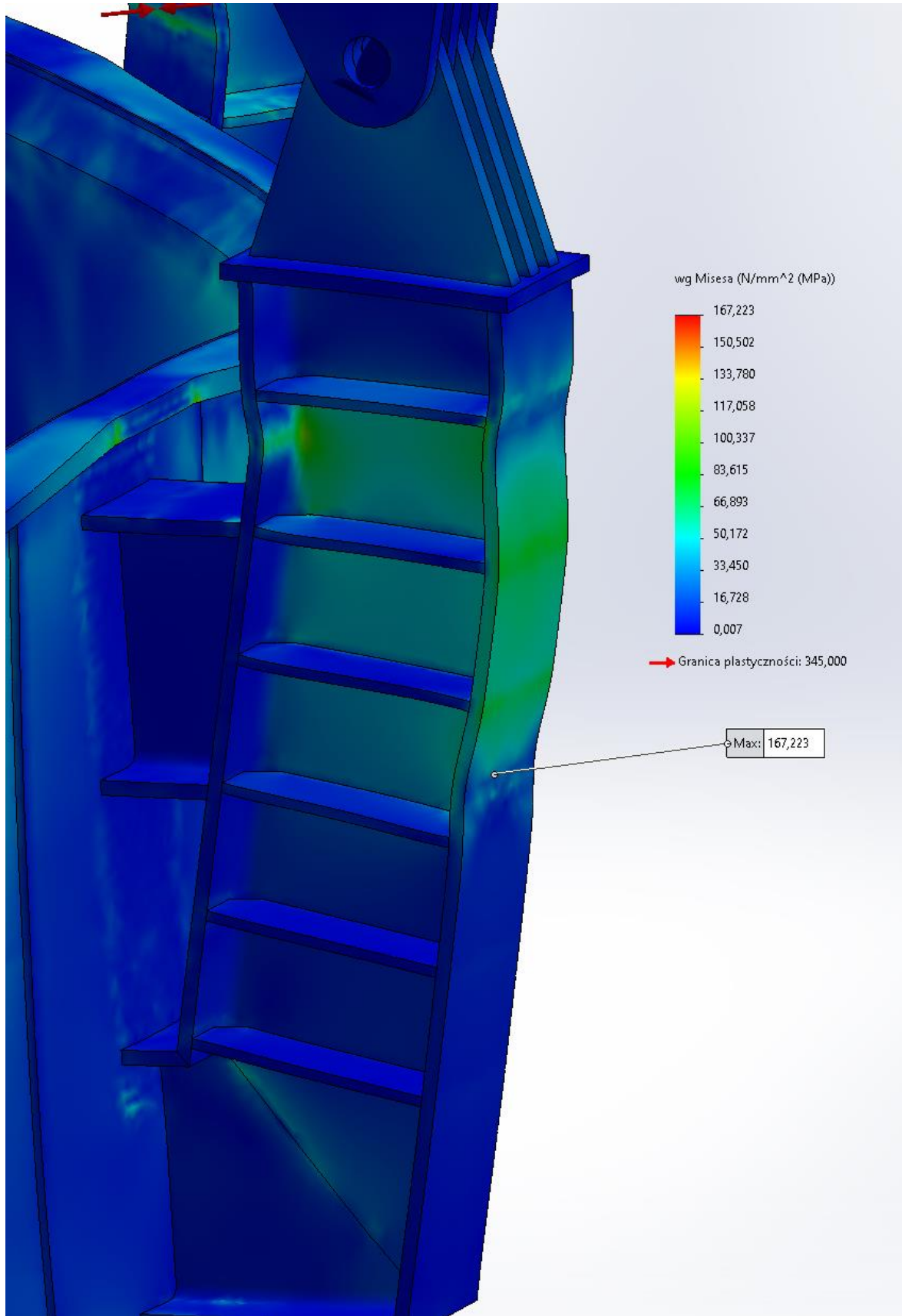
Rysunek 5.31 Wariant W4, rozładowywanie – rozkład naprężeń zredukowanych



Rysunek 5.32 Wariant W4, rozładowywanie – widok na rejon występowania największych naprężeń



Rysunek 5.33 Pierścień nośny – rozkład naprężeń zredukowanych



Rysunek 5.34 Pierścień nośny – widok na rejon występowania największych

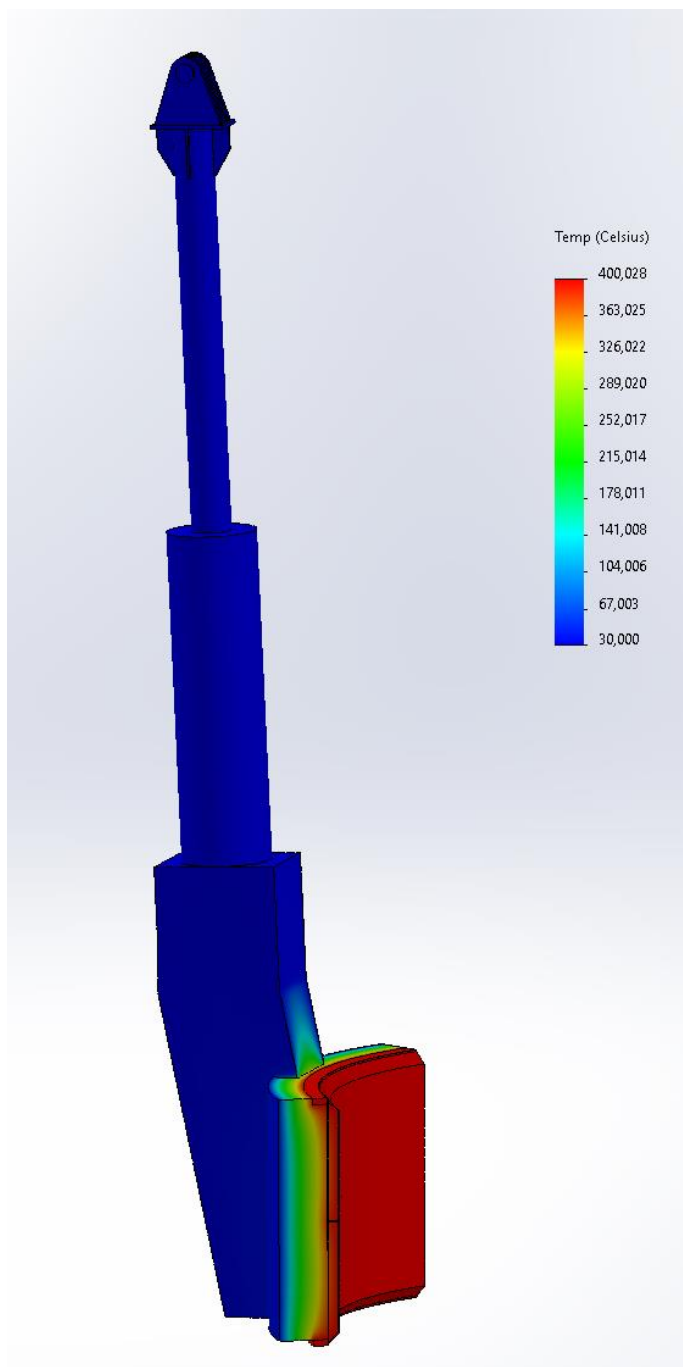
5.3.2. Wstępna analiza mostków termicznych konstrukcji nośnej zasobnika

W kolejnym kroku sprawdzono mostki termiczne w ciągu służącym do podwieszania segmentu TES. Analizie poddano wycinek pierścienia nośnego, zawierający ucho montażowe oraz ciągną.

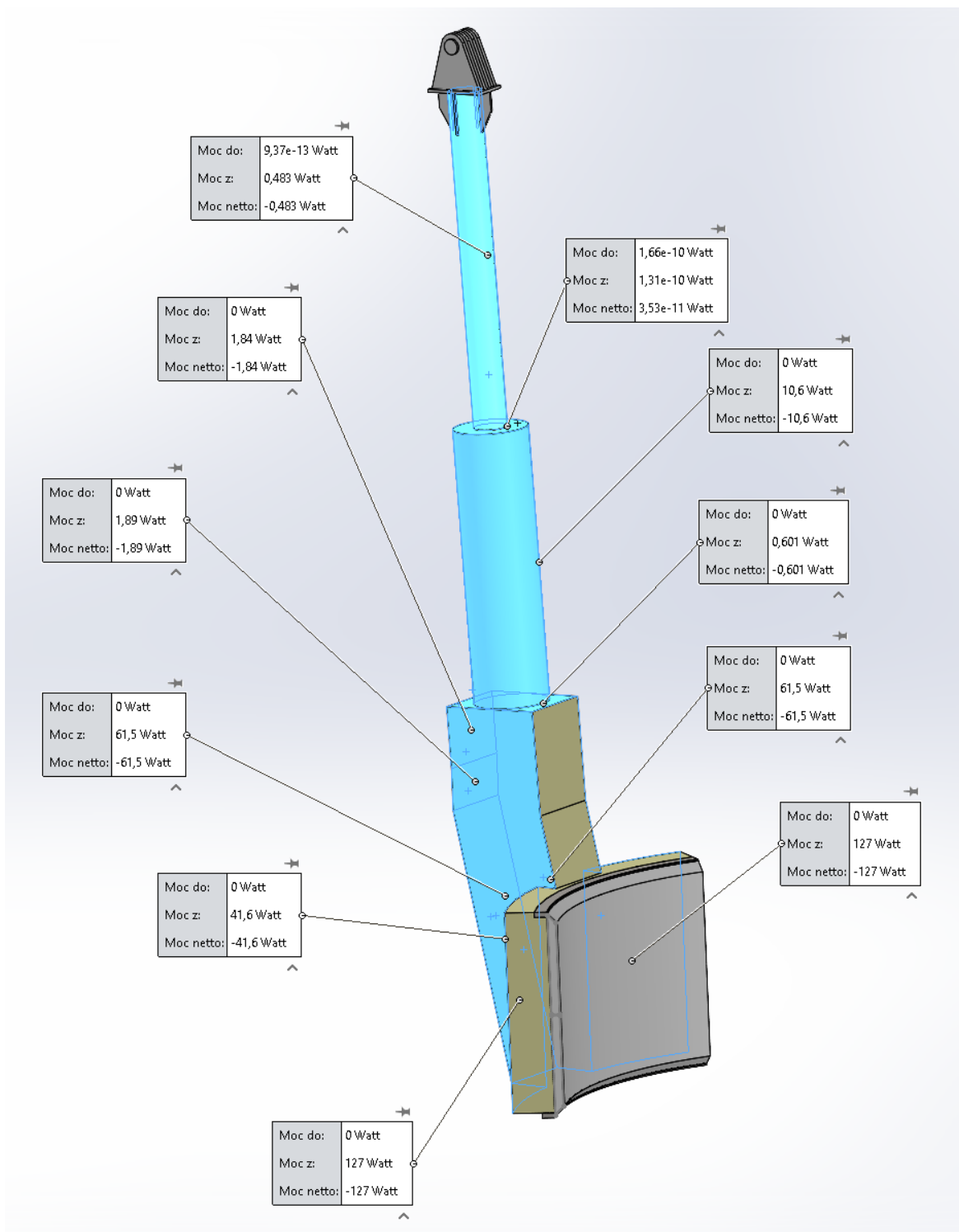
Przyjęto następujące założenia:

- temperatura wewnątrz pierścienia nośnego na poziomie 400 °C,
- temperatura powietrza w szybie 30 °C,
- izolacja termiczna z wełny mineralnej PAROC Pro Wired Mat WR 680 o grubości 200 mm,
- konwekcja swobodna na powierzchniach zewnętrznych izolacji oraz ciągną montażowego $\alpha=10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Rysunek 5.35 przedstawia rozkład temperatur w badanym fragmencie modelu, z którego wynika, że wysoka temperatura pracy systemu TES nie będzie przenosić się na główną konstrukcję nośną systemu TES - temperatura ścian zewnętrznych analizowanego fragmentu modelu wynosi około 35 °C. Oszacowana strata ciepła dla analizowanego fragmentu modelu wynosi około 600 W (patrz rysunek 5.36).



Rysunek 5.35 Rozkład temperatur w ciągnie montażowym TES



Rysunek 5.36 Straty ciepła w ciągnie montażowym TES

5.4. Analiza termodynamiczna dla systemu ACAES

5.4.1. Metodologia

Rysunek 5.37 przedstawia schemat ideowy rozpatrywanego układu, na którym zaznaczono punkty charakterystyczne. System przedstawiony na schemacie różni się tym od systemu przedstawionego na rysunku 5.2 tym, iż nie posiada pośredniego układu oleju termalnego przed wymiennikiem ciepłowniczym. Z uwagi na dużą różnicę temperatur pomiędzy sprężonym powietrzem, a wylotem z wymiennika po stronie magistrali ciepłowniczej, uznano, że takie uproszczenie nie wpłynie negatywnie na możliwość pozyskiwania ciepła dla celów ciepłowniczych.

Model termodynamiczny został zbudowany w środowisku MS Excel, wyposażonym w dodatek Coolprop. Wśród danych obliczeniowych są wielkości charakterystyczne dla maszyn i urządzeń, a w tym sprężarki, ekspandera, wymiennika ciepła, zbiornika ciśnieniowego (szybu) i systemu magazynowania ciepła. Wielkości te wraz z wartościami przyjętymi do analizy jako nominalne zestawiono w tabeli 5.3.

Zmiennymi decyzyjnymi w ramach analizy są:

- maksymalna temperatura za drugą sekcją sprężania, właściwa dla zakończenia etapu ładowania,
- najwyższe ciśnienie magazynowania sprężonego powietrza,
- stosunek najwyższego ciśnienia do najniższego ciśnienia magazynowania sprężonego powietrza.

Taki wybór zmiennych decyzyjnych został poprzedzony wstępnymi analizami, które wykazały wpływ tych wielkości na najważniejsze wskaźniki efektywności technicznej systemu magazynowania energii, takie jak pojemność energetyczna oraz sprawność magazynowania energii.

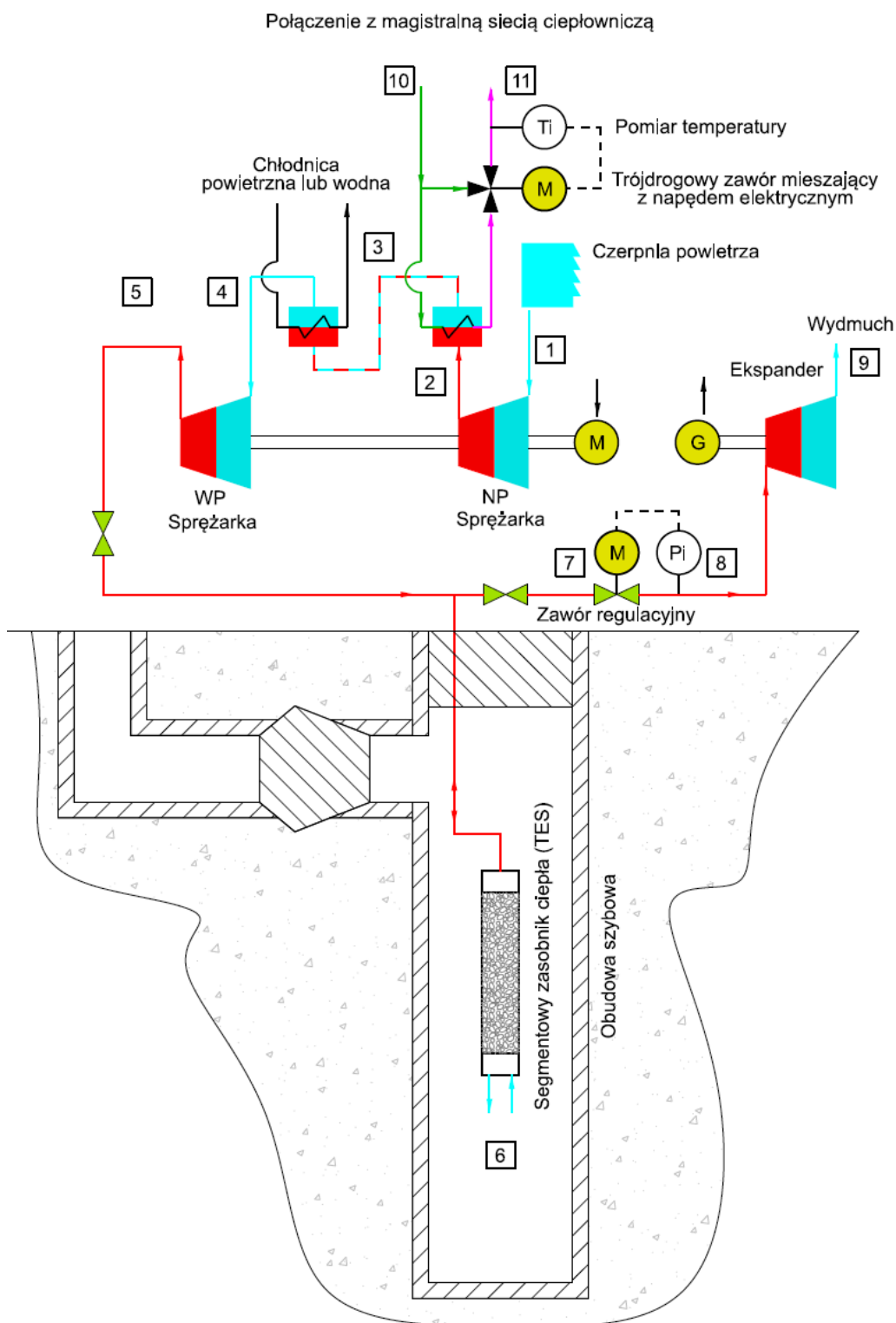
Proces obliczeniowy przy wykorzystaniu opracowanego modelu rozpoczyna się od określenia podziału łącznego stosunku ciśnień jaki realizuje sprężarka na stosunki ciśnień jakie realizowane mają być przez poszczególne sekcje sprężarki. Proces obliczeniowy, właściwy dla etapu ładowania, realizowany jest iteracyjnie i polega na takim doborze wielkości charakteryzujących sprężarkę (nominalne stosunki ciśnień dla dwóch sekcji), aby pod koniec procesu sprężania (osiągnięciu zakładanego

najwyższego ciśnienia magazynowania), kiedy sprężarka charakteryzuje się najwyższym realizowanym stosunkiem ciśnień, temperatura powietrza za drugą sekcją sprężarki osiągnęła założony maksymalny poziom. Iteracje realizowane są dla warunków pracy sprężarki w pełnym jej zakresie obciążenia, które wyznaczane jest przez dwa skrajne stopnie wypełnienia zbiornika ciśnieniowego. Te stopnie wypełnienia zdeterminowane są odpowiednio minimalnym (początek etapu ładowania) oraz maksymalnym ciśnieniem sprężonego powietrza (koniec etapu ładowania). Obliczenia dla procesu sprężania są realizowane z wykorzystaniem charakterystyk dwóch sekcji sprężarki, które uwzględniają zmianę sprawności izentropowej wraz ze zmianą ich obciążenia (ciśnienia na wylocie). W przypadku systemu z kompensacją wodną ciśnienie powietrza panujące w magazynie zmienia się w bardzo niewielkim zakresie, co też pozwala, na pracę sprężarki w bliskim otoczeniu punktu nominalnego.

W trakcie procesu ładowania systemu magazynowania energii do systemu TES trafia sprężone powietrze wysokotemperaturowe. Temperatura zmienia się zgodnie z charakterystyką pracy sprężarki, co jest determinowane ciśnieniem wzrastającym w miarę wypełniania zbiornika ciśnieniowego. Gorące powietrze przepływając przez złożę akumulacyjne systemu TES jest stopniowo chłodzone, aż do osiągnięcia założonej temperatury powietrza magazynowanego w objętości zbiornika ciśnieniowego. Potrzeba tak głębokiego wychłodzenia powietrza determinuje ilość materiału akumulacyjnego, jaka jest określana w toku obliczeń, a więc też wymagana dla umieszczenia w ramach zasobnika systemu TES o założonej geometrii. Określona ilość wymaganego materiału akumulacyjnego wymaga zastosowania odpowiedniej ilości segmentów systemu TES.

Dla etapu rozładowywania algorytm obliczeniowy ma za zadanie określenie parametrów powietrza zasilającego ekspander. W miarę opróżniania zbiornika ciśnieniowego powietrze opuszczające system TES charakteryzuje się coraz niższym ciśnieniem (wariant bez kompensacji wodnej). W rzeczywistych układach temperatura powietrza przez długi czas etapu rozładowywania byłaby stała i równa maksymalnej temperaturze magazynowania ciepła. Jednak pod koniec etapu rozładowywania temperatura istotnie by spadła. Uproszczeniem w ramach prowadzonych analiz jest założenie stałej temperatury powietrza na wylocie z systemu TES, która stanowi średnią temperaturę wynikającą z bilansu energii tego systemu. W analizowanym

systemie zakłada się wobec tego, że ekspander zasilany jest powietrzem o stałej temperaturze oraz stałym ciśnieniu, co jest możliwe dzięki zastosowaniu zaworu regulacyjnego. W algorytmie zawór realizuje proces dławienia izentalpowego.



Rysunek 5.37 Uproszczony schemat ideowy rozpatrywanego systemu ACAES wraz z punktami charakterystycznymi.

Czynnik roboczy

Czynnikiem roboczym jest powietrze, a model obliczeniowy proponowanego systemu ACAES wykorzystuje model gazu rzeczywistego -równanie stanu Peng-Robinsona:

$$p = \frac{R \cdot T}{V_m - b} - \frac{a \cdot \alpha}{V_m^2 + 2b \cdot V_m - b^2} \quad (5.19)$$

w którym:

$$a = 0.45724 \cdot \frac{R^2 \cdot T_c^2}{p_c}, \quad (5.20)$$

$$b = 0.07780 \cdot \frac{R \cdot T_c}{p_c}, \quad (5.21)$$

$$\alpha = \left(1 + \kappa \cdot \left(1 - T_r^{\frac{1}{2}} \right) \right)^2, \quad (5.22)$$

$$\kappa = 0.37464 + 1.54226 \cdot \omega - 0.26992 \cdot \omega^2, \quad (5.23)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}, \quad (5.24)$$

gdzie:

R	- indywidualna stała gazowa J/kgK,
T	- temperatura czynnika, K,
V_m	- objętość właściwa, m ³ /kg,
T_c	- temperatura punktu krytycznego, K,
P_c	- ciśnienie punktu krytycznego, Pa,
ω	- współczynnik acentryczny powietrza, -.

Sprężarka

Załączanie sprężonego powietrza do magazynu odbywa się za pomocą sprężarki dwusekcyjnej. Zastosowanie sprężarki dwusekcyjnej zostało wymuszone względami konstrukcyjnymi sprężarki oraz zasobnika z materiałem akumulacyjnym. Za pierwszą sekcją sprężarki zabudowany jest wymiennik ciepła, dzięki któremu możliwe jest schłodzenie powietrza przed wlotem do drugiej sekcji, która ostatecznie pozwoli uzyskać wysokie ciśnienie, korzystne dla magazynowania powietrza. Choć obniżenie

temperatury powietrza na wlocie do drugiej sekcji sprężarki pozwala na redukcję wartości jednostkowej pracy, co prowadzi do zmniejszenia energochłonności procesu sprężania w tej sekcji, to zastosowanie chłodzenia międzysekcyjnego jest również odpowiedzialne za wyprowadzenie ciepła z osłony kontrolnej systemu magazynowania energii, które najczęściej, również w systemach Huntorf oraz McIntosh, stanowi ciepło bezpowrotnie tracone. Zastosowanie chłodzenia międzysekcyjnego jest jednak obligatoryjne, bowiem jego brak skutkowałby przyrostem temperatury sprężanego powietrza ponad poziom gwarantujący bezpieczeństwo pracy sprężarki. Dla potrzeb analizy założono, że podział stosunku ciśnień, jaki realizowany jest przez sprężarkę, jest ukierunkowany na uzyskanie założonej temperatury powietrza opuszczającego drugą sekcję sprężarki. Poziom tej temperatury determinuje stopień podgrzewu materiału akumulacyjnego zabudowanego w systemie TES i jest kluczowy z punktu widzenia efektywności procesu magazynowania energii.

Moce wewnętrzne poszczególnych sekcji sprężarki wyznaczano za pomocą równań:

$$N_{iSNP} = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1), \quad (5.25)$$

$$N_{iSWP} = \dot{m}_a \cdot (h_5 - h_4). \quad (5.26)$$

Definicja sprawności izentropowej była podstawą dla określania parametrów powietrza po procesie sprężania:

$$\eta_{is} = \frac{h_{out_s} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}}, \quad (5.27)$$

gdzie:

h_{out_s}	- entalpia właściwa powietrza wylotowego ze sprężarki dla sprężania izentropowego, kJ/kg,
h_{out}	- entalpia właściwa powietrza wylotowego ze sprężarki, kJ/kg,
h_{in}	- entalpia właściwa powietrza wlotowego do sprężarki, kJ/kg.

Wymienniki ciepła

Jedynymi wymiennikami ciepła zabudowanymi w ramach systemu ACAES są chłodnice międzysekcyjne sprężarki. Pierwszy wymiennik, jaki zabudowany jest na

drodze powietrza, jest wymiennikiem ciepłowniczym, który podgrzewa wodę w magistrali sieci ciepłowniczej, a drugi wymiennik chłodzi ostatecznie sprężone powietrze przed drugą sekcją sprężania, z tą różnicą, że ciepło przejęte tutaj jest finalnie rozpraszane w otoczeniu, a więc nie stanowi produktu handlowego. Maksymalny strumień ciepła jaki jest możliwy do odebrania w wymienniku ciepłowniczym oblicza się ze wzoru:

$$\dot{Q}_{wc} = \eta_{wc} \cdot \dot{m}_a (h_2 - h_3), \quad (5.28)$$

gdzie:

η_{wc}	- sprawność wymiennika, -
\dot{m}_a	- strumień masowy sprężonego powietrza, kg/s,
h_2	- entalpia właściwa powietrza wylotowego z pierwszej sekcji sprężania, kJ/kg,
h_3	- entalpia właściwa powietrza za wymiennikiem ciepłowniczym, kJ/kg.

Dla określenia strumienia ciepła oddawanego przez powietrze w obrębie wymiennika ciepłowniczego, oprócz znajomości poziomu ciśnienia oraz składu powietrza, konieczne jest dodatkowo określenie temperatury do jakiej wychładzane jest powietrze w ramach tego wymiennika, bowiem $h_3 = h(T_3, p_3, z_i)$.

Dla wyznaczenia temperatury za wymiennikiem ciepłowniczym posłużono się wskaźnikiem efektywności cieplnej wymiennika, który jest dla niego zdefiniowany jako:

$$\varepsilon_{wc} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_{10}}. \quad (5.29)$$

Dla potrzeb analiz przyjęto efektywność cieplną wymiennika na poziomie 90%.

Ciepło powietrza, które nie zostało odebrane w wymienniku ciepłowniczym będzie rozpraszane do otoczenia za pośrednictwem chłodnicy wodnej albo chłodnicy powietrznej – w zależności od uwarunkowań terenowych.

Na potrzeby analizy przyjęto, że chłodnica obniża temperaturę sprężonego powietrza przed drugą sekcją sprężarki do wartości o 5 K wyższej od temperatury otoczenia:

$$T_4 = T_{ot} + 5. \quad (5.30)$$

System magazynowania ciepła

Wymaganą ilość segmentów systemu TES, która będzie zdolna do zmagazynowania ciepła powstającego w trakcie sprężania powietrza w drugiej sekcji sprężarki, wylicza się na podstawie równania:

$$n = \frac{1,2 \cdot \int_0^{\tau_c} \dot{m}_a \cdot (h_5 - h_6) d\tau}{V_{TES_n} \cdot \rho_b \cdot (1 - \varepsilon) \cdot cp_b \cdot (T_{max} - T_{min})} \quad (5.31)$$

gdzie:

\dot{m}_a	- strumień sprężonego powietrza przepływającego przez złożę, kg/s,
h_5	- entalpia powietrza wylotowego z pierwszej sekcji sprężania, kJ/kg,
h_6	- entalpia powietrza wewnątrz szybu, kJ/kg.
V_{TES}	- pojemność zasobnika (jeden segment), m ³ ,
ρ_b	- gęstość bazaltu, kg/m ³ ,
$cp_b = f(T_b)$	- ciepło właściwe bazaltu w funkcji temperatury [114], kJ/kgK,
T_{max}	- maksymalna temperatura złoża, K,
T_{min}	- minimalna temperatura złoża, K,

Materiał wypełnienia będzie wprowadzać opory przepływu w trakcie ładowania i rozładowywania systemu. Wyznaczenie oporów przepływu przez kompletny zasobnik jest istotne przede wszystkim z powodów konstrukcyjnych, gdyż łączna wartość strat ciśnienia będzie decydować o wartości ciśnienia rozerwania płytki bezpieczeństwa, której zadaniem jest zabezpieczenie zasobnika przed uszkodzeniem na skutek działania nadmiernego ciśnienia. Straty ciśnienia powietrza przepływającego przez złożę oblicza się na podstawie równania Erguna:

$$\Delta p = \left(\frac{150 \cdot \mu_a \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot v_a}{\varepsilon^3 \cdot D_b^2} + \frac{1,75 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_a \cdot v_a^2}{\varepsilon^3 \cdot D_b} \right) \cdot l_{TES} \quad (5.32)$$

w którym:

$$\mu_a = f(T_a, p_a), \quad (5.33)$$

$$\rho_a = f(T_a, p_a), \quad (5.34)$$

gdzie:

μ_a	- lepkość kinematyczna powietrza, m^2/s ,
v_a	- prędkość powietrza, m/s ,
ρ_a	- gęstość powietrza, kg/m^3 ,
ε	- porowatość złoża, -,
D_b	- średnia średnica cząstek złoża, m ,
l_{TES}	- długość kompletnego TES, m .

Magazyn sprężonego powietrza

Jako magazyn sprężonego powietrza służy szyb pokopalniany którego objętość wyznacza się na podstawie wzoru:

$$V_{sz} = H_{sz} \cdot \frac{\pi \cdot D_{sz}^2}{4} \quad (5.35)$$

gdzie:

H_{sz}	- wysokość czynna szybu pokopalnianego, m ,
D_{sz}	- średnica wewnętrzna szybu, m .

Ekspander

Z uwagi na konieczność zapewnienia stabilnych parametrów pracy, przed ekspanderem został zabudowany zawór regulacyjny, którego zadaniem jest utrzymywanie stałego ciśnienia na dolocie do ekspandera przy stałym strumieniu masowym sprężonego powietrza. W celu zapewnienia stabilnej regulacji ciśnienia w górnym położeniu regulatora (niskie ciśnienie dolotowe), należy zapewnić odpowiednią nadwyżkę ciśnienia dolotowego do zaworu. Dla zaworów o charakterystyce stałoprocentowej zakres stabilnej pracy mieści się w przedziale 10 ÷ 90%. W związku z powyższym minimalne ciśnienie w magazynie pod koniec etapu rozładowywania powinno spełniać warunek:

$$p_{6(\min)} \geq p_8 \cdot 1,1, \quad (5.36)$$

gdzie:

$p_{6(\min)}$	- minimalne ciśnienie w magazynie sprężonego powietrza (koniec etapu rozładowywania), Pa ,
---------------	--

p_7 - wymagane (założone) ciśnienie przed ekspanderem,
Pa.

Moc wewnętrzną ekspandera wyznacza się za pomocą równania:

$$N_{iE} = \dot{m}_a \cdot (h_9 - h_8). \quad (5.37)$$

Dla określenia entalpii powietrza opuszczającego ekspander wykorzystuje się definicję sprawności izentropowej:

$$\eta_{iE} = \frac{h_9 - h_8}{h_9 - h_{8s}}, \quad (5.38)$$

gdzie:

h_{8s} - entalpia powietrza wylotowego z ekspandera dla rozprężania izentropowego, kJ/kg,
 h_8 - entalpia powietrza wylotowego z ekspandera, kJ/kg,
 h_9 - entalpia powietrza wlotowego do ekspandera, kJ/kg.

Sprawność magazynowania energii dla pełnego cyklu pracy systemu ACES

Sprawność pełnego cyklu procesu magazynowania energii jest podstawowym wskaźnikiem dla oceny systemów. W przypadku analizowanych systemów adiabatycznych definicja tego wskaźnika efektywności energetycznej jest następująca:

$$\eta_{ESS} = \frac{\eta_{emE} \cdot N_{iE}}{\frac{1}{\eta_{emS}} \cdot (N_{iSNP} + N_{iSWP})}, \quad (5.39)$$

gdzie:

η_{emE} - sprawność elektromechaniczna ekspandera, -,
 η_{emS} - sprawność elektromechaniczna sprężarki, -.

Dla potrzeb oceny systemów, w których ciepło chłodzenia międzysekcyjnego w sprężarce wykorzystywane jest częściowo dla potrzeb ciepłownictwa, wykorzystano następującą definicję sprawności:

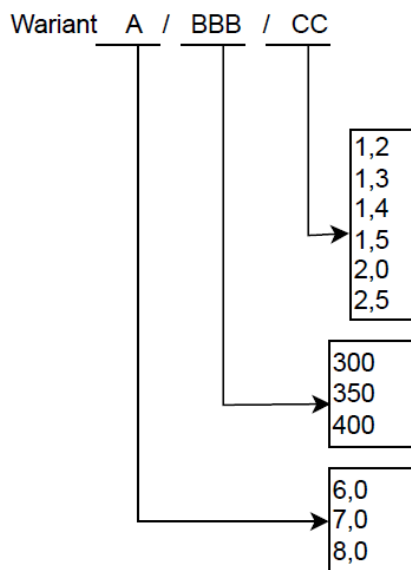
$$\eta_{ESS_wc} = \frac{\eta_{emE} \cdot N_{iE} + \dot{Q}_{wc}}{\frac{1}{\eta_{emS}} \cdot (N_{iSNP} + N_{iSWP})} \quad (5.40)$$

5.4.2. Założenia

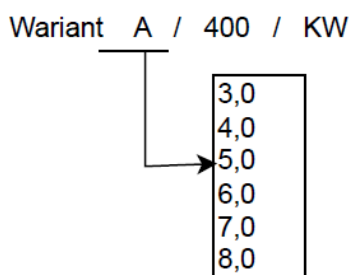
W oparciu o opracowaną metodologię wykonano wstępne obliczenia w celu zawężenia ilości możliwych kombinacji ciśnień i temperatur analizowanego systemu.

Dla systemu z izochorycznym zbiornikiem sprężonego powietrza wytypowano łącznie 54 kombinacje ciśnienia maksymalnego, stosunków ciśnień, oraz maksymalnej temperatury sprężonego powietrza za drugim stopniem sprężania, które służy jako nośnik energii do ładowania zasobnika ciepła. Natomiast dla systemu z izobarycznym zbiornikiem sprężonego powietrza wytypowano kombinacje jednej wartości temperatury i różnych wartości ciśnienia w zbiorniku – łącznie 6 kombinacji. Rysunek 5.38 oraz rysunek 5.39 przedstawia sposób oznaczeń dla wariantów obliczeniowych:

- Oznaczenie „A” – maksymalne ciśnienie w zbiorniku magazynowym,
- Oznaczenie „B” – maksymalna temperatura sprężonego powietrza za drugą sekcją sprężarki,
- Oznaczenie „C” – stosunek ciśnienia maksymalnego do minimalnego w zbiorniku magazynowym dla przypadku izochorycznego. Dla przypadku zbiornika izobarycznego występuje tylko oznaczenie „KW” (kompensacja wodna).

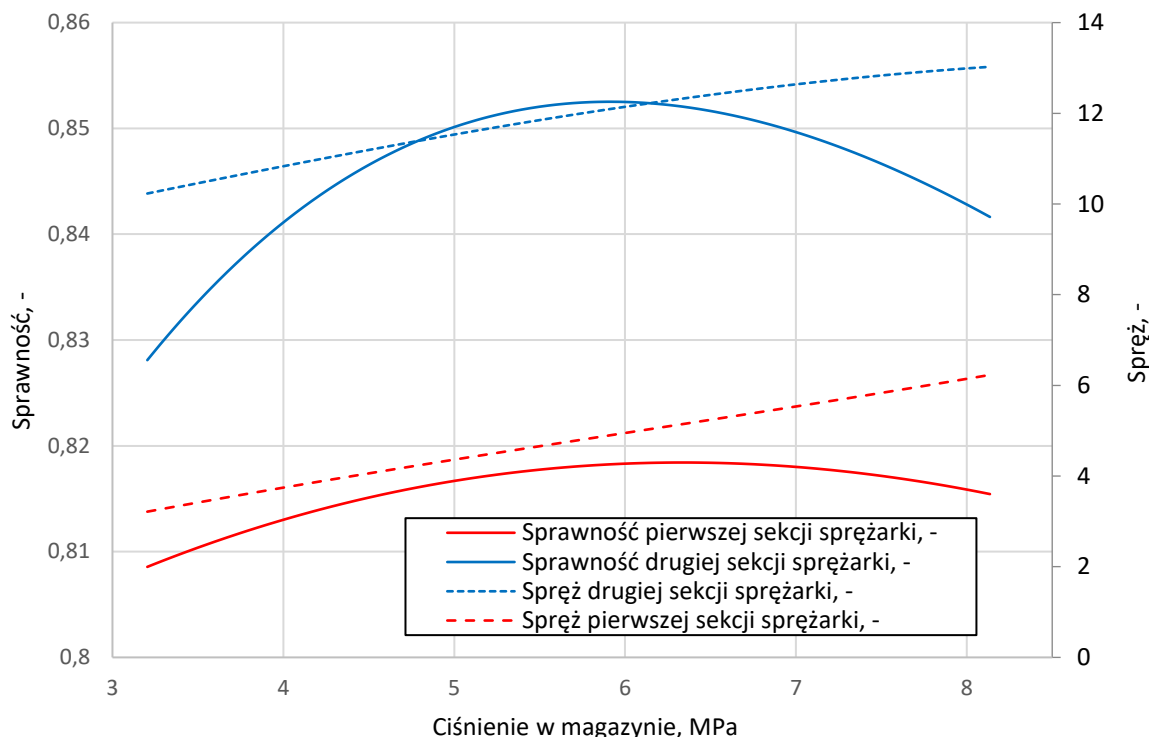


Rysunek 5.38 Sposób oznaczania wariantów dla kombinacji ciśnień i temperatury systemu ze zbiornikiem izochorycznym



Rysunek 5.39 Sposób oznaczania wariantów dla kombinacji ciśnień systemu ze zbiornikiem izobarycznym

Zbudowany model obliczeniowy zawiera charakterystyki sprawności oraz stosunku ciśnień dla obu sekcji sprężarki w funkcji ciśnienia w zbiorniku magazynowym. Sprawność sprężarki jest uwzględniana w obliczeniach na podstawie aktualnie panującego ciśnienia w zbiorniku magazynowym dla danego kroku czasowego. Nie rozróżnia się charakterystyk sprawności z uwagi na inne parametry, takie jak na przykład moc maszyny. Wartości maksymalne sprężu uzależnione są od założonej maksymalnej temperatury w fazie ładowania. Rysunek 5.40 przedstawia sprawność oraz sprężę sekcji sprężarki w funkcji ciśnienia w magazynie sprężonego powietrza dla maksymalnej temperatury sprężonego powietrza za drugą sekcją sprężarki na poziomie 400 °C.



Rysunek 5.40 Sprawność oraz sprężę sekcji sprężarki w funkcji ciśnienia w magazynie sprężonego powietrza

Przepływy masowe w systemie izochorycznym są pochodną założonych czasów pracy oraz poziomów ciśnień magazynowania, natomiast w systemie izobarycznym przyjęto przepływy na poziomie umożliwiającym wykorzystanie obecnie rozpatrywanej konstrukcji TES. Ograniczenie wynika tu z różnicy ciśnień pojawiającej się w fazie rozładowania.

W tabeli 5.3 zestawiono główne założenia, które zostały przyjęte do analizy. Tabela 5.4 przedstawia wartości zmiennych decyzyjnych, jakie były przyjmowane w trakcie obliczeń.

Tabela 5.3 Podstawowe parametry przyjęte do analizy systemu ACAES

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Czynnik roboczy	Powietrze	-
Wysokość efektywna szybu	900	m
Średnica szybu	5	m
Pojemność efektywna szybu	57000	m ³

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Temperatura otoczenia	20	°C
Ciśnienie otoczenia	101,325	kPa
Temperatura powietrza w szybie	30	°C
Sprawność izentropowa sprężarki	0,85	-
Sprawność izentropowa ekspandera	0,88	-
Sprawność elektromechaniczna sprężarki	0,98	-
Sprawność elektromechaniczna ekspandera	0,98	-
Wysokość wypełnienia segmentu TES złożem	10	m
Średnica wewnętrzna TES	5	m
Materiał złoża	Kruszywo bazaltowe	-
Średni rozmiar cząstek złoża	16	mm
Ciepło właściwe złoża (średnie)	920	J/kgK
Porowatość złoża	0,38	-
Gęstość właściwa	2650	kg/m ³
Temperatura wody przed wymiennikiem ciepłowniczym	70	°C
Temperatura wody za wymiennikiem ciepłowniczym	90	°C
Efektywność wymiennika ciepłowniczego	0,9	-
Różnica temperatur na zimnym końcu przeciwprądowego wymiennika ciepła zlokalizowanego przed drugą sekcją sprężarki	5	K

Tabela 5.4 Zmienne parametry przyjęte do analizy systemu ACAES

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Ciśnienie maksymalne w magazynie izochorycznym	6, 7, 8	MPa
Ciśnienie maksymalne w magazynie Izobarycznym	3, 4, 5, 6, 7, 8	MPa
Stosunek ciśnienia maksymalnego do minimalnego w magazynie izochorycznym	1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 2,0; 2,5	-
Temperatura TES	300, 350, 400	°C

Dodatkowe założenia przyjęte do analizy:

- szyb, w którym magazynowane jest sprężone powietrze traktowany jest jako izotermiczny,
- przy określeniu objętości roboczej magazynu nie uwzględniono elementów zabudowanych w objętości szybu (zasobnik TES wraz z wypełnieniem, konstrukcje wsporcze, dodatkowe rurociągi, itp.) oraz dodatkowych przestrzeni wpływających na jej powiększenie (komory szybowe, fragmenty chodników od komór szybowych do korków, itp.).
- pominięto opory przepływu w czerpni powietrza, rurociągach, armaturze odcinającej i wymiennikach za pierwszą sekcją sprężarki,
- przyjęto stały strumień sprężonego powietrza w trakcie ładowania systemu,
- do wyznaczenia mocy wymiennika ciepłowniczego, niezależnie od jego obciążenia przyjęto stałą, założoną wartość efektywności cieplnej dla tego urządzenia,
- wartość ciśnienia sprężonego powietrza przed ekspanderem założono na poziomie umożliwiającym osiągnięcie dodatnich temperatur na wyjścia z ekspandera wyższych lub równych od 5 °C,
- w przypadku kompensacji wodnej:
 - nie uwzględniono wymiany ciepła pomiędzy wodą, sprężonym powietrzem oraz obudową szybu,
 - pozostawiono zawór regulacyjny utrzymujący stałe ciśnienie przed ekspanderem.

5.4.3. Analiza wyników

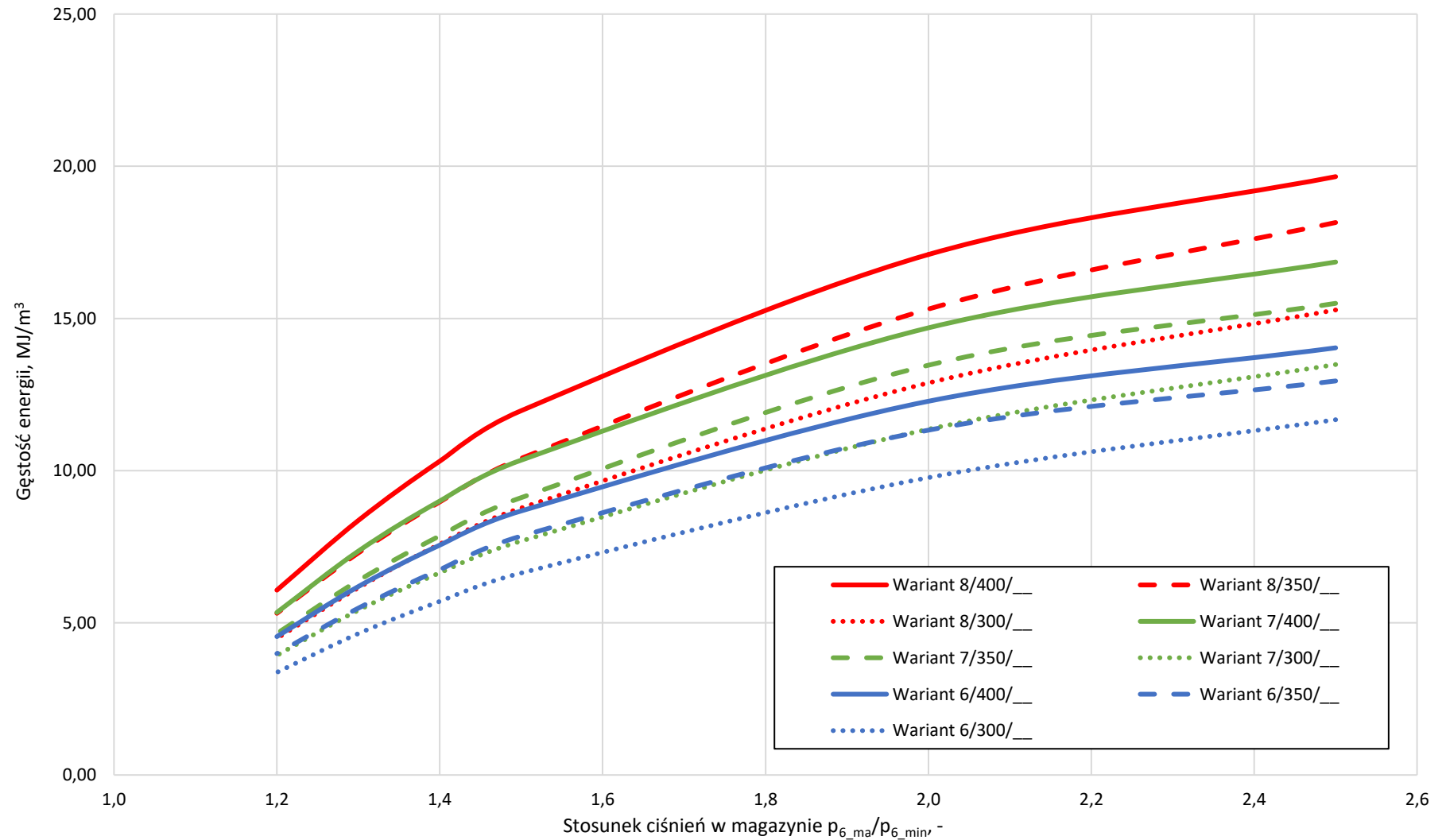
W przypadku systemu izochorycznego, wyniki są zgodne z oczekiwaniami. System ACAES o najwyższym stosunku ciśnień i najwyższej temperaturze sprężonego powietrza kierowanego do TES cechuje się najwyższą gęstością magazynowanej energii. Wraz ze zmniejszaniem stosunku ciśnień jak również zmniejszaniem temperatury gęstość energii spada. Rysunek 5.41 przedstawia tę zależność, a wzajemne położenie linii poszczególnych wariantów potwierdza, że w przypadku analizowanego systemu ACAES, to temperatura sprężonego powietrza, jest czynnikiem decydującym w znaczącej mierze o gęstości energii. Przykładowo, wariant 8/400/___ osiąga gęstość energii na poziomie $17,1 \text{ MJ/m}^3$ przy stosunku ciśnień 2,0, podczas gdy wariant o tym samym maksymalnym ciśnieniu, ale niższej temperaturze, na przykład wariant 8/300/___, osiąga tę samą wartość ale przy zdecydowanie wyższym stosunku ciśnień, wynoszącym około 2,4. Z kolei przy tym samym stosunku ciśnień wynoszącym 2,0, wariant 8/300/___ osiąga gęstość energii na poziomie $12,1 \text{ MJ/m}^3$, a więc o $4,2 \text{ MJ/m}^3$ mniej od wariantu 8/400/2,0.

Sytuacja zmienia się w kontekście sprawności układu (patrz równanie (5.39)), która w zależności od wariantu oraz przyjmowanych parametrów pracy wynosi od 47,6% do 68,5%. Najwyższe wartości znów są domeną wariantów o wysokich temperaturach pracy. Jednak to kombinacje o niższych ciśnieniach maksymalnych plasują się wyżej w danych grupach temperaturowych (patrz rysunek 5.42). Dla stosunku ciśnień 2,5 różnica w sprawności pomiędzy wariantem 8/400/___ a wariantem 6/400/___ wynosi ponad 1 punkt procentowy na korzyść tego drugiego (61,7% vs 62,9%). Dla wariantów 7/400/___, 8/400/___, 7/350/___ oraz 6/350/___ można zauważyć wyraźne przełamanie charakterystyki sprawności. Na prawo od punktu najwyższej sprawności system jest ograniczany minimalnym ciśnieniem magazynowania, względem którego dobierana jest nastawa zaworu regulacyjnego (patrz równanie (5.36)). Natomiast na lewo od tego punktu, system jest limitowany temperaturą sprężonego powietrza przed ekspanderem, która nie pozwala na realizację większych spadków entalpii.

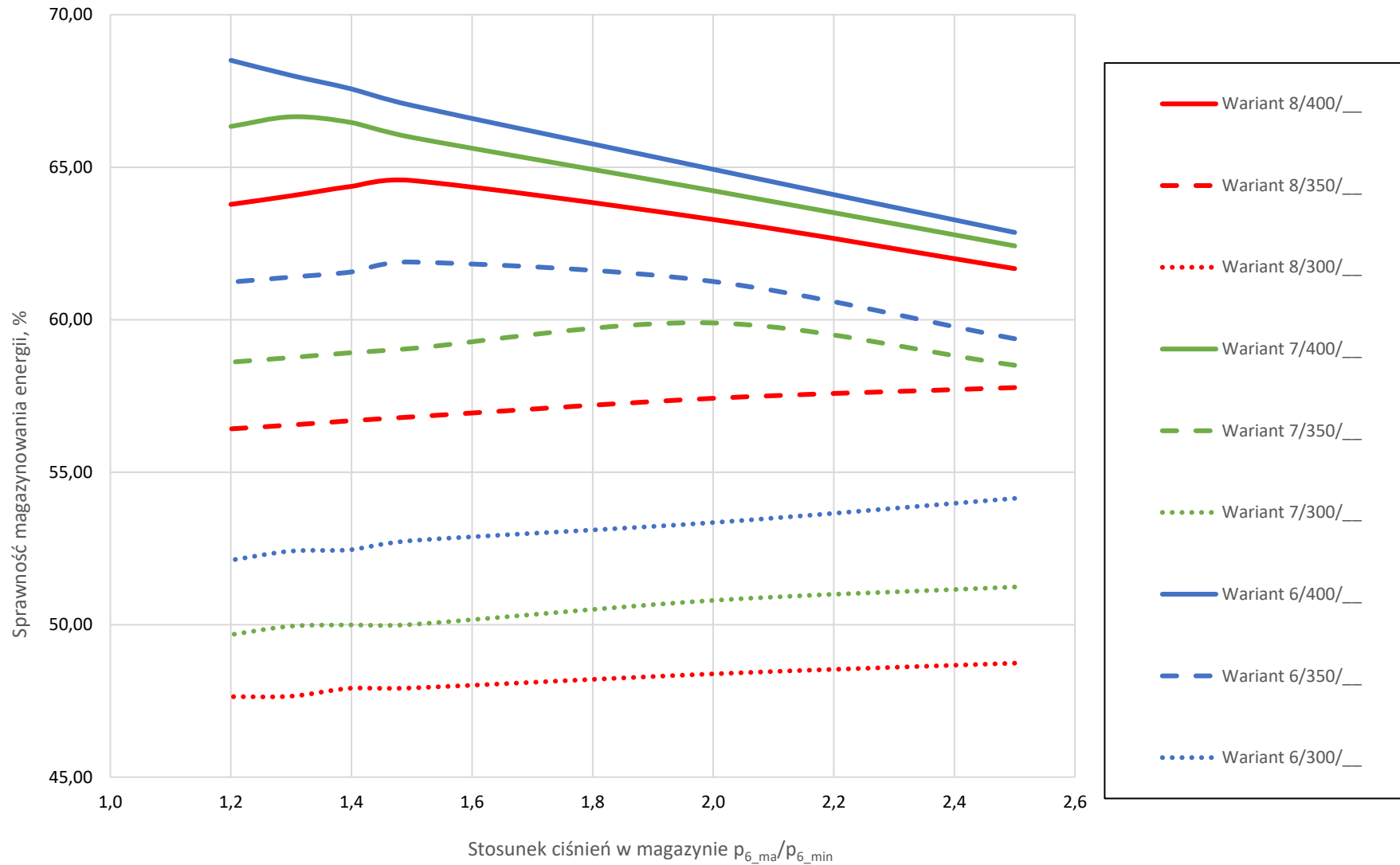
Rysunek 5.43 przedstawia sprawności systemów z uwzględnieniem wymiennika ciepłowniczego.

Sprawność systemu ACAES z odzyskiem ciepła wyraźnie spada wraz ze wzrostem stosunku ciśnienia w magazynie i to niezależnie od wariantu. Wynika to ze znacznie

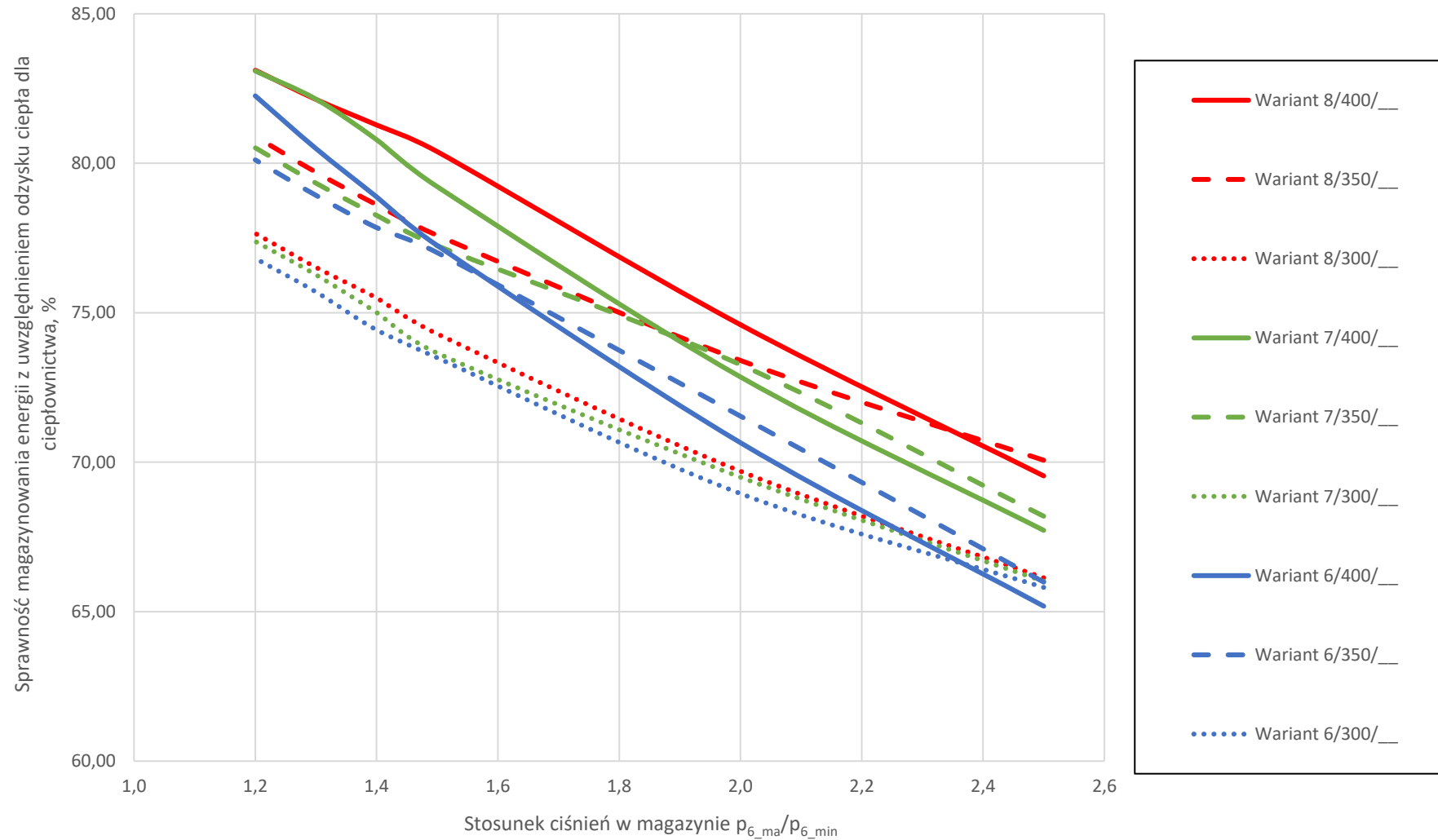
większego zapotrzebowania mocy sprężarki wraz ze wzrostem stosunku ciśnień, w porównaniu do mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego, która początkowo też wzrasta by po osiągnięciu pewnych parametrów zacząć spadać. Spadek mocy wymiennika ciepłowniczego spowodowany jest przyjętymi założeniami dotyczącymi jego doboru. Moc wymiennika została oszacowana dla najniższej temperatury sprężonego powietrza za pierwszą sekcją sprężarki, jaka wynika z wyznaczonego stosunku ciśnień w magazynie, oraz dla stałej różnicy temperatur wody. W związku z tym, wymiennik jest w stanie podnieść temperaturę czynnika do wymaganego poziomu w każdym momencie trwania etapu ładowania. Gdyby wymiennik został dobrany dla najwyższej temperatury, to przy zachowaniu stałego przepływu masowego wody, osiągałby pełne parametry dopiero pod koniec fazy ładowania



Rysunek 5.41 Wykres gęstości energii systemu ACAES w funkcji stosunku ciśnień w magazynie z podziałem na warianty.



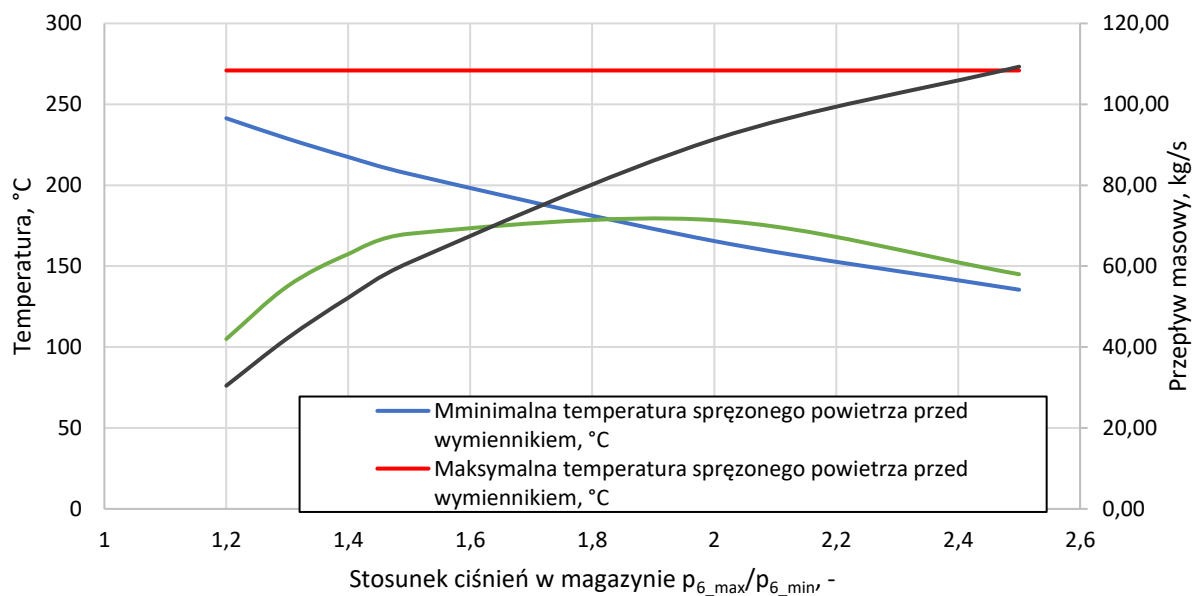
Rysunek 5.42 Wykres sprawności systemu ACAES w funkcji stosunku ciśnień w magazynie z podziałem na warianty.



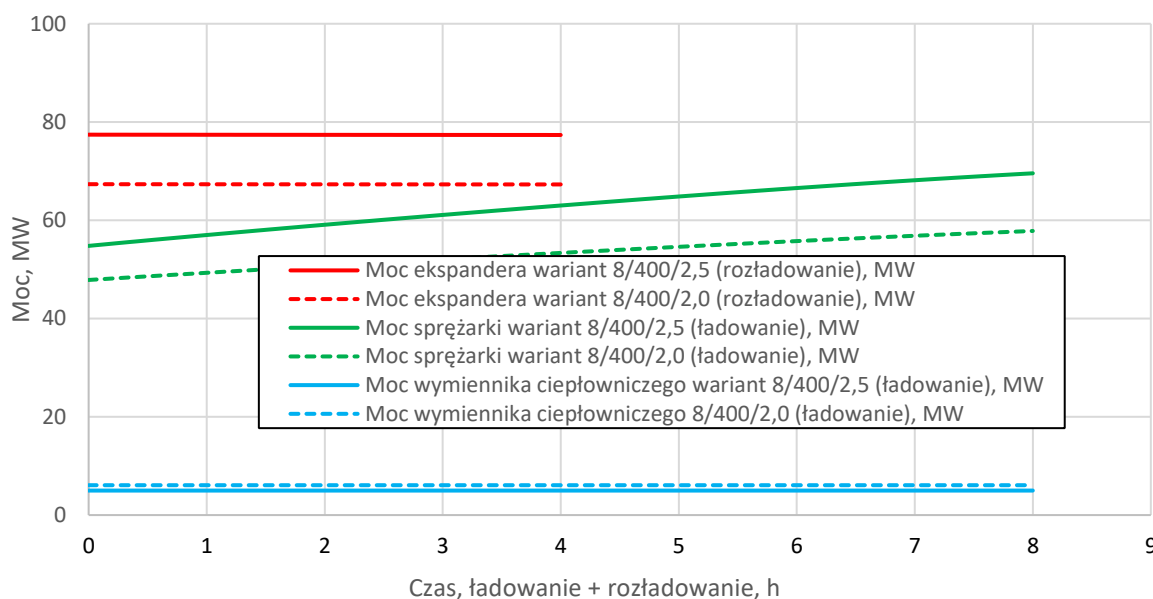
Rysunek 5.43 Wykres sprawności systemu ACAES z odzyskiem ciepła w funkcji stosunku ciśnień w magazynie z podziałem na warianty.

Rysunek 5.44 przedstawia przepływy masowe sprężonego powietrza i wody w wymienniku ciepłowniczym oraz minimalną i maksymalną temperaturę za pierwszą sekcją sprężarki, dla różnych stosunków ciśnień w magazynie, dla wariantu 8/400/__. Na wykresie tym widać, że przy stosunku ciśnień w magazynie na poziomie 1,2, minimalna temperatura za pierwszą sekcją sprężania wynosi około 240 °C i panuje ona przy dolnym ciśnieniu magazynowania. Wraz ze wzrostem ciśnienia w magazynie wzrasta temperatura sprężonego powietrza na wyjściu z sekcji sprężarki i osiąga maksymalną wartość 270 °C. Jak widać, wartość maksymalna jest niezmienna dla poszczególnych stosunków ciśnień, co wynika z dobranej sprężarki drugiej sekcji sprężarki, która została dobrana tak, aby było możliwe osiągnięcie założonej temperatury za tą sekcją, która w tym wariantcie wynosi 400 °C.

Wraz ze wzrostem stosunku ciśnień w magazynie maleje temperatura sprężonego powietrza za pierwszą sekcją sprężarki przy jednoczesnym wzroście strumienia masowego sprężonego powietrza, z uwagi na konieczność dostarczenia większej masy powietrza w tym samym czasie w fazie ładowania w każdym z wariantów. Takie przebiegi krzywych skutkują tym, że moc wymiennika przy stosunkach od 2,0 do 2,5 zaczyna spadać, co pokazano na rysunku 5.45.



Rysunek 5.44 Wykres przepływów masowych w wymienniku ciepłowniczym oraz minimalne i maksymalne temperatury sprężonego powietrza za pierwszą sekcją sprężarki w funkcji stosunku ciśnień w magazynie dla wariantu 8/400/__



Rysunek 5.45 Wykres przebiegów mocy sprężarek, ekspanderów i wymienników ciepłowniczych w trakcie cykli dla wariantów 8/400/2,0 i 8/400/2,5

Analizując przebiegi krzywych mocy sprężarek i ekspanderów na podstawie rysunku 5.45 widać wyraźny wzrost zapotrzebowania mocy sprężarki w fazie ośmiogodzinnego ładowania, spowodowany wzrostem stosunku ciśnień. Porównując wariant 8/400/2,0 z wariantem 8/400/2,5 widać wyraźną różnicę w przebiegu krzywych poboru mocy sprężarek. Wariant 8/400/2,5 zaczyna fazę ładowania z mniejszym sprężeniem, co przekłada się na relatywnie niższą pracę sprężania.

Krzywa mocy ekspandera w obu przypadkach ma przebieg praktycznie liniowy, ze stałą wartością w trakcie całej czterogodzinnej fazy rozładowywania, co jest następstwem zabudowy w instalacji zaworu regulacyjnego, odpowiedzialnego za utrzymywanie stałego ciśnienia przed ekspanderem.

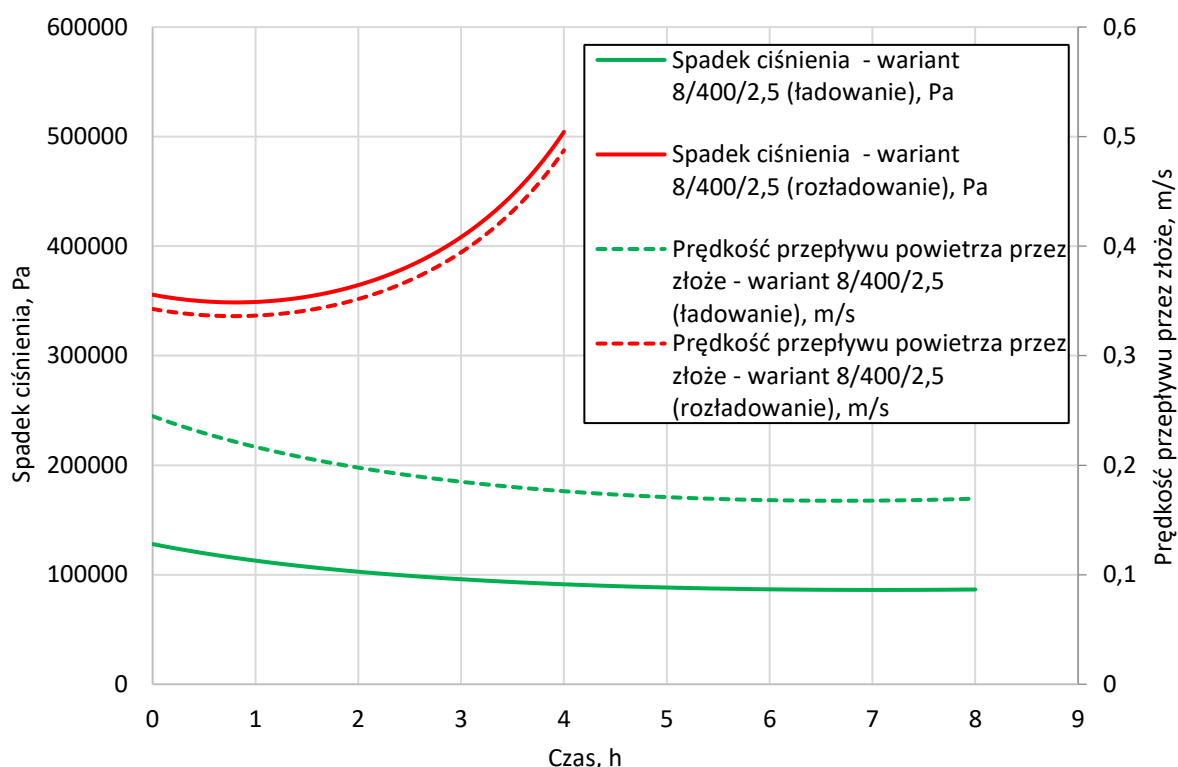
Rysunek 5.46 oraz rysunek 5.47 przedstawiają wykresy spadków ciśnienia oraz prędkości przepływu sprężonego powietrza przez wszystkie segmenty zabudowanego TES odpowiednio w wariantach 8/400/2,5 oraz 8/400/1,4. Do omówienia wyników wybrano te dwa warianty jako najbardziej skrajne.

Zgodnie z przyjętą metodologią spadki ciśnienia zostały obliczone z uwzględnieniem zmian lepkości kinematycznej oraz gęstości w funkcji temperatury.

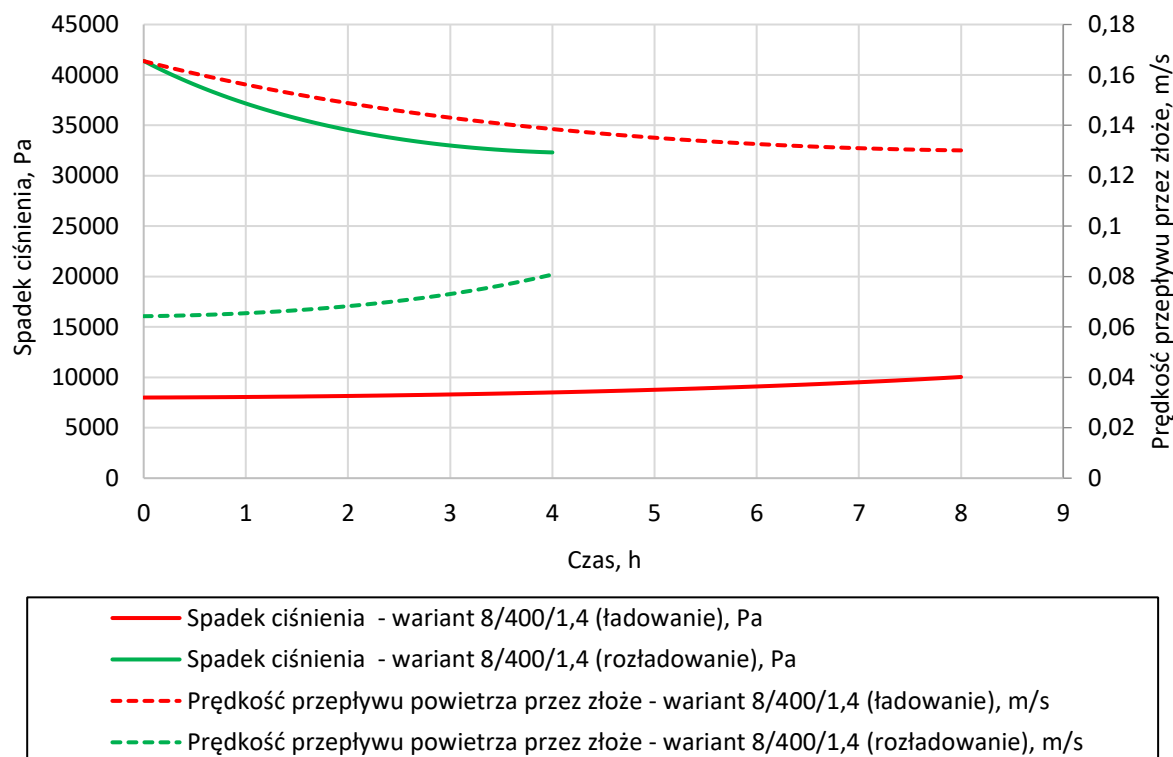
Jak wynika z rysunku 5.41 gęstość energii dla wariantu 8/400/1,4 wynosi około

10,3 MJ/m³, a dla wariantu 8/400/2,5 jest to już wartość 19,7 MJ/m³ co przekłada się na wymaganą ilość segmentów TES, wynoszącą odpowiednio 6 i 12 sztuk, których ilość ma decydujący wpływ, obok zakresu ciśnień roboczych, na spadki ciśnienia. Natężenie przepływu różni się pomiędzy fazą ładowania i rozładowywania w stosunku 1:2, co wynika z przyjętych czasów pracy sprężarek i ekspandera.

Na podstawie wartości spadków ciśnienia dla poszczególnych wariantów zestawionych w tabeli 5.5 i tabelach w załączniku 2 można zauważyć, że temperatura do jakiej wygrzewane jest złożo ma marginalny wpływ na wartość maksymalnych oporów przepływu, które dopiero zaczynają od siebie odbiegać dla wariantów ze stosunkami ciśnień 1,2, 1,3 oraz 1,4 w różnych grupach temperaturowych.

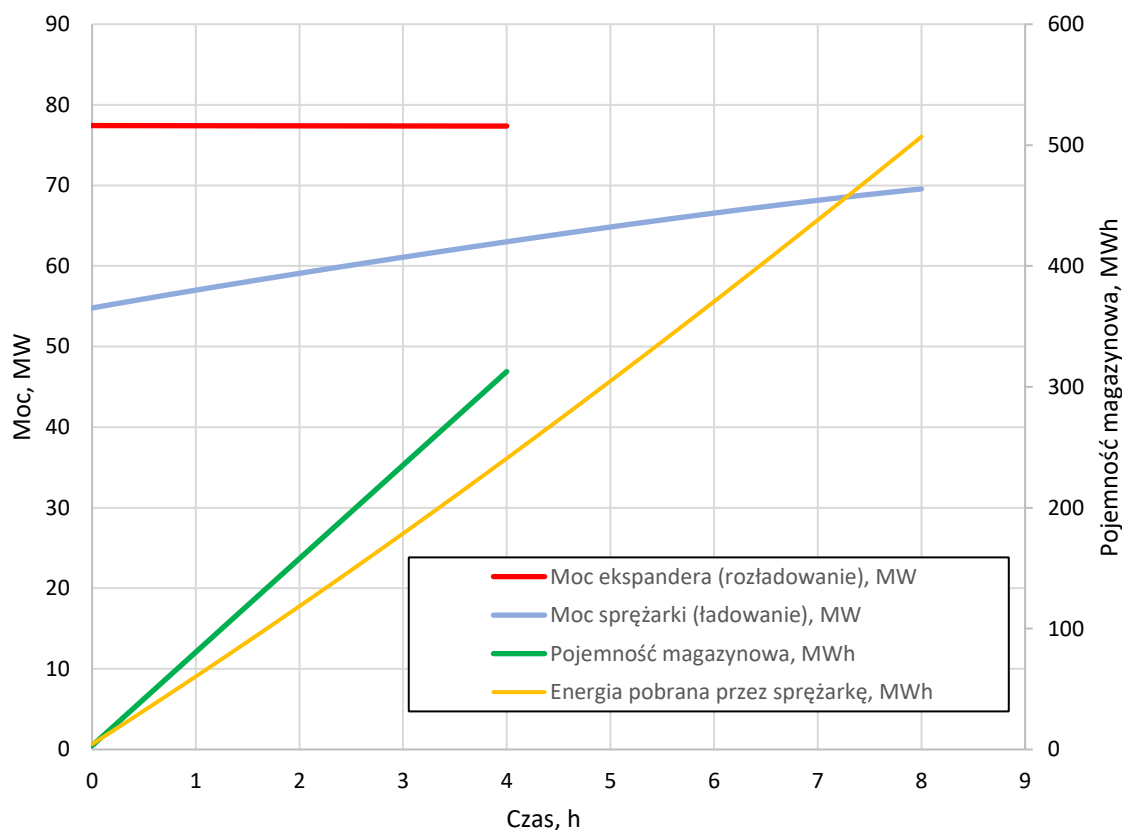


Rysunek 5.46 Wykres prędkości przepływu oraz oporów przepływu w złożu TES dla wariantu wariant 8/400/2,5



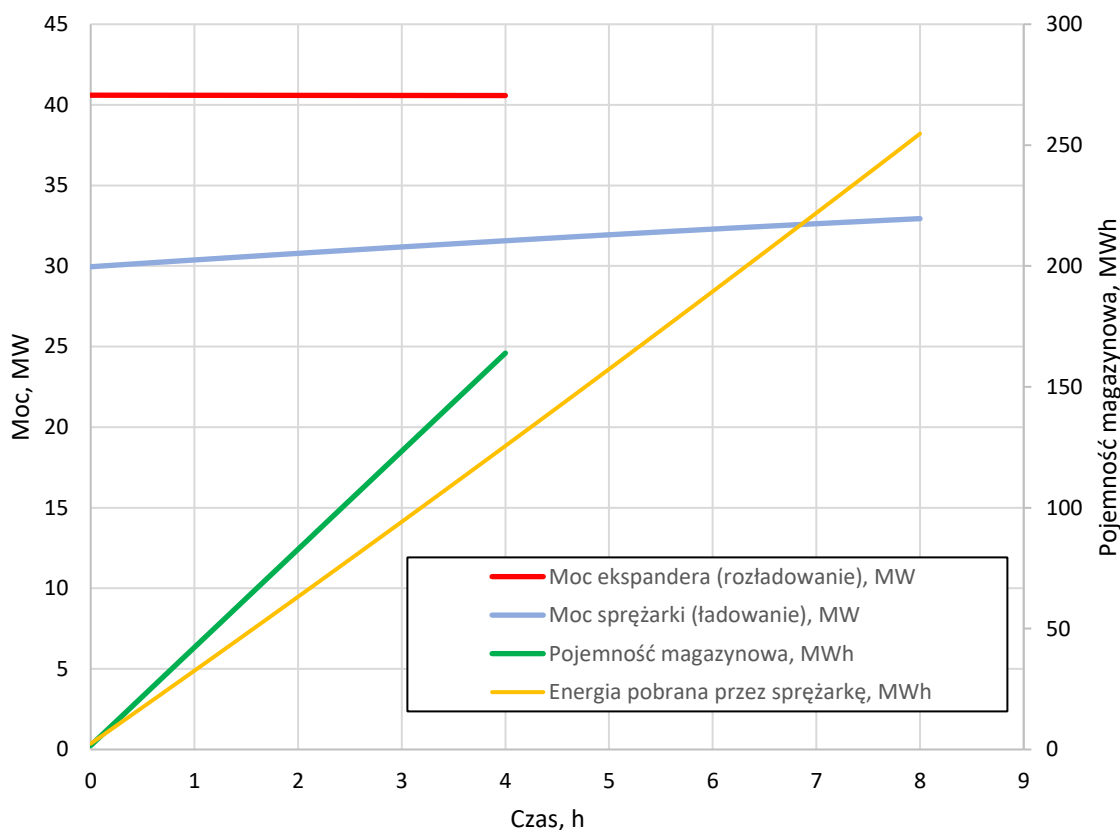
Rysunek 5.47 Wykres prędkości przepływu oraz oporów przepływu w złożu TES dla wariantu wariant 8/400/1,4

Rysunek 5.48 przedstawia zmiany mocy sprężarki i ekspandera oraz poziom naładowania magazynu w trakcie trwania cyklu, dla wariantu 8/400/2,5.



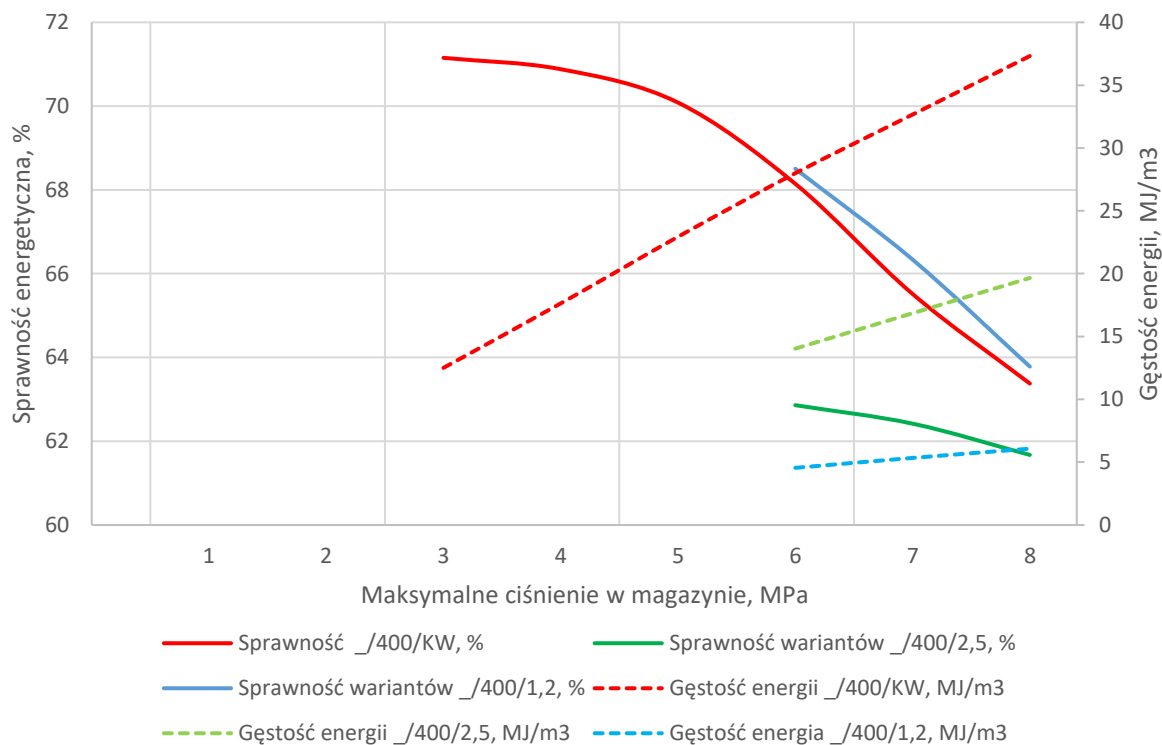
Rysunek 5.48 Wariant 8/400/2,5. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu

Rysunek 5.51 przedstawia zmiany mocy sprężarki i ekspandera oraz poziom naładowania magazynu w trakcie trwania cyklu, dla wariantu 8/400/1,4.



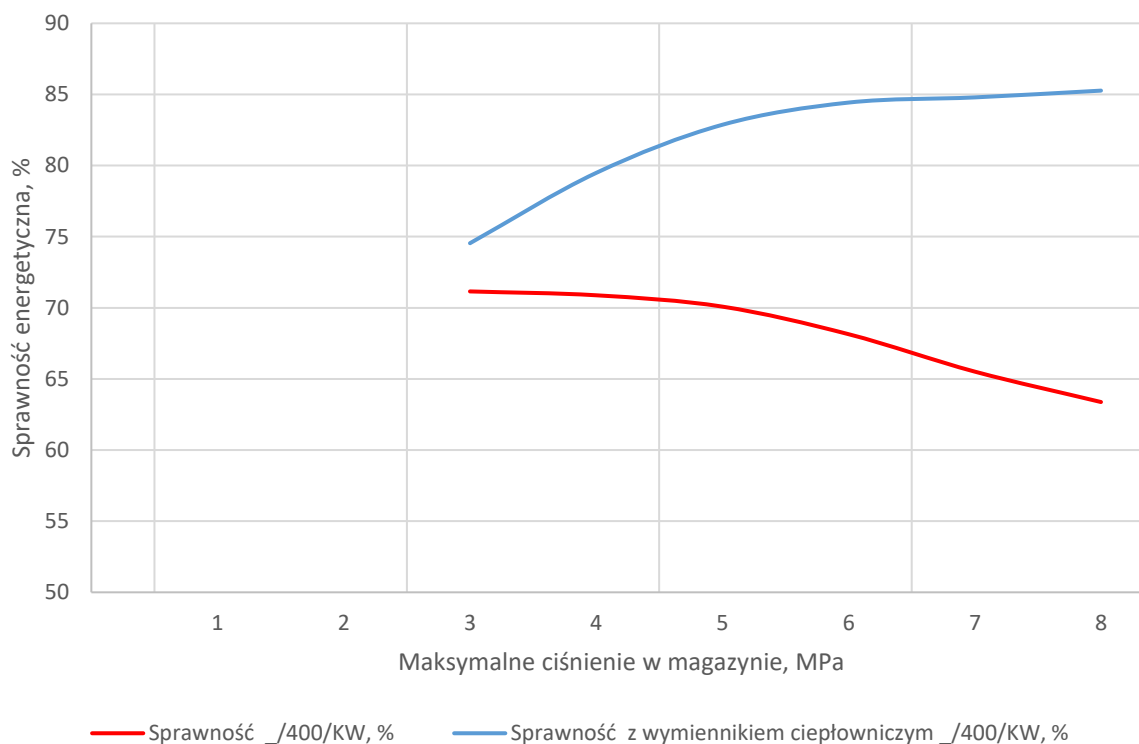
Rysunek 5.49 Wariant 8/400/1,4. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu

Rysunek 5.50 przedstawia wykres zmian sprawności oraz gęstości energii systemu ACAES z kompensacją wodną, na którym kolorem zielonym naniesiono te same parametry dla grupy wariantów izochorycznych $_ /400/2,5$, a kolorem niebieskim grupę $_ /400/1,2$, gdzie znak „ $_$ ” odpowiada maksymalnemu ciśnieniu ładowania zbiornika. Jak można zauważyć wariant 6/400/1,2 cechuje się wyższą sprawnością od wariantu 6/400/KW (68,6% vs 68,1%) i ta tendencja utrzymuje się również dla wyższych wartości maksymalnego ciśnienia w magazynie. Wyższe sprawności wariantów izochorycznych przy tym samym maksymalnym ciśnieniu magazynowania wynikają z tego, iż na początku fazy ładowania sprężarki pracują przy niższych ciśnieniach, co skutkuje niższym nakładem pracy sprężania w tych obszarach. W przypadku wariantów grupy $_ /400/2,5$ sprawność jest już niższa od wariantów systemu z kompensacją wodną, co z kolei wynika z pracy sprężarek w obszarach niższych sprawności, podczas gdy sprężarki wariantów $_ /400/KW$ pracują w stabilnych warunkach odpowiadających punktowi projektowemu.

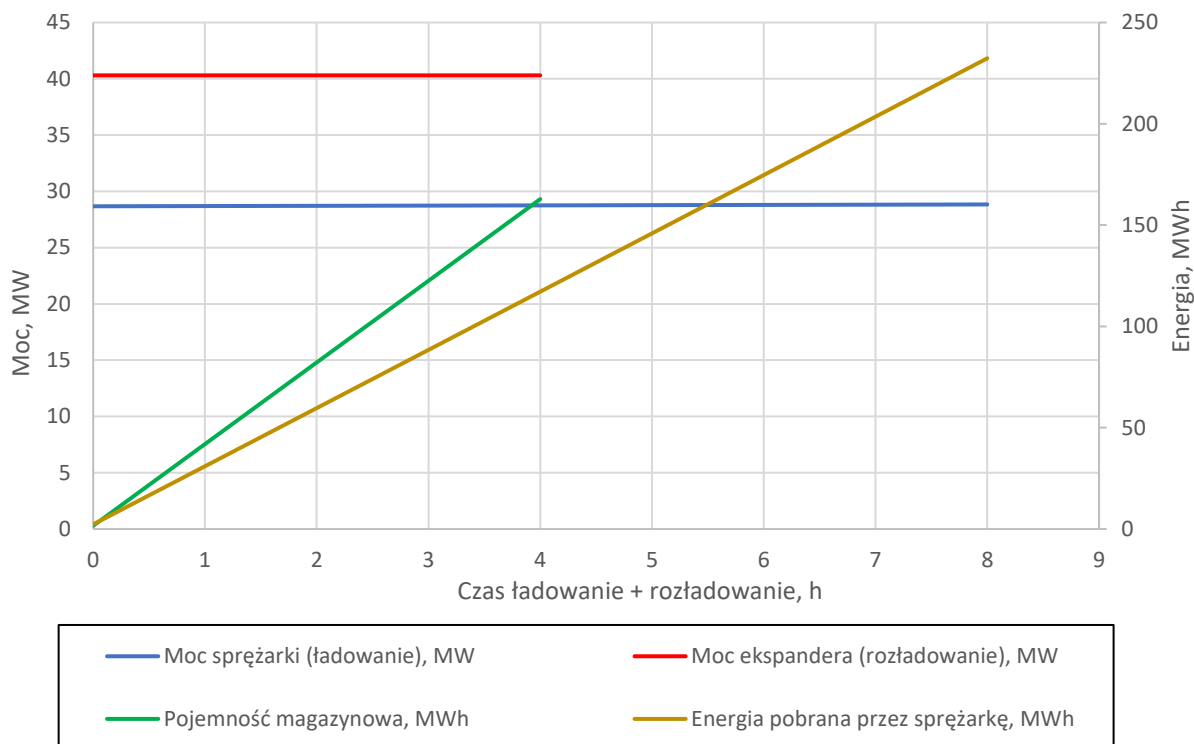


Rysunek 5.50 Wykres zmian sprawności i gęstości w funkcji ciśnienia w magazynie – porównanie z wariantami izochorycznymi

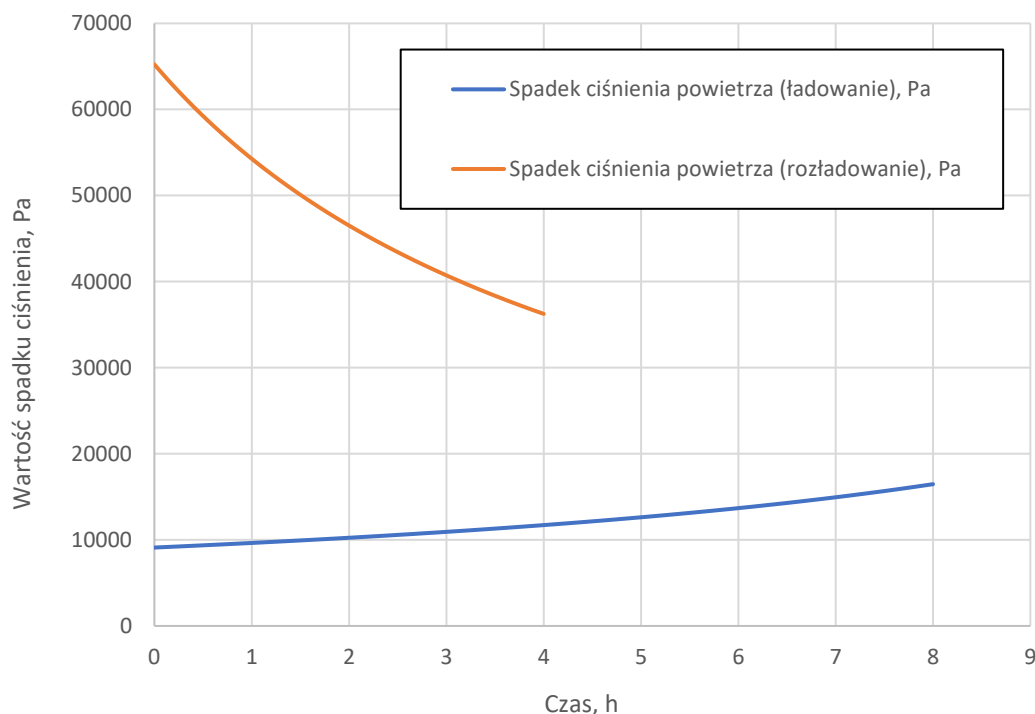
W przypadku gęstości magazynowanej energii, warianty $_ /400/KW$ cechują się bardzo wysokimi wartościami w odniesieniu do wariantów izochorycznych. Dla ciśnienia magazynowania 8,0 MPa wariant 8/400/KW posiada gęstość energii 37,3 MJ/m³, wariant 8/400/2,5 19,7 MJ/m³, a wariant 8/400/1,2 już tylko 6,1 MJ/m³. Jak widać dla skrajnego przypadku, w systemie z kompensacją wodną możliwe jest zgromadzenie ponad sześciokrotnie więcej energii niż w systemie izochorycznym, jednak przy minimalnie niższej sprawności. Na wykres można popatrzeć z innej perspektywy. Wariant izobaryczny o ciśnieniu około 4,5 MPa będzie posiadał tę samą gęstość energii co wariant 8/400/2,5, jednak jego sprawność będzie wynosić około 70,5% w odniesieniu do sprawności systemu izochorycznego, która wyniesie 61,7%. Sprawność układu wyposażonego w wymiennik ciepłowniczy wzrasta wraz z ze wzrostem ciśnienia w układzie, co wynika ze wzrostu entalpii sprężonego powietrza za pierwszą sekcją sprężarki, która następnie zostaje wykorzystana do podgrzewu wody w wymienniku ciepłowniczym. Przebieg obu sprawności pokazano na rysunku 5.51. Wykres ten można interpretować w następujący sposób: biorąc pod uwagę stabilność parametrów pracy obu sekcji sprężarek, należy rozważyć zabudowę zasobnika TES za sekcją pierwszą sprężarki.



Rysunek 5.51 Porównanie sprawności systemu ACAES z wymiennikiem ciepłowniczym i bez. Spadki ciśnień w zasobniku TES niezależnie od poziomu ciśnień w magazynie mają podobne przebiegi jak warianty izochoryczne pracujące z niskim stosunkiem ciśnień. Wartości spadków ciśnień podano w tabeli 5.6, jednak należy mieć na uwadze fakt, że w przypadku systemu izobarycznego wykorzystującego chodniki kopalni, strumienie masowe powietrza przepływającego przez zasobnik będą wynikać wprost z dostępnej objętości chodników, które są bardzo duże co pokazuje tabela 4.1. Tak więc możliwe jest pełne skalowanie instalacji, w tym z uwzględnieniem przepływów masowych. Z uwagi na przyjęty w analizie masowy strumień powietrza przepływającego przez sprężarkę, opory przepływu są akceptowalne we wszystkich wariantach. Możliwe jest zwiększenie przepływu masowego do poziomu akceptowalnego dla obecnie rozpatrywanego zasobnika TES przy wyższych ciśnieniach magazynowania. Poniższe wykresy pokazują parametry instalacji ACAES z kompensacją wodną (patrz rysunek 5.52) oraz spadków ciśnień dla wariantu 5/400/KW z przepływem masowym przez sprężarkę na poziomie 51,4 kg/s, gdzie starty przepływu przez TES wynoszą około 65 kPa (patrz rysunek 5.53), co jest wartością akceptowalną z punktu widzenia konstrukcji TES, pozostawiając jeszcze pewien margines bezpieczeństwa.



Rysunek 5.52 Wariant 5/400/KW. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu.



Rysunek 5.53 Wariant 5/400/KW. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu.

Z uwagi limity konstrukcyjne segmentu TES (dopuszczalna różnica ciśnień), uznano za najkorzystniejsze warianty 8/400/1,5 oraz 5/400/KW, które cechują się najwyższymi pojemnościami magazynowanymi i mocami. W tabeli 5.5 oraz 5.6 przedstawiono odpowiednio wyniki obliczeń dla wariantu izochorycznego 8/400/___ oraz wariantu izobarycznego ___/400/KW.

Rezultaty dla dwóch systemów, dla innych parametrów niż te omówione w części zasadniczej pracy zestawiono w załączniku nr 2.

Tabela 5.5 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t = 400,0^{\circ}\text{C}$, dla różnych stosunków ciśnień $p_{6,max}/p_{6,min}$

Parametr	Jednostka	Wariant 8/400/2,5	Wariant 8/400/2,0	Wariant 8/400/1,5	Wariant 8/400/1,4	Wariant 8/400/1,3	Wariant 8/400/1,2
Stosunek ciśnień magazynowania $p_{6,max}/p_{6,min}$	-	2,5	2,0	1,5	1,4	1,3	1,2
Maksymalna temperatura powietrza ładującego	$^{\circ}\text{C}$	400	400	400	400	400	400
Ciśnienie maksymalne w magazynie	MPa	8	8	8	8	8	8
Ciśnienie minimalne w magazynie	MPa	3,20	4,00	5,33	5,71	6,15	6,67
Ciśnienie przed ekspanderem	MPa	2,9	3,60	4,60	4,65	4,65	4,65
Najwyższa moc elektryczna zespołu sprężarki	MW	69,56	57,83	38,45	32,94	26,59	19,20
Moc elektryczna zespołu ekspandera	MW	77,43	67,35	47,13	40,60	32,92	23,91
Moc cieplna wymiennika ciepłowniczego	MW	4,99	6,08	5,83	5,38	4,69	3,66
Wymagana moc chłodnicza przed drugą sekcją sprężarki	MW	7,26 do 22,6	6,94 do 16,91	5,44 do 9,49	4,84 do 7,75	4,07 do 5,92	3,06 do 4
Sprawność energetyczna	%	61,67	63,28	64,56	64,37	64,06	63,78
Sprawność energetyczna z pracującym wymyennikiem ciepłowniczym	%	69,54	74,60	80,39	81,28	82,14	83,11
Pojemność energetyczna	MWh	312,66	271,97	190,36	163,97	132,99	96,59
Gęstość energii	MJ/m ³	19,66	17,10	11,97	10,31	8,36	6,07
Gęstość energii	kWh/m ³	5,46	4,75	3,32	2,86	2,32	1,69
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	MJ/m ³	22,17	20,16	14,90	13,02	10,72	7,91
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	kWh/m ³	6,16	5,60	4,14	3,62	2,98	2,20
Ilość segmentów TES	sztuki	12	10	7	6	5	4
Maksymalny spadek ciśnienia TES	kPa	504,26	233,72	65,38	41,39	22,67	9,59
Nominalny przepływ w sprężarce	kg/s	109,60	91,34	60,89	52,19	42,16	30,45
Nominalny przepływ przez ekspander	kg/s	219,65	183,12	122,23	104,83	84,76	61,34

Tabela 5.6 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t = 400,0$ °C, dla ACAES z kompensacją wodną

Parametr	Jednostka	Wariant 3/400/KW	Wariant 4/400/KW	Wariant 5/400/KW	Wariant 6/400/KW	Wariant 7/400/KW	Wariant 8/400/KW
Maksymalna temperatura powietrza ładującego	°C	400	400	400	400	400	400
Ciśnienie maksymalne w magazynie	MPa	3	4	5	6	7	8
Ciśnienie minimalne w magazynie	MPa	2,9	3,9	4,9	5,9	6,9	7,9
Ciśnienie przed ekspanderem	MPa	2,6	3,55	4,55	5,1	5,1	5,1
Najwyższa moc elektryczna zespołu sprężarki	MW	25,89	27,44	28,84	30,14	31,35	32,41
Moc elektryczna zespołu ekspandera	MW	36,69	38,77	40,30	40,98	40,99	41,01
Moc cieplna wymiennika ciepłowniczego	MW	0,88	2,38	3,71	4,95	6,09	7,15
Wymagana moc chłodnicza przed drugą sekcją sprężarki	MW	2,74 do 2,95	3,42 do 3,6	4,04 do 4,19	4,61 do 4,74	5,13 do 5,26	5,62 do 5,73
Sprawność energetyczna	%	71,15	70,88	70,08	68,15	65,52	63,38
Sprawność energetyczna z pracującym wymiennikiem ciepłowniczym	%	74,54	79,48	82,87	84,43	84,79	85,27
Pojemność magazynowa	MWh	148,22	156,62	162,83	165,57	165,61	165,67
Gęstość energii	MJ/m ³	12,50	17,64	22,94	27,99	32,66	37,32
Gęstość energii	kWh/m ³	3,47	4,90	6,37	7,78	9,07	10,37
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	MJ/m ³	13,30	19,78	27,12	34,68	42,27	50,21
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	kWh/m ³	3,69	5,49	7,53	9,63	11,74	13,95
Ilość segmentów TES	sztuki	6	6	6	6	6	6
Maksymalny spadek ciśnienia TES	kPa	110	82,02	65,24	54,02	46,02	40,06
Nominalny przepływ w sprężarce	kg/s	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4
Nominalny przepływ przez ekspander	kg/s	102,8	102,8	102,8	102,8	102,8	102,8
Wymagana objętość kompensacyjna	m ³	42672	31967	25556	21292	18254	15982

6. Analiza ekonomiczna

6.1. Metodologia

Analizę ekonomiczną przeprowadzono na drodze wykorzystania wskaźnika wartości zaktualizowanej netto, który definiowany jest następującą zależnością:

$$NPV = \sum_{\tau=0}^{\tau=N} \frac{CF_{\tau}}{(1+r)^{\tau}} \quad (6.1)$$

gdzie:

- CF_{τ} - strumień środków pieniężnych netto, PLN,
 r - stopa dyskonta, -,
 τ - kolejny rok rozważany od momentu rozpoczęcia budowy ($\tau = 0$ – rok rozpoczęcia budowy, $\tau = N$ – ostatni rok rozważany).

W analizach posłużono się dodatkowo wskaźnikiem, jakim jest wewnętrzna stopa zwrotu *IRR*. Metoda zakłada wyznaczenie takiej stopy dyskonta, dla której wartość zaktualizowana netto jest równa 0:

$$NPV = \sum_{\tau=0}^{\tau=N} \frac{CF_{\tau}}{(1+IRR)^{\tau}} = 0 \quad (6.2)$$

Podstawowym wyzwaniem w przeprowadzaniu oceny efektywności ekonomicznej inwestycji jest oszacowanie przepływów pieniężnych CF_{τ} . W tym celu wykorzystuje się następującą zależność:

$$CF_{\tau} = [S - J - K + L]_{\tau}, \quad (6.3)$$

gdzie:

- S - przychody, PLN,
 J - koszty inwestycyjne, PLN,
 K - koszty uwzględniające podatek, ale bez amortyzacji, PLN,

L - wartość likwidacyjna, PLN.

Koszty stanowią sumę kosztów operacyjnych (K_{op}), podatku dochodowego (P_d) oraz zmiany kapitału obrotowego (K_{obr}):

$$K = K_{op} + P_d + K_{obr}, \quad (6.4)$$

Koszty operacyjne można zapisać przy wykorzystaniu równania:

$$K_{op} = K_s + K_z, \quad (6.5)$$

gdzie:

K_s - koszty stałe,

K_z - koszty zmienne.

Koszty stałe stanowią sumę:

$$K_s = K_{O\&Ms} + A, \quad (6.6)$$

gdzie:

$K_{O\&Ms}$ - koszty eksploatacji i utrzymania (niezależne od sposobu pracy systemu),

A - koszty amortyzacji.

Koszty zmienne stanowią sumę:

$$K_s = K_{O\&Mz} + A_k, \quad (6.7)$$

gdzie:

$K_{O\&Mz}$ - koszty eksploatacji i utrzymania (zależne od sposobu pracy systemu),

A_k - koszty podatku akcyzowego (przyjęto, iż podatkiem akcyzowym nie jest objęta energia produkowana przez system magazynowania energii).

Odpowiednio dla określenia rocznych kosztów eksploatacji i utrzymania posłużono się wskaźnikami jednostkowymi:

$$K_{O\&Ms} = k_{O\&Ms} N_{elE}, \quad (6.8)$$

$$K_{O\&Mz} = k_{O\&Mz} E_{elE}, \quad (6.9)$$

gdzie:

- $k_{O\&Ms}$ - wskaźnik jednostkowy stałych kosztów eksploatacji i utrzymania,
- $k_{O\&Mz}$ - wskaźnik jednostkowy zmiennych kosztów eksploatacji i utrzymania.

Dla potrzeb przeprowadzenia analiz założono, że przychody jakie identyfikuje inwestor, to wyłącznie przychody związane ze sprzedażą produktów energetycznych, tj. przychód ze sprzedaży energii elektrycznej generowanej w okresie rozładowywania systemu ACAES oraz przychód ze sprzedaży ciepła:

$$S_{\tau} = [E_{el_dch} \cdot C_{el_dch} + Q_{wc} \cdot C_q]_{\tau}, \quad (6.10)$$

gdzie:

- E_{el_dch} - energia elektryczna wyprodukowana w okresie szczytowego zapotrzebowania na energię na rynku (produkcja na etapie rozładowywania systemu ACAES) w rozpatrywanym roku, MWh,
- C_{el_dch} - cena energii elektrycznej w okresie szczytowego zapotrzebowania na energię na rynku w rozpatrywanym roku, PLN/MWh,
- Q_{wc} - ciepło wyprodukowane dla potrzeb sieci ciepłowniczej, GJ,
- C_q - cena ciepła, PLN/GJ.

Przy szacowaniu nakładów inwestycyjnych wykorzystano wieloletnie doświadczenie Energoprojekt-Katowice S.A. w projektowaniu oraz kosztorysowaniu inwestycji realizowanych w ramach sektora energetycznego. Bazę stanowiły oferty na maszyny i urządzenia, jak również oferty realizacji prac związanych z projektowaniem oraz prac wykonawczych i budowlanych. Posłużono się również ogólnodostępnymi biuletynami cenowymi dla robót budowlano-montażowych wydawnictw Wolters Kluwer Polska SA (Bistyp), Sekocenbud,

Orgbud. Szacunki wykonano także w oparciu o informacje cenowe właściwe dla postępowań przetargowych podawanych do publicznej wiadomości przez portale energetyczne, jak i dla postępowań własnych, wynikających z funkcji doradcy i projektanta. Dużym wyzwaniem było szczególnie pozyskanie informacji dla oszacowania wielkości nakładów inwestycyjnych, jakie musiałyby być poniesione na zakup ekspandera o wymaganej mocy. W tym celu zorganizowano spotkania w przedstawieli takich firm jak Atlas Copco Energas GmbH, MAN Energy Solutions, Siemens Energy.

Ceny maszyn i urządzeń, jak również wyposażenia dodatkowego, w tym elektrycznego, dla zadania objętego niniejszą pracą zostały oszacowane wstępnie, z uwagi na brak możliwości pozyskania ofert techniczno-cenowych. Tym samym spodziewać należy się, iż zrealizowany szacunek może być obciążony błędem, który jednak jest akceptowalny dla zadań o charakterze studium wykonalności, w obszar którego wpisywać może się postawione w ramach doktoratu zadanie. Weryfikacja oszacowanych kosztów będzie mogła zostać wykonana dopiero po rozpoczęciu działań przedinwestycyjnych, a więc w momencie sformułowania przez potencjalnego inwestora deklaracji inwestycyjnych, co będzie stanowiło zachętę dla inicjacji działań kosztorysowych w strukturach firm oferujących maszyny i urządzenia, jak również firm specjalizujących się w realizacji prac wykonawczych i budowlanych.

Oszacowane dla potrzeb przeprowadzenia analiz ekonomicznych nakłady inwestycyjne obejmują koszty związane z realizacją:

- projektów,
- przygotowania, organizacji robót i zabezpieczenia placu budowy,
- robót budowlano-montażowych,
- dostaw maszyn i urządzeń.

Nakłady nie obejmują kosztów:

- finansowych realizacji inwestycji,
- kosztów dostarczenia mediów na etapie budowy (wody, energii elektrycznej itp.),
- obsługi Inwestycji przez Inżyniera Kontraktu lub/i Zamawiającego,

- innych kosztów.

6.2. Założenia

Analizami ekonomicznymi objęto dwie konfiguracje systemu ACAES, tj. izochoryczną i izobaryczną, w których możliwe jest zastosowanie TES tego samego typu. W przypadku systemu izobarycznego, który zapewniony jest przez kompensację wodną, analizy przeprowadzono dla wariantu o oznaczeniu 5/400/KW, a w przypadku systemu izochorycznego dla wariantu 8/400/1,5. W analizach ekonomicznych posłużono się wynikami analiz termodynamicznych, które uzyskano na drodze wykorzystania metodologii oraz założeń wskazanych w rozdziale 5. W tabeli 6.1 zestawiono najważniejsze wielkości charakterystyczne dla dwóch wariantów, a w tym te, które bezpośrednio decydują o efektywności ekonomicznej inwestycji.

Analizy ekonomiczne prowadzono ponadto dla dwóch wariantów systemów, klasyfikowanych z punktu widzenia odbioru ciepła jako produktu handlowego. Każdą z konfiguracji systemu analizowano jako przypadek, gdzie ciepło chłodzenia międzysekcyjnego sprężanego powietrza częściowo jest wykorzystywane dla potrzeb ciepłownictwa oraz jako przypadek, gdzie ciepło to jest w całości rozpraszane w otoczeniu. W tabeli 6.2 zestawiono dla wszystkich analizowanych wariantów wielkości dziennych konsumpcji oraz produkcji energii elektrycznej, odpowiednio właściwych dla etapu ładowania oraz rozładowywania systemów magazynowania energii, jak również ilości dziennie pozyskiwanego dla celów ciepłownictwa ciepła.

Tabela 6.1 Zestawienie parametrów dla wariantów przyjętych do analizy ekonomicznej

Parametr	Jednostka	Wariant 8/400/1,5	Wariant 5/400/KW
Stosunek ciśnień magazynowania p_{6_max}/p_{6_min}	-	1,5	1,02
Maksymalna temperatura powietrza ładującego	°C	400	400
Ciśnienie maksymalne w magazynie	MPa	8	5
Ciśnienie minimalne w magazynie	MPa	5,33	4,9
Ciśnienie przed ekspanderem	MPa	4,60	4,55
Moc elektryczna mierzona na zaciskach sprężarki	MW	38,45	28,84
Moc elektryczna mierzona na zaciskach generatora ekspandera	MW	47,13	40,30
Moc cieplna wymiennika ciepłowniczego	MW	5,83	3,71
Wymagana moc chłodnicza przed drugą sekcją sprężarki	MW	5,44 do 9,49	4,04 do 4,19
Sprawność magazynowania energii	%	64,56	70,08
Sprawność magazynowania energii z pracującym wymiennikiem ciepłowniczym	%	80,39	82,87
Pojemność magazynowa	MWh	190,36	162,83
Energia pobrana w trakcie ładowania magazynu	MWh	294,83	232,33
Wyprodukowane ciepło	GJ	167,96	106,93
Gęstość energii	MJ/m ³	11,97	22,94
Gęstość energii	kWh/m ³	3,32	6,37
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	MJ/m ³	14,90	27,12
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	kWh/m ³	4,14	7,53
Ilość segmentów TES	sztuki	7	6
Maksymalny występujący spadek ciśnienia TES	kPa	65,38	65,24
Strumień masowy powietrza - ładowanie	kg/s	60,89	51,5
Strumień masowy powietrza - rozładowywanie	kg/s	122,23	102,8
Czas trwania fazy ładowania	h	8	8
Czas trwania fazy rozładowywania	h	4	4
Objętość magazynu	m ³	57255	25556
Minimalna wymagana wysokość czynna szybu o średnicy 9 m	m	900	120
Wymagana długość korytarzy górnego zbiornika z obudową ŁP10-KS/KO-21, które będą zalewane	m	-	1820
Wymagana długość korytarzy górnego zbiornika z obudową ŁP8-KS/KO-21, które będą zalewane	m	-	2850

Tabela 6.2 Zestawienie wielkości produkcji dla analizowanych wariantów systemu ACAES przyjętych na potrzeby analizy ekonomicznej

	Opis	Wariant 8/400/1,5 +C			Wariant 5/400/KW +C		
		ładowanie magazynu	rozładowywanie magazynu	Jedn.	ładowanie magazynu	rozładowywanie magazynu	Jedn.
Z poborem ciepła dla potrzeb ciepłownictwa	czas trwania cyklu	8	4	h	8	4	h
	pobór energii elektrycznej w trakcie trwania cyklu	294,83	0	MWh	232,33	0	MWh
	produkcja energii elektrycznej w trakcie trwania cyklu	0	190,36	MWh	0	162,83	MWh
	produkcja ciepła w trakcie trwania cyklu	167,96	0,00	GJ	106,93	0,00	GJ
Bez poboru ciepła dla potrzeb ciepłownictwa	Opis	Wariant 8/400/1,5			Wariant 5/400/KW		
		ładowanie magazynu	rozładowywanie magazynu	Jedn.	ładowanie magazynu	rozładowywanie magazynu	Jedn.
	czas trwania cyklu	8	4	h	8	4	h
	pobór energii elektrycznej w trakcie trwania cyklu	294,83	0	MWh	232,33	0	MWh
	produkcja energii elektrycznej w trakcie trwania cyklu	0	190,36	MWh	0	162,83	MWh
produkcja ciepła w trakcie trwania cyklu	0	0	GJ	0	0	GJ	

Założenia jakie wykorzystano w analizie ekonomicznej są jednakowe dla dwóch wariantów analizowanych systemów. Założenia te są następujące:

- okres eksploatacji instalacji: 50 lat,
- czas budowy: 3 lata
- podział nakładów inwestycyjnych dla lat budowy: 10%/30%/60%
- stopa dyskonta: 10%
- cena energii el. w szczycie zapotrzebowania [115]: 486 PLN/MWh
- cena energii el. w dolinie zapotrzebowania [115]: 335 PLN/MWh
- cena ciepła grzewczego: 70 PLN/GJ
- wsk. stałych kosztów eksploatacji i utrzymania [45]: 19 USD/kW/rok
- wsk. zmiennych kosztów eksploatacji i utrzymania [45]: 2 USD/MWh
- kurs walutowy: 4,7 PLN/USD

Dla założeń nominalnych przyjęto cenę energii elektrycznej w szczycie na poziomie 486 PLN/MWh oraz w dolinie 335 PLN/MWh, co daje relację *peak/off-peak* na poziomie 1,45. Te założenia oparto na rzeczywistych wartościach średnich, jakie określono dla roku 2021 w oparciu o dane Polskich Sieci Przesyłowych, zaczerpnięte z [115]. Dla okresu właściwego dla trzech ostatnich lat relacja *peak/off-peak* wynosiła 1,23. Ponadto analizy przeprowadzono również dla określonych w oparciu o dane Towarowej Giełdy Energii [116], właściwe dla ośmiu miesięcy, od początku stycznia do końca sierpnia 2022 roku. W tym przypadku ceny założone odpowiednio dla okresu szczytowego zapotrzebowania oraz doliny energetycznej wynosiły 835 PLN/MWh i 735 PLN/MWh. Relacja tych cen wynosi 1,14, z kolei dla trzech ostatnich lat 1,23. Trzeci wariant cenowy przyjęto w oparciu o ceny publikowane przez Towarową Giełdę Energii, ale wyłącznie dla miesiąca lipca 2022. Dla tego miesiąca widoczne jest wyraźne zróżnicowanie cen, które dla godzin okresu szczytowego zapotrzebowania wyniosły 1850 PLN/MWh oraz dla godzin doliny energetycznej 711 PLN/MWh. Relacja tych cen wynosi 2,60.

6.3. Analiza wyników

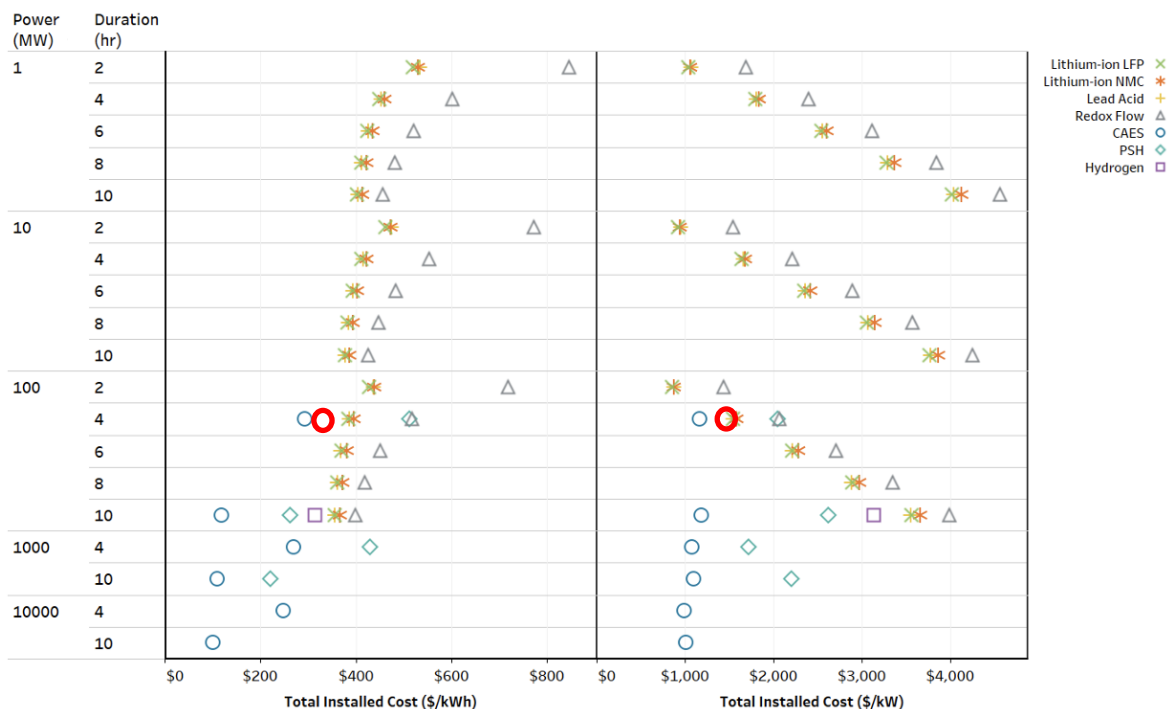
W tabeli 6.3 zestawiono składowe kosztów nakładów inwestycyjnych dla dwóch wariantów systemu ACAES. W przypadku wariantu z izochorycznym zasobnikiem na sprężone powietrze wielkość oszacowanego nakładu inwestycyjnego wyniosła 279,162 mln PLN, z kolei w przypadku wariantu z kompensacją wodną 230,912 mln PLN. W tabeli zestawiono również obliczone wskaźniki jednostkowych nakładów inwestycyjnych, które w odniesieniu do pojemności energetycznej odpowiednio dla dwóch systemów wyniosły 1697,14 PLN/kWh oraz 1609,93 PLN/kWh. W odniesieniu do mocy zainstalowanej w ramach zespołów ekspanderów wartości wskaźników określane dla dwóch systemów wyniosły odpowiednio 6855,66 PLN/kW oraz 6504,58 PLN/kW. Na rysunku 6.1 zilustrowano wielkość określonych nakładów jednostkowych dla analizowanych systemów na tle wartości wskaźników właściwych dla innych technologii magazynowania energii. Jak należało się spodziewać określone wartości są wyższe niż wartości właściwe dla klasycznej technologii CAES. Wynika to głównie z kosztów jakie wymagane są tutaj dla zorganizowania innowacyjnego systemu magazynowania sprężonego powietrza oraz ciepła w objętości szybu kopalnianego. Jednocześnie charakterystyka jednoznacznie wskazuje, iż w zakresie skali, jaka jest właściwa dla analizowanych systemów, mogą one być pod kątem wielkości nakładów inwestycyjnych atrakcyjne względem innych technologii, a w tym elektrowni szczytowo-pompowych oraz systemów bazujących na wykorzystaniu akumulatorów litowo-jonowych.

Tabela 6.3 Nakłady inwestycyjne dla analizowanych układów ACAES

Opis	Wariant 8/400/1,5			Wariant 5/400/KW		
	cena jednostkowa	ilość	wartość netto	cena jednostkowa	ilość	wartość netto
CZĘŚĆ BUDOWLANA						
Hala agregatów (25,0 x 20,0 x 6,0m) konstrukcja stalowa, lekka obudowa (płyty warstwowe, dach blacha trapezowa, wełna, papa)	6 000 000,00 zł	1	6 000 000,00 zł	6 000 000,00 zł	1	6 000 000,00 zł
Przybudówka elektryczna (4,0x12,0x3,5m) budynek murowany z bloczków wapienno piaskowych, wełna mineralna i tynkiem zewnętrznym i wewnętrznym.	630 000,00 zł	1	630 000,00 zł	630 000,00 zł	1	630 000,00 zł
Place i drogi	200 000,00 zł	1	200 000,00 zł	200 000,00 zł	1	200 000,00 zł
Korek szybowy i stopy szybowe	15 000 000,00 zł	1	15 000 000,00 zł	9 750 000,00 zł	1	9 750 000,00 zł
Uszczelnienie szybu	12 000 000,00 zł	1	12 000 000,00 zł	2 500 000,00 zł	1	2 500 000,00 zł
INSTALACJE ELEKTRYCZNE						
Stacja kontenerowa z rozdzielnicą 6kV	7 500 000,00 zł	1	7 500 000,00 zł	7 500 000,00 zł	1	7 500 000,00 zł
INSTALACJE AKPIA						
Szafa sterująca i część obiektowa	250 000,00 zł	1	250 000,00 zł	250 000,00 zł	1	250 000,00 zł
Programowanie, montaż i usługi	150 000,00 zł	1	150 000,00 zł	150 000,00 zł	1	150 000,00 zł
INSTALACJE TECHNOLOGICZNE						
Sprężarka dwusekcyjna	50 000 000,00 zł	1	50 000 000,00 zł	37 100 000,00 zł	1	37 100 000,00 zł
Ekspander	98 000 000,00 zł	1	98 000 000,00 zł	83 500 000,00 zł	1	83 500 000,00 zł
TES-segmenty	2 600 000,00 zł	7	18 200 000,00 zł	2 600 000,00 zł	6	15 600 000,00 zł



Opis	Wariant 8/400/1,5			Wariant 5/400/KW		
	cena jednostkowa	ilość	wartość netto	cena jednostkowa	ilość	wartość netto
Układ chłodzenia międzystopniowego	5 000 000,00 zł	1	5 000 000,00 zł	4 000 000,00 zł	1	4 000 000,00 zł
Armatura	2 500 000,00 zł	1	2 500 000,00 zł	2 000 000,00 zł	1	2 000 000,00 zł
Urządzenia dźwigowo remontowe	400 000,00 zł	1	400 000,00 zł	400 000,00 zł	1	400 000,00 zł
Wymiennik ciepłowniczy z osprzętem	750 000,00 zł	1	750 000,00 zł	750 000,00 zł	1	750 000,00 zł
Rurociągi	6 750 000,00 zł	1	6 750 000,00 zł	14 400 000,00 zł	1	14 400 000,00 zł
suma			223 330 000,00 zł			184 730 000,00 zł
INŻYNIERIA (prace projektowe, inwentaryzacyjne, geodezyjne, nadzory itp.)			33 499 500,00 zł			27 709 500,00 zł
REZERWA (ok 10%)			22 333 000,00 zł			18 473 000,00 zł
OGÓŁEM			279 162 500,00 zł			230 912 500,00 zł

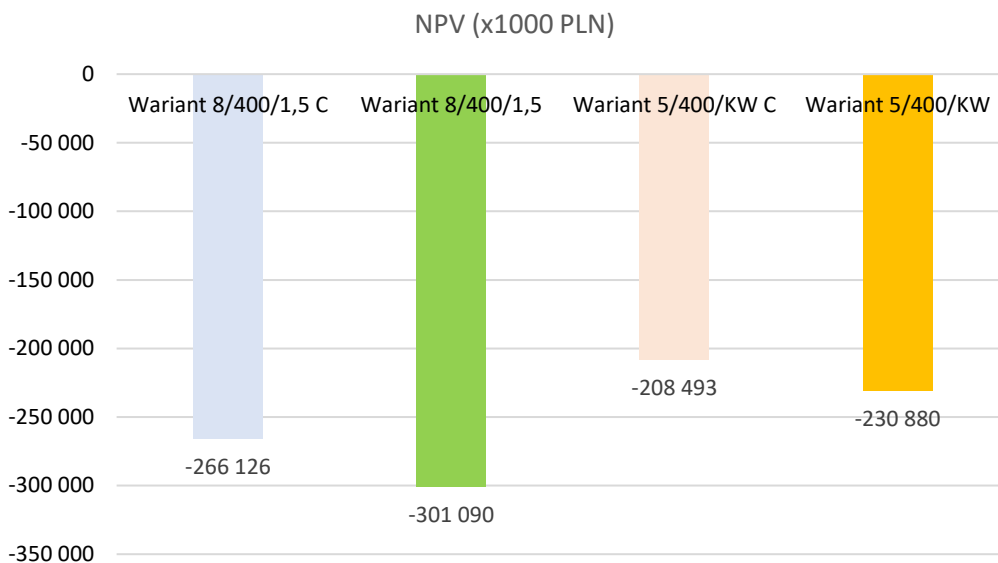


Rysunek 6.1 Porównanie całkowitego kosztu budowy magazynów w różnych technologiach [45], na którym, czerwonym znacznikiem, naniesiono koszty budowy systemu ACAES wg niniejszej koncepcji

W tabeli 6.4 zestawiono wartości dziennych (w rozumieniu wartości średniorocznych) zysków lub strat, jakie są wynikiem prowadzonej działalności na drodze wykorzystania poszczególnych wariantów systemu ACAES, przy nominalnych założeniach dotyczących cen energii elektrycznej. Nominalnie założone ceny energii elektrycznej występujące w szczytowym okresie zapotrzebowania, jak również w dolinie energetycznej wydają się być satysfakcjonujące z punktu widzenia efektywności ekonomicznej, z wyjątkiem wariantu izochorycznego bez kompensacji wodnej, to jednak wszystkie warianty cechują się ujemnym wskaźnikiem *NPV*, co zostało przedstawione na rysunku 6.2.

Tabela 6.4 Dzienny zysk/strata dla analizowanych wariantów przy nominalnie przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi PSE dla roku 2021

	Zysk/strata z działalności	
Wariant 8/400/1,5 C	5 504,11	PLN
Wariant 8/400/1,5	- 6 186,09	PLN
Wariant 5/400/KW C	8 789,93	PLN
Wariant 5/400/KW	1 304,83	PLN

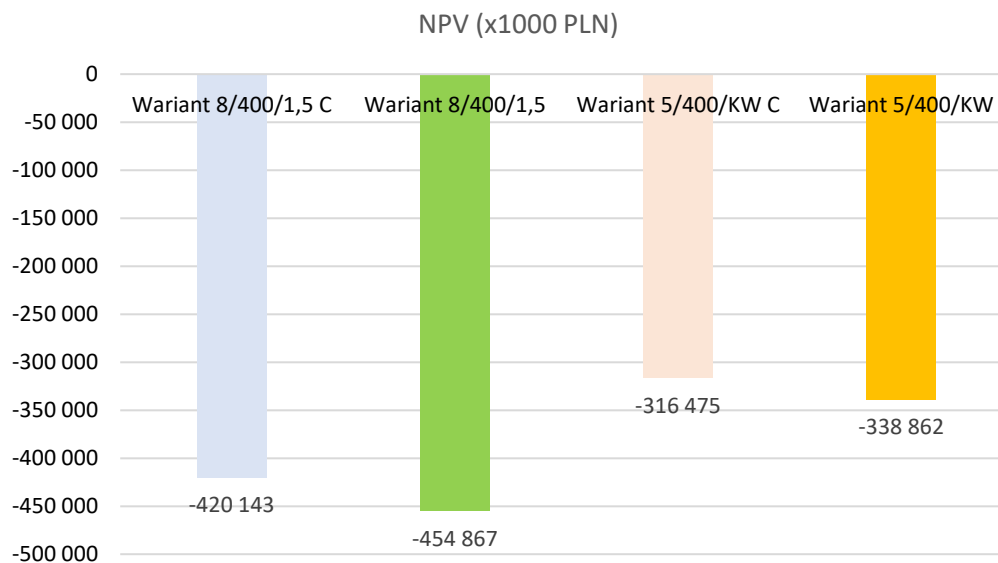


Rysunek 6.2 Wartości zaktualizowane netto dla analizowanych wariantów przy nominalnie przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi PSE dla roku 2021

W taki sam sposób, jak dla założeń nominalnych, przedstawiono wyniki analiz dla cen energii elektrycznych przyjętych w oparciu o dane TGE dla ośmiu miesięcy (od początku stycznia do końca sierpnia 2022 roku). Jak pokazuje to tabela 6.5 oraz rysunek 6.3 te warunki są jeszcze mniej korzystne dla inwestora. Wynika to ze zdecydowanie niższej wartości relacji cen energii elektrycznych *peak/off-peak*, niż ta właściwa dla założeń nominalnych.

Tabela 6.5 Dzienny zysk/strata dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi TGE za okres styczeń-sierpień 2022

	Zysk/strata z działalności	
Wariant 8/400/1,5 C	- 45 992,25	PLN
Wariant 8/400/1,5	- 57 602,45	PLN
Wariant 5/400/KW C	- 27 314,40	PLN
Wariant 5/400/KW	- 34 799,50	PLN



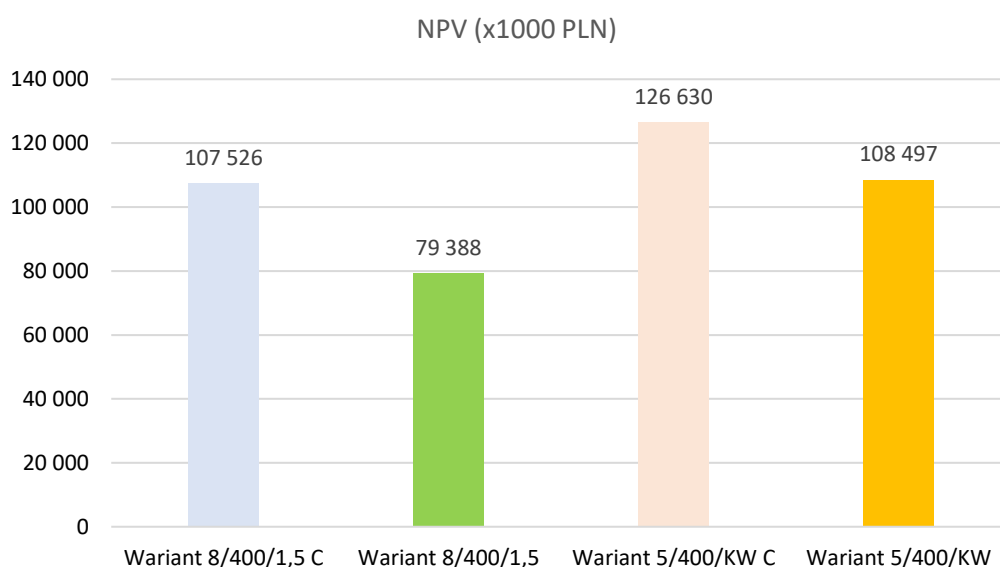
Rysunek 6.3 Wartości zaktualizowane netto dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie danymi TGE za okres styczeń-sierpień 2022

Pomijając fakt, że dla przyjętych poziomów cenowych zaproponowany system (niezależnie od konfiguracji) jest nieopłacalny ekonomicznie, można zauważyć wyższość konfiguracji pracujących z kompensacją wodną. Dodatkowo, konfiguracje z wymiennikiem ciepłowniczym cechują się korzystniejszą wartością netto. Ostatni analizowany wariant cenowy może jednak świadczyć o tym, iż już obecnie mogą pojawiać się okresy, w których sytuacja rynkowa jest korzystna z punktu widzenia zasadności implementacji systemów magazynowania energii, nawet bez dodatkowego wsparcia, tj. wyłącznie w oparciu działalności na mechanizmie arbitrażu cenowego.

W tabeli 6.6 oraz na rysunku 6.4 przedstawiono rezultaty analiz dla przypadków inwestycyjnych, dla których założono najwyższe ceny energii elektrycznej, przy których też występuje najwyższa relacja cen *peak/off-peak*. Te założenia oparto na sytuacji jaka panowała na rynku w lipcu 2022 roku. Jak widzimy dla każdego analizowanego wariantu uzyskano zysk operacyjny oraz uzyskano dodatnie wartości dla wskaźnika *NPV*, co świadczy o zasadności inwestycyjnej dla inwestycji.

Tabela 6.6 Dzienny zysk/strata dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi TGE dla lipca roku 2022

	Zysk/strata dzienna na energii	
Wariant 8/400/1,5 C	158 219,07	PLN
Wariant 8/400/1,5	142 684,07	PLN
Wariant 5/400/KW C	146 028,07	PLN
Wariant 5/400/KW	136 048,87	PLN



Rysunek 6.4 Wartości zaktualizowane netto dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi TGE dla lipca 2022

W tabeli 6.7 zestawiono wartości wskaźników *NPV* oraz *IRR* dla wszystkich analizowanych wariantów, przy najkorzystniejszych warunkach makroekonomicznych jakie analizowano. Jak pokazują to wyniki analiz, warianty wszystkie warianty pozwoliły na uzyskanie satysfakcjonujących wyników ekonomicznych. Dodatkowo w tabeli zestawiono informacje o okresach, w których poniesione nakłady na inwestycje realizowane zgodnie z poszczególnymi wariantami zostałyby zwrócone.

Tabela 6.7 Wartości NPV, IRR oraz zaktualizowany okres zwrotu dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie danymi TGE dla lipca 2022

	NPV (x1000 PLN)	IRR %	Zaktualizowany okres zwrotu lata
Wariant 8/400/1,5 C	107 526	14,24	15
Wariant 8/400/1,5	79 388	13,15	17
Wariant 5/400/KW C	126 630	15,97	12
Wariant 5/400/KW	108 497	15,14	13

7. Konkluzje i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki kompleksowych analiz technicznych mających na celu ocenę wykonalności adiabatyicznego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu, wykorzystującego innowacyjny zasobnik na sprężone powietrze oraz ciepło. Zgodnie z założeniami wynalazku najkorzystniejszym miejscem dla zabudowy zasobnika jest szyb kopalniany, co stwarza dla rozwiązania duży potencjał implementacyjny, szczególnie w rejonach gdzie przez dekady prowadzona była działalność górnicza. Analizy ukierunkowane zostały również na określenie technicznych wskaźników oceny dla całego systemu. Dla systemu wykorzystującego szyb referencyjny, o określonej charakterystyce, przeprowadzono analizy w celu oszacowania pojemności energetycznej systemu, jak również sprawności magazynowania energii elektrycznej.

W oparciu o analizę zestawionych w pracy wyników sformułować można następujące konkluzje i wnioski:

- Możliwa jest budowa systemu ACAES na terenie Polski z wykorzystaniem infrastruktury pokopalnianej w oparciu o zaproponowaną technologię, wykorzystującą smukły TES zabudowany w nieczynnym szybie.
- Wykorzystanie terenu oraz infrastruktury technicznej wchodzącej w skład nieczynnego zakładu górniczego dla organizacji inwestycji, mającej na celu budowę systemu magazynowania energii, wpisuje się w zabiegi mające na celu rewitalizację obszarów poprzemysłowych, co jest promowane w ramach Unii Europejskiej. Nadanie obiektowi nowej funkcji, co ważne przez organizację wielkoskalowego obiektu przemysłowego, może być sposobem na

przeciwdziałanie ryzyku wystąpienia recesji gospodarczej w regionie, przejawiającej się ubożeniem społeczeństwa oraz emigracją. Inwestycje zgodnie z analizowanymi opcjami są szansą dla zachowania bardzo cennych elementów infrastruktury – budowa średniej wielkości szybu może obecnie kosztować ponad 300 mln PLN [117].

- Lokalizacje właściwe dla umiejscowienia obecnie funkcjonujących szybów kopalnianych są korzystne dla inwestycji w system magazynowania energii elektrycznej z uwagi na dostęp do elektroenergetycznej sieci przesyłowej. Dla potrzeb inwestycji możliwa jest również adaptacja innych obiektów kubaturowych, stanowiących infrastrukturę pokopalnianą. Przykładowo wykorzystanie hali maszynowej może pozwolić na obniżenie wielkości nakładów inwestycyjnych o około 3%. Korzystna jest ponadto powszechnie występująca w tych przypadkach dostępność do rynku odbiorców ciepła, co pozwalana na traktowanie pozyskiwanego w ramach systemów ACAES ciepła chłodzenia, jako ekologicznego produktu handlowego.
- Wybór lokalizacji pod budowę systemu ACAES powinien być poprzedzony szczegółowymi badaniami geomechanicznymi, górotworów i elementów konstrukcyjnych infrastruktury podziemnej.
- Nie jest zalecana wybór nieczynnego zakładu górniczego znajdującego się w sąsiedztwie czynnego zakładu, w szczególności dla systemu z kompensacją wodną.
- Zaproponowana technologia modułowego TES daje możliwości adaptacji technologii i jej skali do wybranej lokalizacji.
- Pojemność energetyczna systemu ACAES zależy istotnie od ciśnienia przy jakim powietrze może być magazynowane w zbiorniku ciśnieniowym. Wyniki wstępnie przeprowadzonych analiz wskazują, iż szyby kopalniane o korzystnych charakterystykach technicznych są zdolne, po odpowiedniej adaptacji, do magazynowania powietrza przy ciśnieniu wynoszącym nawet 8 MPa, co nie odbiega od poziomów ciśnienia przy jakim powietrze jest magazynowane w kawernach solnych działających na świecie komercyjnych

systemów CAES.

- Dla większych stosunków ciśnień konieczne jest przeprojektowanie segmentu TES, aby ten był zdolny do przenoszenia większych obciążeń wynikających z większych różnic ciśnienia w trakcie przepływu sprężonego powietrza przez złoże. Jako alternatywne rozwiązanie można zastosować równoległe pracujące grupy TES, które będą zawieszane w szybie jeden nad drugim. W takim przypadku konieczne będzie zagwarantowanie równomiernego przepływu przez wszystkie grupy TES, co z uwagi na smukłość szybu może być trudne do realizacji. Możliwa jest budowa układu zbliżonego do układu Tichelmana poprzez celowe wydłużanie rurociągów dolotowych do wyżej zawieszonych TES, tak aby niezależnie od poziomu zabudowy TES w szybie, opory przepływu przez rurociągi do każdego z TES były zbliżone.
- System izobaryczny ma szereg zalet w porównaniu do systemu izochorycznego. Wskazać można na następujące zalety:
 - Możliwa jest praca sprężarek w ich punktach projektowych praktycznie w całej fazie ładowania zbiornika – możliwa praca z najwyższą sprawnością
 - Praca drugiej sekcji sprężarki z prawie stałym sprężem gwarantuje ładowanie magazynu sprężonym powietrzem o praktycznie niezmienniej temperaturze, co gwarantuje uzyskanie bardziej korzystnego gradientu temperatury w zasobniku, co z kolei przekłada się na wyższą osiąganą moc ekspandera.
 - System posiada wyższą sprawność,
 - Z uwagi na bardzo duże pojemności geometryczne korytarzy na poszczególnych poziomach, możliwa jest multiplikacja systemu w ramach jednej kopalni. Przykładowo, dla wariantu analizowanego w części ekonomicznej (5/400/KW) możliwa jest zabudowa aż 6 kompletnych układów TES na pełnej wysokości szybu.
 - Możliwe jest osiągnięcie zbliżonych pojemności magazynowania przy

niższym ciśnieniu, co ma niebagatelny wpływ na wymiary korków i ewentualne prace uszczelniające i naprawcze.

- W systemie izobarycznym istnieje spory potencjał zwiększenia mocy ekspandera z uwagi na stabilne ciśnienie magazynowania, jednak z uwagi na realizowany w ekspanderze spadek entalpii, konieczne jest podniesienie również temperatury przed ekspanderem.
- Wadą systemu ze zbiornikiem izobarycznym jest trudność w adaptacji wyrobisk korytarzowych, które na skutek erozji podlegać mogą degradacji oraz w konsekwencji tego zawałom. Eksploatacja systemu izobarycznego wymaga prowadzenia odmulania zbiornika szybowego, przy pracy maszyn w trudnych warunkach, wynikających np. z zasolenia wody.
- Zastosowanie wymiennika ciepłowniczego istotnie podnosi sprawność systemu, jednak w przypadku systemu izobarycznego w mniejszym stopniu, co spowodowane jest pracą obu sekcji sprężania z praktycznie niezmiennymi stosunkami ciśnień w czasie trwania cyklu.
- Ilość oraz jakość traconego ciepła do otoczenia za pierwszą sekcją sprężarki wskazuje na konieczność jego zagospodarowania. Z uwagi na jego stosunkowo niską gęstość wykorzystanie proponowanej koncepcji TES wydaje się być niezasadne z uwagi na spodziewane duże opory przepływu. Dodatkowo na TES działałoby duże ciśnienie zewnętrzne (ciśnienie magazynowania powietrza w szybie) przy relatywnie niskim ciśnieniu w jego wnętrzu, co skutkować mogłoby koniecznością zastosowania innej konstrukcji (zapewne dużo droższej od proponowanej). Zakres temperatur w tym miejscu wskazuje na możliwość zastosowania proponowanego w literaturze wymiennika gruntowego [118].
- Oszacowany koszt inwestycyjny dla proponowanej koncepcji systemu ACAES jest zbliżony do kosztów szacunkowych systemów CAES analizowanych w raporcie DOE/PA-0204 [45].
- Dla obecnej koncepcji segmentu TES możliwe jest zwiększenie temperatury pracy do 500 °C, pod warunkiem zmiany gatunku stali, na przykład na stal P90. Dla wyższych temperatur konieczna jest weryfikacja rozwiązań technicznych

pod kątem zjawiska pełzania stali. Weryfikacji należy poddać również materiały akumulacyjne.

- Obecnie identyfikowane otoczenie makroekonomiczne nie sprzyja inwestycjom mającym na celu budowę systemów magazynowania energii. Globalnie identyfikowane zmiany jakie mają miejsce w związku z agresją Rosji względem Ukrainy, mogą być czynnikiem stymulującym działania inwestycyjne w segmencie systemów magazynowania energii. Potrzeba budowy takich systemów będzie tym większa, im wyższym udziałem w bilansie energetycznym kraju odznaczać będzie produkcje energii elektrycznej w oparciu o OZE oraz im niższym udziałem będzie odznaczać się produkcja w oparciu o jednostki węglowe oraz gazowe.
- Dla zapewnienie bezpieczeństwa kraju ważne jest wdrażanie przede wszystkim wielkoskalowych systemów magazynowania energii, które mogą podlegać decyzyjności Operatora Systemu Przesyłowego. Analizowane systemy ACAES są klasyfikowane jako właśnie takie systemy.

8. Bibliografia

- [1] K. Badyda i J. Milewski, „Elektrownie CAES - możliwości akumulacji energii oraz współpracy ze źródłami odnawialnymi,” *Instal*, tom II, pp. 58-65, 2010.
- [2] Ł. Bartela i J. Milkewski, „Chapter 2: Directions for Improving the Flexibility of Coal-Fired Units in an Era of Increasing Potential of Renewable Energy Sources,” w *POWER ENGINEERING Advances and Challenges*, Boca Raton, CRC Press, 2018, pp. 29-44.
- [3] Eurostat, „Eurostat,” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>. [Data uzyskania dostępu: 3 maj 2022].
- [4] PSE, „Polskie Sieci Elektroenergetyczne Spółka Akcyjna,” 31 Grudzień 2021. [Online]. Available: https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok/raporty-za-rok-2021#r5_1. [Data uzyskania dostępu: 3 maj 2022].
- [5] PSE, „Polskie Sieci Elektroenergetyczne Spółka Akcyjna,” 31 Grudzień 2021. [Online]. Available: https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok/raporty-za-rok-2021#r1_3. [Data uzyskania dostępu: 03 Maj 2022].
- [6] Kancelaria Prezesa Rady Ministrów, „Kancelaria Prezesa Rady Ministrów,” 15 wrzesień 2022. [Online]. Available: <https://www.gov.pl/web/premier/premier-oglosil-tarcze-solidarnosciowa-ktora-ma-chronic-polakow-przed-gwaltownymi-wzrostami-cen-energii>. [Data uzyskania dostępu: 17 wrzesień 2022].
- [7] A. Blakers, M. Stocks, B. Lu i C. Cheng, „A review of pumped hydro energy storage,” *Progress in Energy*, tom 3, nr 2, 2021.
- [8] H. A. Behabtu, M. Messagie, T. Coosemans, M. Berecibar, K. A. Fante, A. A. Kebede i J. Van Mierlo, „A Review of Energy Storage Technologies’,” *Sustainability*, 15 grudnia 2020.
- [9] A. Kunstman, K. Poborska-Młynarska i K. Urbańczyk, „Geologiczne i górnictwo aspekty budowy magazynowych kawern solnych,” *Przegląd Geologiczny*, tom 57, nr 9, pp. 819-828, 2009.

- [10] M. Budt, D. Wolf, R. Span i J. Yan, „A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments,” *Applied Energy*, nr 170, pp. 250-268, 2016.
- [11] S. Patel, „POWERmagazine,” 5 grudzień 2013. [Online]. Available: <https://www.powermag.com/ferc-revises-small-generator-rules-to-include-energy-storage/>. [Data uzyskania dostępu: 28 sierpień 2022].
- [12] CEIC, „CEIC,” [Online]. Available: <https://www.ceicdata.com/en/indicator/poland/coal-production>. [Data uzyskania dostępu: 25 sierpień 2022].
- [13] Spółka Restrukturyzacji Kopalń, „SRK,” [Online]. Available: <https://srk.com.pl/kontakt/kopalnie-wegla-kamiennego>. [Data uzyskania dostępu: 15 wrzesień 2022].
- [14] P. Roos i A. Haselbacher, „Analytical modeling of advanced adiabatic compressed air energy storage: Literature review and new models,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 163, nr 112464, 2022.
- [15] Ł. Bartela, M. Lutyński, G. Smolnik i S. Waniczek, „Podziemny magazyn na sprężone powietrze zabudowany zwłaszcza w poeksploatacyjnym”. Polska Patent P.431156, 16 wrzesień 2019.
- [16] Ł. Bartela, M. Lutyński, G. Smolnik i S. Waniczek, „Underground storage of compressed air in particular in the post-mining mine shaft”. Patent EPO 20000302.8/EP20000302, 2020.
- [17] Ł. Bartela, S. Waniczek i M. Lutyński, „Concept of the thermal integration of the compressed air energy storage system with the power plant,” *Journal of Power Technologies*, tom 99, nr 3, pp. 176-186, 2019.
- [18] Polityka Energetyczna Polski do 2040 roku. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 02 luty 2021. [Online]. Available: <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski-do-2040-r-przyjeta-przez-rade-ministrow>. [Data uzyskania dostępu: 28 lipiec 2022].
- [19] M. Rosół, Ł. Bartela i S. Waniczek, „Podziemny system do pozyskiwania i magazynowania ciepła oraz chłodu”. Patent P.438857, 2021.
- [20] M. Heidari, M. Mortazavi i A. Rufer, „Design, modeling and experimental validation of a novel finned reciprocating compressor for Isothermal

- Compressed Air Energy Storage applications," *Energy*, nr 140, pp. 1252-1266, 2017.
- [21] S. Simons, J. J. Moore, K. Wygant, H. Miller, E. ". Broerman i A. Rimpel, „Chapter 16. Novel Concepts & Research,” w *Advanced Thermodynamics for Engineers*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 569-571.
- [22] J. J. Moore, T. Allison, T. Evans, J. Kerth i J. Pacheco, „Development and testing of multi-stage internally cooled centrifugal compressor,” w *44th Turbomachinery & 31st Pump Symposia*, Houston, 2015.
- [23] Ł. Bartela, S. Waniczek, M. Brzuszkiewicz, B. Stanek i J. Ochmann, „System izobarycznych zbiorników na dwutlenek węgla dla systemów magazynowania energii.”. Polska Patent P.437305, 2021.
- [24] B. Stanek, J. Ochmann, Ł. Bartela, M. Brzuszkiewicz, S. Rulik i S. Waniczek, „Isobaric tanks system for carbon dioxide energy storage – The performance analysis,” *Journal of Energy Storage*, tom 52(A), 2022.
- [25] R. D. Allen i T. J. Doherty, „Aquifer Stability Investigations (CONF-810997--2),” Pacific Northwest-Laboratory, Richland, 1981.
- [26] F. Crotagino, K.-U. Mohmeyer i R. Scharf, „Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation,” w *Proceedings of SMRI Spring 2001 Meeting*, Orlando, Florida, USA, 15-18 April 2001.
- [27] S. Zunft, C. Jakiel, M. Koller i C. Bullough, „Adiabatic compressed air energy storage for the grid integration of wind power,” w *Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks*, Delft, 2006.
- [28] S. Zunft, V. Dreissigacker, M. Bieber, A. Banach, C. Klabund i O. Warweg, „Electricity storage with adiabatic compressed air energy storage: Results of the BMWi-project ADELE-ING,” w *International ETG Congress 2017*, Bonn, 2017.
- [29] S. Mucci, A. Bisch, S. Briola i A. Baccioli, „Small-scale adiabatic compressed air energy storage: control strategy analysis via dynamic modelling,” *Energy Conversion and Management*, tom 243, 2021.
- [30] S. Chen, A. Arabkoohsar, T. Zhu i M. P. Nielsen, „Development of a micro-compressed air energy storage system model based on experiments,” *Energy*, tom 197, 2020.

- [31] I. Glendenning, „Long-term prospects for compressed air storage,” *Applied Energy* (2), pp. 39-56, 1976.
- [32] RWE Power AG, „www.rwe.com/rwepower,” RWE, 2010. [Online]. Available: https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Round_Pegs/Power_Cycles_and_Energy_Storage_Supporting_Files/ADELE%20%E2%80%93%20Adiabatic%20Compressed-Air%20Energy%20Storage%20for%20Electricity%20Supply.pdf. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2022].
- [33] Hydrostor, [Online]. Available: <https://www.hydrostor.ca/goderich-a-caes-facility/>. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2022].
- [34] Electric Power Research Institute, „EPRI,” 19 wrzesień 1989. [Online]. Available: <https://www.epri.com/research/products/GS-6491>.
- [35] S. Moskowitz i R. Schaeffer, „Coal-Fired CAES System Using Fluidized Bed Combustion,” *J. ENERGY*, tom 7, nr 6, pp. 724-728, 1983.
- [36] U.S. Department of Energy, „EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications,” EPRI_DOE, Palo Alto, 2003.
- [37] F. Crotagino, G.-S. Schneide i D. J. Evans, „Renewable energy storage in geological formations,” *Journal of Power and Energy*, pp. 1-15, 18 sierpień 2017.
- [38] UNIPER, „Uniper Energy,” 23 kwiecień 2021. [Online]. Available: <https://www.uniper.energy/news/ewe-and-uniper-plan-to-build-hydrogen-hub-at-huntorf-site>. [Data uzyskania dostępu: 3 maj 2022].
- [39] Hydrostor, „Youtube,” 26 marzec 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=cOWjwwKSR78>. [Data uzyskania dostępu: 10 czerwiec 2022].
- [40] A. Colthorpe, „Energy Storage News,” 10 styczeń 2022. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/goldman-sachs-invests-us250-million-in-long-duration-energy-storage-provider-hydrostor/>. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2022].
- [41] „Apex CAES,” 2022. [Online]. Available: <http://www.apexcaes.com/bethel-energy-center>. [Data uzyskania dostępu: 3 sierpień 2022].
- [42] E. Cast, „Wywiad z Jackiem Farleyem, CEO Apex,” 29 kwiecień 2019. [Online]. Available: <https://podcasts.apple.com/us/podcast/57-subterranean->

storage-apex-caes/id1217320964?i=1000437106281. [Data uzyskania dostępu: 3 maj 2022].

- [43] E. Cast, „Energy Cast,” 29 kwiecień 2019. [Online]. Available: <https://energy-cast.com/57-apex.html>. [Data uzyskania dostępu: 3 maj 2022].
- [44] S. Donadei i G. S. Schneider, „Compressed Air Energy Storage in Underground Formations,” *Storing Energy*, tom 6, pp. 113-133, 2016.
- [45] K. Mongird, V. Viswanathan, J. Alam, C. Vartanian i P. Northwest, „2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment,” U.S. Department of Energy, 2020.
- [46] S. van der Linden, „Bulk energy storage potential in the USA, current developments and future prospects.,” *Energy*, nr 31, pp. 3446-3457, 2006.
- [47] J. J. Proczka, K. Muralidharan, D. Villela, J. H. Simmons i G. Frantziskoni, „Guidelines for the pressure and efficient sizing of pressure vessels for compressed air energy storage,” *Energy Conversion and Management*, nr 65, pp. 597-605, 2013.
- [48] J. Liu, X. Zhang, Y. Xu, Z. Chen, H. Chen i C. Tan, „Economic Analysis of using Above Ground Gas Storage Devices for Compressed Air Energy Storage System,” *Energy Conversion and Management*, tom 23, nr 6, pp. 535-543, 2014.
- [49] U.S. Department of Energy, „U.S. Department of Energy,” sierpień 2012. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/SustainX.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 25 sierpień 2022].
- [50] U.S. Department of Energy, „U.S. Department of Energy,” sierpień 2013. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/SustainX-Isothermal-Compressed-Air-ES-Aug2013.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 24 sierpień 2022].
- [51] M. Lamonica, „IEEE Spectrum,” 13 sierpień 2013. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/compressed-air-energy-storage-makes-a-comeback>. [Data uzyskania dostępu: 23 czerwiec 2022].
- [52] B. Bollinger, „U.S. Department of Energy,” 1 kwiecień 2015. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/10/f34/Final->

- Technical-Report-SustainX_DE-OE0000231_April_2015.pdf. [Data uzyskania dostępu: 22 sierpień 2022].
- [53] J. St. John, „Green Tech Media,” 31 marzec 2015. [Online]. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/sustainx-to-merge-with-general-compression-abandon-above-ground-caes-ambiti>. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2022].
- [54] E. Bellini, „PV Magazine,” 11 luty 2021. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/11/augwinds-compressed-air-tech-for-renewables-storage/>. [Data uzyskania dostępu: 28 sierpień 2022].
- [55] S. Surkes, „The Times of Israel,” 15 grudzień 2021. [Online]. Available: <https://www.timesofisrael.com/iec-inks-8-million-deal-with-company-that-uses-air-water-to-store-energy/>. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2022].
- [56] Augwind, „Augwind,” [Online]. Available: <https://www.aug-wind.com/energy-storage>. [Data uzyskania dostępu: 20 luty 2022].
- [57] H. Yin, C. Yang, H. Ma, X. Shi, X. Chen, N. Zhang, X. Ge i W. Liu, „Study on Damage and Repair Mechanical Characteristics of Rock Salt Under Uniaxial Compression,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20 wrzesień 2018.
- [58] F. Crotagino, G.-S. Schneider i D. J. Evans, „Renewable energy storage in geological formations,” *Journal of Power and Energy*, pp. 100-114, 18 sierpień 2017.
- [59] Gas Storage Poland Sp. z o.o., „Gas Storage Poland,” [Online]. Available: <https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/menu/wiedza/#historia-magazynowania-gazu-w-polsce>. [Data uzyskania dostępu: 15 maj 2022].
- [60] P. Berest, „Thermomechanical Aspects of high frequency cycling in salt storage caverns,” w *International Gas Union Research Conference 2011*, Seul, 2011.
- [61] H. Spreckels i F. Cortogino, „Salt caverns for peak shaving - Reservoirs for seasonal balance? New market requirements and appropriate storage solutions,” w *SMRI Fall 2002 Meeting*, Bad Ischl, 2002.
- [62] Państwowy Instytut Geologiczny, „PGI,” [Online]. Available: <https://www.pgi.gov.pl/muzeum/kopalnia-wiedzy-1/10487-skaly-osadowe.html?showall=1>. [Data uzyskania dostępu: 20 luty 2022].

- [63] Sandia National Laboratories, „U.S. Department of Energy,” styczeń 2012. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1035330>. [Data uzyskania dostępu: 26 sierpień 2022].
- [64] M. King i J. Apps, „Compressed air energy storage: Matching the earth to the turbomachinery-no small task,” 2014.
- [65] CEDIGAZ, „Underground Gas Storage In The World - 2018 Status,” 2018.
- [66] M. C. Grubelich, S. J. Bauer i P. W. Cooper, „Potential Hazards of Compressed Air Energy Storage in Depleted Natural Gas Reservoirs,” Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2011.
- [67] EPRI, „Compressed air energy storage newsletter. April 2013, 8 pp.”.
- [68] F. Johansson, J. Spross, D. Damasceno, J. Johansson i H. Syille, „Investigation of research needs regarding the storage of hydrogen gas in lined rock caverns: Prestudy for Work Package 2.3 in HYBRIT Research Program 1,” KTH Royal Institute of Technology, Sztokholm, 2018.
- [69] H. Kjørholt i E. Broch, „The water curtain—a successful means of preventing gas leakage from high-pressure, unlined rock caverns,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, tom 7, nr 2, pp. 127-132, 1992.
- [70] S. U. I. a. LRC, „Commercial potential of natural gas storage in lined rock caverns (LRC),” U.S. Department of Energy, Morgantown, 1999.
- [71] Deostock, „Geostock,” [Online]. Available: <https://www.geostockgroup.com/en/activities/types-of-underground-storage/mined-rock-caverns/#lined-rock-cavern>. [Data uzyskania dostępu: 30 sierpień 2022].
- [72] G. Zanganeh, „Demonstration of the ability of caverns for compressed air storage with thermal energy recuperation,” Swiss Federal Office of Energy SFOE, Bern, 2014.
- [73] G. Zanganeh, „Demonstration of the Ability of Caverns for Compressed Air Storage with Thermal Energy Recuperation,” Swiss Federal Office of Energy SFOE, Bern, 2016.
- [74] J. Kabiesz, *Koincydencja górniczych zagrożeń naturalnych*, Katowice: Główny Instytut Górnictwa, 2016.

- [75] J. Milewski, K. Badyda i Ł. Szablowski, „Compressed Air Energy Storage Systems,” *Journal of Power Technologies*, tom 4, nr 96, pp. 245-260, 2016.
- [76] S. Nagy, K. Polański i J. Ślizowski, „The possibility of applying CAES technology in Polish conditions,” *AGH Drilling, Oil, Gas*, tom 31, nr 2, pp. 207-214, 2014.
- [77] L. Lankof, K. Polański, J. Ślizowski i B. Tomaszewska, „Possibility of energy storage in salt caverns,” *AGH Drilling, Oil, Gas*, tom 33, nr 2, pp. 405-415, 2016.
- [78] G. Czapowski i R. Tarkowski, „Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność do budowy kawern do magazynowania wodoru,” *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, nr 472, pp. 53-82, 2018.
- [79] LOTOS, „LOTOS,” [Online]. Available: https://www.lotos.pl/2491/poznaj_lotos/projekty_dofinansowane_przez_ue/h_02022022. [Data uzyskania dostępu: 20 wrzesień 2022].
- [80] Energetyka24, „Energetyka24,” 14 czerwiec 2022. [Online]. Available: <https://energetyka24.com/gaz/wiadomosci/pgnig-przygotowuje-sie-do-swiadczenia-uslug-magazynowania-wodoru-w-kawernach>. [Data uzyskania dostępu: 10 sierpień 2022].
- [81] E. Kochanek, „Podziemne magazynowanie paliw w strukturach geologicznych jako element bezpieczeństwa energetycznego Polski,” pp. 302-311, 2007.
- [82] Wyższy Urząd Górniczy, „WUG,” 31 grudzień 2021. [Online]. Available: https://www.wug.gov.pl/bhp/nadzorowane_zaklady. [Data uzyskania dostępu: 10 wrzesień 2022].
- [83] M. Lutyński, „An overview of potential benefits and limitations of Compressed Air Energy Storage in abandoned coal mines,” w *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Andrychów, 2017.
- [84] S. Waniczek, Ł. Bartela, M. Lutyński, S. Rulik, M. Brzuszkiewicz, K. Kołodziej, J. Ochmann, G. Smolnik, M. Jurczyk i M. Lipka, „Design and construction challenges for a hybrid air and thermal energy storage system built in the post-mining shaft,” w *The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems*, Giardini Naxos, 2021.

- [85] A. Kidybiński, „Geotechniczne aspekty adaptacji wyrobisk likwidowanych kopalń węgla w podziemne magazyny gazu,” *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko*, pp. 37-63, 2004.
- [86] S. Mei, J. Wang, F. Tian, L. Chen, X. Xue, Q. Lu, Y. Zhou i X. Zhou, „Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system: TICC-500,” *Science China*, 5 luty 2015.
- [87] Q. Zhou, D. Dongmei, L. Chang, H. Qing i L. Wenyi, „A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system,” *Energy*, tom 188, nr (115993), 2019.
- [88] T. Bauer, W.-D. Steinmann, D. Laing i R. Tamme, „Thermal energy storage materials and systems,” *Annual Review of Heat Transfer*, tom 15, pp. 131-177, 2012.
- [89] R. Tamme, T. Bauer i E. Hahne, „Heat Storage Media,” *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2009.
- [90] H. Kerskes, „Thermochemical Energy Storage,” *Storing Energy*, pp. 345-372, 2016.
- [91] S. Zunft, R. Tamme, U. Hartwig i A. Ternedde, „Thermal Energy Storage Technologies for Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storages (AA-CAES),” w *STORE – Storage for Renewable Energies*, Aix-en-Provence, 2003.
- [92] L. Geissbühler, V. Becattini, G. Zanganeh, S. Zavattoni, M. Barbato, A. Haselbacher i A. Steinfeld, „Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 1: Plant description and tests with sensible thermal-energy storage,” *Journal of Energy Storage*, tom 17, pp. 129-139, 2018.
- [93] S. Zunft, S. Freude i E. M. Schlichtenmayer, „Large-scale electricity storage with Adiabatic CAES - The ADELE-ING Project,” w *Energy Storage Global Conference*, Paryż, 2014.
- [94] K. Rusin, J. Ochmann, Ł. Bartela, S. Rulik, B. Stanek, M. Jurczyk i S. Waniczek, „Influence of geometrical dimensions and particle diameter on exergy performance of packed-bed thermal energy storage,” *Energy*, nr 260, 2022.

- [95] M. P. Boyce, „Axial-Flow Compressors,” w *Gas Turbine Engineering Handbook*, Elsevier - Health Sciences Division, 2011, pp. 303-355.
- [96] R. Bershader, „Compressor choke. Choke prevention in axial compressors.,” *Turbomachinery International*, pp. 24-27, wrzesień 2021.
- [97] D. R. Hundslow, W. Grindley, R. M. Loughlin i J. Daly, „The development of a combustion system for a 110 MW CAES plant,” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, tom 120, pp. 875-883, 1998.
- [98] Y. Sanjay, O. Singh i B. N. Prasad, „Energy and exergy analysis of steam cooled reheat gas–steam combined cycle,” *Applied Thermal Engineering*, tom 27, pp. 2779-2790, 2007.
- [99] Wyższy Urząd Górniczy, „Wyższy Urząd Górniczy,” 1 czerwiec 2010. [Online]. Available: https://www.wug.gov.pl/bhp/23_05_2010. [Data uzyskania dostępu: 15 lipiec 2022].
- [100] S. Waniczek, P. Kołodziej i Ł. Bartela, „Konceptcja odzysku ciepła odpadowego powstałego w wyniku procesu zestudzenia wody technologicznej w kopalni „BOGDANKA”,” *Rynek Energii*, tom 5 (144), 2019.
- [101] Megatem EC-Lublin Spółka z o.o., „Megatem,” 2022. [Online]. Available: https://megatem-ec.pl/files/Informacje_o_sieci.pdf. [Data uzyskania dostępu: 1 wrzesień 2022].
- [102] Therminol, „Therminol,” [Online]. Available: <https://www.therminol.com/product/71093442>. [Data uzyskania dostępu: 21 lipiec 2022].
- [103] A. J. Giramonti i E. B. Smith, „Analytical simulation of the champagne effect in CAES Power Plant,” *J. Energy*, tom 7, nr 6, pp. 570-574, 1983.
- [104] CZEK, „CZEK.EU,” 30 czerwiec 2017. [Online]. Available: <https://www.czek.eu/strona%20eksploatacji/strona%20zaszyfrowana/07obudowa.htm>. [Data uzyskania dostępu: 25 lipiec 2022].
- [105] M. Rotkegel, „Odrzwia obudowy ŁPw – Projektowanie i wyniki badań,” *Journal of Sustainable Mining*, tom 12, nr 1, pp. 34-40, 2013.
- [106] G. Smolnik, „Analiza stateczności wyrobiska szybowego jako podziemnego magazynu energii sprężonego powietrza i ciepła.,” *Prace Katedry*

Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców Politechniki Śląskiej, BK-306/RG-4/2021, 2021.

- [107] PRUE/Liesega, „prue.pl,” [Online]. Available: <http://www.prue.pl/index.php/produkty/zamocowania-stalosiowe>. [Data uzyskania dostępu: 10 maj 2022].
- [108] Jiangsu Qianyuanfeida electric equipment Co.,Ltd, „Jiangsu Qianyuanfeida electric equipment Co.,Ltd,” [Online]. Available: <http://www.pipe-expansionjoint.com/sale-12548090-steam-flange-connection-single-axial-expansion-joints-corrugated-pipe-compensator.html>. [Data uzyskania dostępu: 3 maj 2022].
- [109] S. Waniczek, J. Ochmann, Ł. Bartela, S. Rulik, M. Lutyński, M. Brzuszkiewicz, K. Kołodziej, G. Smolnik i M. Lipka, „Design and Construction Challenges for a Hybrid Air and Thermal Energy Storage System Built in the Post-Mining Shaft,” *Journal of Thermal Science*, tom 31, pp. 1302-1317, 2022.
- [110] Ł. Bartela, J. Ochmann, S. Waniczek, M. Lutyński, G. Smolnik i S. Rulik, „Evaluation of the energy potential of an adiabatic compressed air energy storage system based on a novel thermal energy storage system in a post mining shaft,” *Journal of Energy Storage*, tom 54, 2022.
- [111] Z. Kłeczek, A. Radomski i D. Zeljaś, *Podziemne magazynowanie*, Gliwice: Centrum Mechanizacji Górnictwa Komag, 2005.
- [112] *PN EN 1991-4:2008 Eurokod 1 -- Oddziaływania na konstrukcje -- Część 4: Silosy i zbiorniki*.
- [113] Urząd Dozoru Technicznego, *Warunki WUDT-UC/2003 wydanie 2017*.
- [114] P. Hartlieb, M. Toifl, F. Kuchar, R. Meisels i T. Antretter, „Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution,” *Minerals Engineering*, 9 Listopad 2015.
- [115] PSE, „PSE,” [Online]. Available: <https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-rb/raporty-dobowe-z-funkcjonowania-rb/podstawowe-wskazniki-cenowe-i-kosztowe/rynkowa-cena-energii-elektrycznej-rce>. [Data uzyskania dostępu: 25 marzec 2022].
- [116] TGE, „TGE,” [Online]. Available: <https://tge.pl/dane-statystyczne>. [Data uzyskania dostępu: 15 wrzesień 2022].

- [117] Jastrzębie-Zdrój NaszeMiasto, „Jastrzębie-Zdrój NaszeMiasto,” 12 październik 2016. [Online]. Available: <https://jastrzebiezdroj.naszemiasto.pl/zakonczono-budowe-szybu-w-bziu-koszt-ponad-300-mln-zl/ar/c3-3884592>. [Data uzyskania dostępu: 9 czerwiec 2022].
- [118] R. Harzyński, P. Ziółkowski, S. Gotzman, B. Kraszewski, T. Ochrymiuk i J. Badur, „Comprehensive thermodynamic analysis of the CAES system coupled with the underground thermal energy storage taking into account global, central and local level of energy conversion,” *Renewable energy*, nr 169, pp. 379-403, 2021.
- [119] D. J. Evans, „evans Review of underground fuel storage options, CAES plants and assessments - Locations and operational parameters,” British Geological Survey, 2016.
- [120] K. G. Vosburgh, „Conceptual design for a pilot/demonstration compressed air storage facility employing a solution-mined salt cavern.,” EPRI-EM-391, 1977.
- [121] United Engineers and Constructors, Inc., „Preliminary design study of compressed-air energy storage in a salt dome. Volume 1: executive summary. Final report,” 1982.
- [122] National Energy Technology Laboratory, „Department of Energy,” Wrzesień 2012. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/NETL-Final-Report-9-6-12.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 28 sierpień 2022].
- [123] U.S. Environmental Protection Agency, „U.S. Environmental Protection Agency,” 28 luty 2013. [Online]. Available: <https://archive.epa.gov/region6/6pd/air/pd-r/ghg/web/pdf/chamisa-resp2completeness-det021113.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 30 Sierpień 2022].
- [124] Ridge Energy Storage & Grid Services L.P, „Ridge Energy Storage,” [Online]. Available: <http://www.ridgeenergystorage.com/>. [Data uzyskania dostępu: 31 sierpień 2022].
- [125] Duke Energy, „Duke Energy,” wrzesień 2014. [Online]. Available: <https://news.duke-energy.com/releases/8-billion-green-energy-initiative-proposed-for-los-angeles>. [Data uzyskania dostępu: 21 sierpień 2022].

- [126] Pathfinder Energy, „Youtube,” 20 wrzesień 2014. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=7i10XVto6_w. [Data uzyskania dostępu: 25 sierpień 2022].
- [127] C. Murray, „Energy Storage News,” 22 czerwiec 2022. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/chevron-pulls-out-of-utah-green-hydrogen-energy-storage-project/>. [Data uzyskania dostępu: 20 lipiec 2022].
- [128] ACES Delta, „ACES Delta,” 2022. [Online]. Available: <https://aces-delta.com/hubs/>. [Data uzyskania dostępu: 30 sierpień 2022].
- [129] Rangeland Engineering , [Online]. Available: <https://www.rangelandeng.com/alberta-saskatchewan-intertie-and-storage-assist-project/>. [Data uzyskania dostępu: 15 sierpień 2022].
- [130] Rocy Mountain Power Energy Storage Inc., „RMP Energy Storage Inc.,” 2021. [Online]. Available: https://www.rmpenergystorage.com/_files/ugd/2a9f23_f3e1e304beea40ebb5e938f32bb8d425.pdf. [Data uzyskania dostępu: 30 sierpień 2022].
- [131] K. Europejska, „European Commission,” styczeń 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/inea/sites/default/files/1.12-0020-uk-s-m-15_action_fiche_final_1.pdf. [Data uzyskania dostępu: 23 sierpień 2022].
- [132] K. Europejska, „European Commission,” grudzień 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/inea/sites/default/files/cefpub/summary_1.12-0020-uk-s-m-15_final.pdf. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2022].
- [133] A. Vovk, 2020. [Online]. Available: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/tyndp-documents/TYNDP%202016/projects/P1010.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 28 sierpień 2022].
- [134] A. Vovk. [Online]. Available: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/tyndp-documents/TYNDP%202016/projects/P1005.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 22 sierpień 2022].
- [135] A. Vovk. [Online]. Available: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/tyndp-documents/TYNDP%202016/projects/P1013.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 20 sierpień 2022].
- [136] The european network for transmission system operators electricity, „ENTSO-E,” [Online]. Available:

- https://tyndp.entsoe.eu/tyndp2018/projects/storage_projects/1013. [Data uzyskania dostępu: 31 sierpień 2022].
- [137] The european network for transmission system operators electricity, „ENTSO-E,” [Online]. Available: https://tyndp.entsoe.eu/tyndp2018/projects/storage_projects/1022. [Data uzyskania dostępu: 30 sierpień 2022].
- [138] The european network for transmission system operators electricity, „ENTSO-E,” [Online]. Available: https://tyndp.entsoe.eu/tyndp2018/projects/storage_projects/1023. [Data uzyskania dostępu: 31 sierpień 2022].
- [139] A. S. Pedersen, B. Elmegaard, C. H. Christensen, C. Kjølner, F. Elefsen, J. B. Hansen, J. Hvid, S. P. Alex, S. K. Kær, T. Vangkilde-Pedersen i T. F. Jensen, „Status and recommendadtions for RD&D on energy storage technologies in a Danish context.,” Technical University of Denmark, 2014.
- [140] W. Liu, L. Liu, G. Xu, F. Liang, Y. Yang, W. Zhang i Y. Wu, „A Novel Hybrid-Fuel Storage System of Compressed Air Energy,” *Energies*, tom 7, pp. 4988-5010, 2014.
- [141] G. Ahang, Y. Li, J. J. K. Daemen, C. Yang, Y. Wu, K. Zhang i Y. Chen, „Geotechnical Feasibility Analysis of Compressed Air Energy,” *Rock Mech Rock Eng*, 1 listopad 2014.
- [142] C. Wei, „Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences,” 1 czerwiec 2020. [Online]. Available: http://english.iet.cas.cn/research_22384/technologytransfer/201907/t20190701_212339.html. [Data uzyskania dostępu: 1 wrzesień 2022].
- [143] China Energy Storage Alliance , „China Energy Storage Alliance,” 26 sierpień 2020. [Online]. Available: <http://en.cnesa.org/new-blog/2020/9/26/construction-begins-on-salt-cave-compressed-air-energy-storage-national-test-and-demonstration-project-c7mcp>. [Data uzyskania dostępu: 25 sierpień 2022].
- [144] M. Hämmerle, M. Haider, R. Willinger, K. Schwaiger, R. Eisl i K. Schenzel, „Saline Cavern Adiabatic Compressed Air Energy Storage Using Sand as Heat Storage Material,” *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* , tom 5, nr 1, pp. 32-45, 2017.

- [145] Storelectric, „Storelectric,” [Online]. Available: <https://www.storelectric.com/technology/>. [Data uzyskania dostępu: 24 Sierpień 2022].
- [146] The Hydrodynamics Group, LLC, „The Hydrodynamics Group, LLC,” [Online]. Available: <http://www.hydrodynamics-group.com/project-gallery/detail/?id=3>. [Data uzyskania dostępu: 20 sierpień 2022].
- [147] United States Environmental Protection Agency, „United States Environmental Protection Agency,” 21 sierpień 2014. [Online]. Available: <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/r9uic-ca5-fy13-1-pge-caes-uic-permit-2014-08-20.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 30 sierpień 2022].
- [148] Electric Power Research Institute, „Electric Power Research Institute,” 26 marzec 2012. [Online]. Available: <https://www.epri.com/research/products/1023617>. [Data uzyskania dostępu: 10 lipiec 2022].
- [149] Pacific Northwest National Laboratory, „Techno-economic Performance Evaluation of Compressed Air Energy Storage in the Pacific Northwest,” Richland, 2010.
- [150] D. Sopher, C. Juhlin, T. Levendal, M. Erlström, K. Nilsson i J. D. S. S. Da Silva Soares, „Evaluation of the subsurface compressed air energy storage (CAES),” *Environmental Earth Sciences*, 25 luty 2019.
- [151] The Hydrodynamics Group, „The Hydrodynamics Group,” [Online]. Available: <http://hydrodynamics-group.net/norton.html>. [Data uzyskania dostępu: 23 sierpień 2022].
- [152] Natural Resources Research Institute, „COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE (CAES) IN NORTHERN MINNESOTA USING UNDERGROUND MINE WORKINGS AND ABOVE GROUND FEATURES,” University of Minnesota, Duluth, 2015.
- [153] Australian Renewable Energy Agency (ARENA), „Australian Renewable Energy Agency,” 19 Luty 2021. [Online]. Available: <https://arena.gov.au/projects/hydrostor-angas-a-caes-project/>. [Data uzyskania dostępu: 19 wrzesień 2022].

- [154] Pacific Northwest Laboratory, „Technology Assessment Report for the Soyland Power Cooperative, Inc. Compressed Air Energy Storage System (CAES),” *Environmental Science and Engineering*, 1982.
- [155] L. Li, W. Liang, H. Lian, J. Yang i M. Dusseault, „Compressed air energy storage: Characteristics, basic principles, and geological considerations,” *Advances in Geo-Energy Research*, tom 2, nr 2, pp. 135-147, 2018.
- [156] Y. Zhou, C. Xia, P. Zhang, S. Zhou i Y. Hu, „Air Leakage from an Underground Lined Rock Cavern for Compressed Air Energy Storage through a Rubber Seal,” w *13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*, Montreal, Canada, 2015.
- [157] T. Okuno, N. Wakabayashi, K. Niimi, Y. Kurihara i M. Iwano, „Advanced natural gas storage system and verification tests of lined rock cavern - ANGAS project in Japan -,” *International Journal of the JCRM*, tom 5, nr 2, pp. 95-102, 2009.
- [158] RICAS2020, „RICAS2020,” [Online]. Available: <https://www.ricas2020.eu/>. [Data uzyskania dostępu: 30 Sierpień 2022].
- [159] MUL, „RICAS 2020. Feasibility study and conceptual design,” 2018.
- [160] MUL, „Report of the results of the numerical simulation.,” 2018.
- [161] MUL, „Final dissemination and exploitation plan,” 2018.
- [162] HBI, „Standards review and technology transfer,” 2018.
- [163] SINTEF, „Report on material qualification including guidelines for material selection/development,” 2018.
- [164] S. Succar i R. H. Williams, „Compressed Air Energy Storage: Theory, resources, and applications for wind power,” Princeton Environmental Institute, 2008.

Spis rysunków

Rysunek 1.1 Dynamika wzrostu mocy zainstalowanej w KSE w latach 1960÷2021 [5].	13
Rysunek 1.2 Krajowe zapotrzebowanie na moc oraz moc dyspozycyjna dostępna dla OSP w szczytach dobowych krajowego zapotrzebowania na moc w 2021 roku [4]......	13
Rysunek 3.1 Schemat siłowni gazowej obiegu Braytona-Joule'a	22
Rysunek 3.2: Obieg porównawczy siłowni turbogazowej w układzie p-v oraz T-s	23
Rysunek 3.3: Rzeczywisty obieg turbiny gazowej (kolor czerwony) i teoretyczny obieg Braytona-Joule'a (kolor zielony).....	24
Rysunek 3.4 Schemat ideowy systemu DCAES	32
Rysunek 3.5 Schemat ideowy systemu ACAES.....	33
Rysunek 3.6 Schemat ideowy systemu ICAES.....	34
Rysunek 3.7 Kawerny solne elektrowni Huntorf [26]......	35
Rysunek 3.8 Schemat ideowy systemu DCAES Huntorf	36
Rysunek 3.9 Widok na elektrownię Huntorf [37]	38
Rysunek 3.10 Schemat ideowy systemu DCAES McIntosh.....	39
Rysunek 3.11 Instalacja Hydrostor Goderich A-CAES.....	41
Rysunek 3.12 Wizualizacja instalacji Bethel [41]	42
Rysunek 3.13 Schemat ideowy instalacji "Bethel" [43]	42
Rysunek 4.1 Polimerowy zbiornik firmy Augwind [55]......	44
Rysunek 4.2 Przykładowa kawerna solna [59]......	46
Rysunek 4.3 Magazyn sprężonego powietrza w warstwie wodonośnej [64]	49
Rysunek 4.4 Mapa lokalizacyjna wysadowych i pokładowych złóż soli kamiennej oraz perspektywicznych obszarów złożowych dla budowy magazynów podziemnych w Polsce [59]	53
Rysunek 4.5 Mapa czynnych i zlikwidowanych szybów na terenie GZW [84]......	55
Rysunek 4.6 Klasyfikacja magazynów ciepła.....	57
Rysunek 5.1 Rysunek ideowy wynalazku polegającego na wykorzystaniu poeksploatacyjnego szybu kopalni jako magazynu sprężonego powietrza [15] [16].	67
Rysunek 5.2 Schemat ideowy koncepcyjnego systemu ACAES z izochorycznym zbiornikiem na sprężone powietrze.	70

Rysunek 5.3 Schemat ideowy koncepcyjnego systemu ACAES z izobarycznym zbiornikiem na sprężone powietrze.....	71
Rysunek 5.4 Różnica wysokości zwierciadeł wody w systemie ACAES z kompensacją wodną	74
Rysunek 5.5 Strukturalny model górotworu w otoczeniu wyrobisk szybowych i warunki brzegowe	76
Rysunek 5.6 Miejsca monitorowania przemieszczenia punktów obudowy w trakcie symulacji cykli sprężania i rozprężania powietrza we wnętrzu szybu.....	77
Rysunek 5.7 Wektory przemieszczeń oraz miejsca, gdzie doszło do osiągnięcia wytrzymałości granicznej na ścinanie na zakończenie drugiego cyklu sprężania powietrza	78
Rysunek 5.8 Przemieszczenia sensorów obudowy szybu, w trakcie trwania cyklu pracy, w kierunku Y.....	79
Rysunek 5.9 Przemieszczenia sensorów obudowy szybu, w trakcie trwania cyklu pracy, w kierunku X.....	79
Rysunek 5.10 Zasobnik EPK_TES_1	81
Rysunek 5.11 Zasobnik EPK_TES_2 – przykład zabudowy czterosegmentowego systemu TES wewnątrz szybu	83
Rysunek 5.12 Zasobnik EPK_TES_2 - podstawowe elementy systemu TES	84
Rysunek 5.13 Zasobnik EPK_TES_2 - przekrój częściowy przez typowy segment systemu TES bez wypełnienia	85
Rysunek 5.14 Zasobnik EPK_TES_2. Przekrój częściowy przez końcowy segment TES z wypełnieniem.....	86
Rysunek 5.15 Zasobnik EPK_TES_3 - sposób połączenia zasobnika z główną konstrukcją nośną	88
Rysunek 5.16 Zasobnik EPK_TES_3 – izolacja cieplna w miejscu połączenia uszu montażowych z płaszczem pierścienia nośnego.....	89
Rysunek 5.17 Widok na model obliczeniowy korka szybowego.....	91
Rysunek 5.18 Stopa oporowa korka szybowego.....	91
Rysunek 5.19 TES Rezultaty analiz wytrzymałościowych przeprowadzanych z wykorzystaniem oprogramowania Dlubal RFEM 5.18 dla opcji z	

podwieszonym zespołem TES (podkreślono rezultat prezentujący wytężenie kotew korka szybowego)	92
Rysunek 5.20 Przemieszczenia korka szybowego z podwieszonym zespołem TES	93
Rysunek 5.21 Rezultaty analiz wytrzymałościowych przeprowadzonych z wykorzystaniem oprogramowania Dlubal RFEM 5.18 dla opcji bez podwieszonego zespołu TES (podkreślono rezultat prezentujący wytężenie kotew korka szybowego)	94
Rysunek 5.22 Naprężenia w najbardziej wytężonej stopie szybowej korka	95
Rysunek 5.23 Deformacja stopy szybowej i konstrukcji nośnej dla kompletnego systemu TES	96
Rysunek 5.24 Schemat obciążeń w zasobniku od wypełnienia materiałem skalnym.	97
Rysunek 5.25 Nacisk na pionowe ściany zasobnika w funkcji wysokości napełnienia (głębokości zasypu).....	101
Rysunek 5.26 Obciążenie pionowe od tarcia materiału o ścianę (równoległe do ściany)	103
Rysunek 5.27 Wariant W1, ładowanie - oszacowany współczynnik bezpieczeństwa 9,97	108
Rysunek 5.28 Wariant W2, rozładowywanie - oszacowany współczynnik bezpieczeństwa 5,25	109
Rysunek 5.29 Wariant W3, ładowanie – rozkład naprężeń zredukowanych	110
Rysunek 5.30 Wariant W3, rozładowywanie – widok na rejon występowania największych naprężeń.....	111
Rysunek 5.31 Wariant W4, rozładowywanie – rozkład naprężeń zredukowanych..	112
Rysunek 5.32 Wariant W4, rozładowywanie – widok na rejon występowania największych naprężeń.....	113
Rysunek 5.33 Pierścień nośny – rozkład naprężeń zredukowanych	114
Rysunek 5.34 Pierścień nośny – widok na rejon występowania największych	115
Rysunek 5.35 Rozkład temperatur w ciągu montażowym TES.....	117
Rysunek 5.36 Straty ciepła w ciągu montażowym TES	118
Rysunek 5.37 Uproszczony schemat ideowy rozpatrywanego systemu ACAES wraz z punktami charakterystycznymi.	121

Rysunek 5.38 Sposób oznaczania wariantów dla kombinacji ciśnień i temperatury systemu ze zbiornikiem izochorycznym	129
Rysunek 5.39 Sposób oznaczania wariantów dla kombinacji ciśnień systemu ze zbiornikiem izobarycznym	129
Rysunek 5.40 Sprawność oraz sprężę sekcji sprężarki w funkcji ciśnienia w magazynie sprężonego powietrza	130
Rysunek 5.41 Wykres gęstości energii systemu ACAES w funkcji stosunku ciśnień w magazynie z podziałem na warianty.....	135
Rysunek 5.42 Wykres sprawności systemu ACAES w funkcji stosunku ciśnień w magazynie z podziałem na warianty.	136
Rysunek 5.43 Wykres sprawności systemu ACAES z odzyskiem ciepła w funkcji stosunku ciśnień w magazynie z podziałem na warianty.	137
Rysunek 5.44 Wykres przepływów masowych w wymienniku ciepłowniczym oraz minimalne i maksymalne temperatury sprężonego powietrza za pierwszą sekcją sprężarki w funkcji stosunku ciśnień w magazynie dla wariantu 8/400/___.....	138
Rysunek 5.45 Wykres przebiegów mocy sprężarek, ekspanderów i wymienników ciepłowniczych w trakcie cykli dla wariantów 8/400/2,0 i 8/400/2,5..	139
Rysunek 5.46 Wykres prędkości przepływu oraz oporów przepływu w złożu TES dla wariantu wariant 8/400/2,5	140
Rysunek 5.47 Wykres prędkości przepływu oraz oporów przepływu w złożu TES dla wariantu wariant 8/400/1,4	141
Rysunek 5.48 Wariant 8/400/2,5. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu	142
Rysunek 5.49 Wariant 8/400/1,4. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu	143
Rysunek 5.50 Wykres zmian sprawności i gęstość w funkcji ciśnienia w magazynie – porównanie z wariantami izochorycznymi	144
Rysunek 5.51 Porównanie sprawności systemu ACAES z wymiennikiem ciepłowniczym i bez.	145
Rysunek 5.52 Wariant 5/400/KW. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu.	146

Rysunek 5.53 Wariant 5/400/KW. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cykli.	146
Rysunek 6.1 Porównanie całkowitego kosztu budowy magazynów w różnych technologiach [45], na którym, czerwonym znacznikiem, naniesiono koszty budowy systemu ACAES wg niniejszej koncepcji.....	161
Rysunek 6.2 Wartości zaktualizowane netto dla analizowanych wariantów przy nominalnie przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi PSE dla roku 2021	162
Rysunek 6.3 Wartości zaktualizowane netto dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie danymi TGE za okres styczeń-sierpień 2022	163
Rysunek 6.4 Wartości zaktualizowane netto dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie danymi TGE dla lipca 2022	164

Spis tabel

Tabela 1.1 Ilość energii produkowanej przez dostępne źródła oraz udział energii produkowanej w OZE w Polsce w latach 2010 – 2020 [3].....	12
Tabela 1.2 Ocena parametrów charakterystycznych dla magazynowania energii w sprężonym powietrzu przez pryzmat pracujących instalacji. ...	16
Tabela 3.1 Parametry techniczne elektrowni Huntorf [10]	36
Tabela 3.2 Parametry techniczne elektrowni McIntosh [10]	39
Tabela 4.1 Pojemności wyrobisk w przykładowej kopalni węgla kamiennego [83]....	54
Tabela 4.2 Porównanie struktur magazynujących	56
Tabela 4.3 Parametry termiczne i fizyczne materiałów wypełnienia złoża [89].....	60
Tabela 5.1 Maksymalne obciążenia i współczynniki graniczne	98
Tabela 5.2 Warianty analizy i obciążenia	107
Tabela 5.3 Podstawowe parametry przyjęte do analizy systemu ACAES	130
Tabela 5.4 Zmienne parametry przyjęte do analizy systemu ACAES	132
Tabela 5.5 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t= 400,0$ °C, dla różnych stosunków ciśnień p_{6_max}/p_{6_min}	148
Tabela 5.6 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t= 350,0$ °C, dla różnych stosunków ciśnień p_{6_max}/p_{6_min}	225
Tabela 5.7 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t= 300,0$ °C, dla różnych stosunków ciśnień p_{6_max}/p_{6_min}	226
Tabela 5.8 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t= 400,0$ °C, dla ACAES z kompensacją wodną.....	149
Tabela 6.1 Zestawienie parametrów dla wariantów przyjętych do analizy ekonomicznej	155
Tabela 6.2 Zestawienie wielkości produkcji dla analizowanych wariantów systemu ACAES przyjętych na potrzeby analizy ekonomicznej	156
Tabela 6.3 Nakłady inwestycyjne dla analizowanych układów ACAES	159
Tabela 6.4 Dzienny zysk/strata dla analizowanych wariantów przy nominalnie przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi PSE dla roku 2021	161
Tabela 6.5 Dzienny zysk/strata dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi TGE za okres styczeń-sierpień 2022	162

Tabela 6.6 Dzienny zysk/strata dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie z danymi TGE dla lipca roku 2022.....	164
Tabela 6.7 Wartości NPV, IRR oraz zaktualizowany okres zwrotu dla analizowanych wariantów przy przyjętych cenach energii elektrycznej zgodnie danymi TGE dla lipca 2022.....	165

Załączniki

Załącznik nr 1 - Zestawienie projektów CAES oraz ich status

W tabelach zamieszczono zestawienie wielu systemów, które zidentyfikowano w oparciu o dostępną literaturę przedmiotu [119], a które są lub były na etapie planowania lub projektowania. W zestawieniu posłużono się oznaczeniami dla określenia odpowiednio typu systemu, struktury magazynującej oraz charakterystyki geologicznej, właściwej dla zabudowanego zbiornika ciśnieniowego:

- Typ systemu:
 - DI – diabatyczny,
 - AD – adiabatyczny,
 - IT – izotermiczny,
 - R – rekuperacja,
- Struktury magazynujące:
 - KS – kawerna solna
 - WZ – wyeksploatowane złoża węglowodorów
 - WW – warstwy wodonośne
 - NK – nieczynne kopalnie,
 - KSDN – komory skalne drążone, niewyłożone,
 - KSDW - komory skalne drążone, wyłożone,
- Geologia:
 - WS – wysad solny,
 - ZP – złoża pokładowe,
 - PO – potaż,
 - PIA – piaskowiec,
 - SKW – skały węglanowe,
 - BAZ – bazalt (spękany),
 - TSK -twarde skały,
 - RŻE – kopalnia rudy żelaza,
 - CYN – kopalnia cynku,
 - WAP – kopalnia wapienia,

- SÓL – kopalnia soli,
- WGL - kopalnia węgla kamiennego,
- ZŁO – kopalnia złota,
- SRE – kopalnia srebra,
- GNE – gnejs,
- GRA – granit,
- ŁUP – łupek,
- KRE – kreda.

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
1.	McIntosh conceptual study	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Alabama, USA	KS	WS	800	2 680 000 (4 x 670,000)	~460	5,0 ÷ 8,0	Koncepcja instalacji o mocy 110MW. Projekt zrealizowany w 1991.	[120]
2.	McIntosh (PowerSouth)	DI +R	1991	Alabama, USA	KS	WS	110	566 000	457	4,5 ÷ 7,6	Pracuje od 1991. System oparty o jedną kawernę solną	[10]
3.	Denmark assessment	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Dania	KS	WS					Pojedyncze wzmianki – brak szczegółów	
4.	Bay of Fundy + tidal power	DI	1970s	Nowa Szkocja, Kanada	KS	WS					Przeprowadzono jedynie wstępne prace badawcze.	
5.	Northern Ireland Electric Service CAES study	DI	W połowie lat 70. XX wieku	Larne, Północna Irlandia	KS	ZP					Studium wykonalności. Projekt ponownie otwarty jako „EU Project 1010”	
6.	Kansas Utility System assessment (Black and Veatch)	DI	Późne lata 70. XX wieku	Kansas, USA	KS	ZP	150 ÷ 200	708 000 ÷ 1 420 000	259 ÷ 915		Wczesne prace studialne oraz ocean sposobów magazynowania. Brak postępów.	
7.	Huntorf (NKW, obecnie EON Kraftwerk)	DI	1978	Niemcy	KS	WS	290 podniesione do 321	310 000 (140 000 + 170 000)	650	4,3 ÷ 7,5	Instalacja pracująca.	[26] [10]
8.	Carmichael Dome study (Middle South Services, DoE/EPRI)	DI + 4x R	Późne lata 70. XX wieku	Mississippi, USA	KS	WS	220	1 390 000	<1060	5,0 ÷ 7,0	Konsorcjum DoE/EPRI sfinansowało analizę techniczną ekonomiczną zawierającą trzy typy	[121]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Cisnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											magazynowania i 47 lokalizacji.	
9.	Mississippi Power and Light Co., Petal salt dome	DI	Późne lata 70. XX wieku-early-1980s	Hattiesburg, Mississippi, USA	KS	WS	100	720 000			Przeanalizowano dwie kawerny. Brak dalszych działań.	
10.	CEGB feasibility	DI	Lata 80. XX wieku	Anglia, UK	KS	ZP		570 000	~450	7,0	Studium wykonalności dla system izobarycznego i izochorycznego. Brak dalszych działań.	
11.	UE&C and BBC hybrid CAES concept	DI/AD	Wczesne lata 80. XX	Carmichael, MS, USA	KS	WS	220			5,4 ÷ 8,31	Projekt wstępny oraz analiza ekonomiczna. Brak dalszych działań.	
12.	Hybrid CAES concept	AD	Wczesne lata 80. XX	Mississippi USA	KS	WS	220			5,4 ÷ 8,31	Projekt wstępny oraz analiza ekonomiczna. Brak dalszych działań.	
13.	Houston Lighting and Power Co., Big Creek salt dome	DI	Lata 80. XX wieku	Fort Bend County, TX, USA	KS	WS	~100				Analiza niebadanego wcześniej terenu. Brak dalszych działań.	
14.	SE Mississippi study (Southern Company Services, APB Power, EPRI)	DI	Wczesne lata 90. XX	Mississippi USA	KS	WS	280				Ocena techniczna i ekonomiczna kawerny solnej w Mississippi	
15.	Central North Dakota wind energy system	DI	Wczesne lata 90. XX	Północna Dakota, USA	KS	ZP	1500	4 790 000			Instalacja miała współpracować z energetyką wiatrową, wykorzystującą	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											potencjał Wielkich Równin USA. Brak dalszych działań.	
16.	"Great Plains" Kansas wind/CAES	DI	Wczesne lata 90. XX	Kansas, USA	KS	ZP	1500				Ocena współpracy z energetyką wiatrową wykorzystującą potencjał Wielkich Równin, ze szczególnym uwzględnieniem południowej Kalifornii. Brak dalszych działań.	
17.	Nuclear Electric assessment	DI	Lata 90. XX wieku	Anglia, UK	KS	ZP	~300	740 000 ÷ 1 700 000	450 ÷ 500	5,0 ÷ 7,4	Studium wykonalności dla system izobarycznego i izochorycznego. Brak dalszych działań.	
18.	Donbass	DI	1989-1991	Ukraina	KS	ZP	1050	1 980 000			Rozpoczęto budowę, która została porzucona wraz z rozpadem Związku Radzieckiego.	
19.	Shiqma (Israel Electric Corp.)	DI	W połowie lat 90. XX wieku	Izrael	KS	ZP	300 ÷ 400	29 000	1200	13 ÷ 20	Wstępna ocena instalacji z sześcioma kawernami. Brak dalszych działań.	
20.	Mt Sdom (Israel Electric Corp.)	DI	W połowie lat 90. XX wieku	Izrael	KS	ZP	300 ÷ 507	400 000	500	7,5	Wstępna ocena instalacji z dwoma kawernami,	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Cisnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											Brak dalszych działań.	
21.	EPRI and NYSERDA New York State feasibility study	DI	W połowie lat 90. XX wieku	Nowy Jork State, USA	KS	ZP	100 ÷ 350		180 ÷ 915		Wstępna ocena nowych kavern, magazynowania LPG oraz solanki. Brak dalszych działań.	
22.	Texas Panhandle study (SECO/Ridge Energy)	DI	Początek lat 2000	Texas, USA	KS	ZP	135	807 030			Analiza współpracy energetyki wiatrowej z instalacją CAES, z wykorzystaniem sześciu kavern. Brak dalszych działań.	
23.	Alton CAES (Alton Natural Gas/Landis Energy)	DI	W połowie lat 2000.	Nowa Szkocja, Kanada	KS	ZP	200				Analiza wykorzystania kavern na potrzeby magazynowania gazu ziemnego oraz na potrzeby instalacji CAES. Projekt prawdopodobnie porzucony.	
24.	Offshore storage and renewable energy study	DI	2000 ÷ 2010	Południowa część Morza Północnego, UK	KS	WS					Szereg analiz technicznych i ekonomicznych. Brak dalszych działań	
25.	Finger Lakes and Silver Springs	DI	2007 ÷ 2009		KS	ZP	~180	127 000	610	2,76 ÷ 11,5	Projekt wstępny dla pierwszej lokalizacji.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
	regions (Energy East Corporation, NYSEG and EPRI), ARRA funds			Seneca Lakes, Stan Nowy Jork, USA			(150 ÷ 360)				Pełna dokumentacja wykonawcza dla kawerny. Projekt porzucony w 2010 roku.	
			2010 ÷ 2012		KS		130 ÷ 210	150 000	730	7,9 ÷ 10,3	Druga lokalizacja z trzema nowymi kawernami. Zaawansowane projekty techniczne. Projekt zatrzymany w 2012 roku z uwagi na koszty.	[122]
26.	North Dakota (Sirius Exploration and EPRI)	DI	2008 ÷ 2011	Burke Country, Północna Dakota, USA	KS	PO	390	117 000	1950		Studium wykonalności dla instalacji CAES współpracującej z energetyką wiatrową. Projekt zawieszony.	
27.	Gaines (ConocoPhillips, General Compression)	IT	2012 ÷ 2016	Texas, USA	KS	ZP	2	42 131	745	7	Instalacja pilotażowa z jedną kawerną, która współpracowała z energetyką wiatrową. Rozpoczęcie pracy w 2012, zakończenie pracy w 2016.	
28.	APEX Bethel Energy Centre (Tennessee Colony)	DI	Wczesne lata 2010.	Texas, USA	KS	WS	317 (270 ÷ 540)		1140		Projekt posiada wszelkie uzgodnienia i jest gotów do realizacji.	[41]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											Prawdopodobnie został wstrzymany.	
29.	APEX Matagorda Energy Centre (Ridge Energy SS)	DI	W połowie lat 2010.	Texas, USA	KS	WS	317 ÷ 540		1140	13,1 ÷ 19,5	Zaawansowane prace koncepcyjne. Dostępne dwie kawerny. Projekt porzucony.	
30.	Chamisa "Tulia CAES plant"	DI	W połowie lat 2010.	Texas, USA	KS	ZP	270	116 620 (każda kawerna)	710	10,0 ÷ 13,0	Zaawansowane prace koncepcyjne dla pięciu do siedmiu kawern. Projekt prawdopodobnie został porzucony.	[123]
31.	Pierce Junction (Ridge Energy SS)	DI	W połowie lat 2010.	Texas, USA	KS	WS	270				Projekt prawdopodobnie został porzucony.	[124]
32.	"Pathfinder Wind and Energy Storage Project" (Haddington Ventures)	DI	W połowie lat 2010.	Delta, Millard County, Utah, USA	KS	ZP/WS?	300 (2x150)	~5 100 000 (4x ~ 1 200 000)			Przewidziano współpracę instalacji CAES (z czterema kawernami) z farmą wiatrową o mocy na potrzeby 2100 MW. Prawdopodobnie projekt porzucono na rzecz magazynu energii w sprężonym wodorze.	[125] [126] [127] [128]
33.	Brayton Energy hybrid CAES system	H AD	Od 2010	Phoenix, Arizona, USA	KS	ZP	100		>300	2,5	System adiabatyczny wykorzystujący energię słoneczną do	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											podgrzewu sprężonego powietrza.	
34.	Alberta Saskatchewan Intertie Storage Project (ASIS) + wind (Rocky Mountain Power)	DI	W połowie lat 2010.	Alberta/ Saskatchewan, Kanada	KS	ZP	150	160 000			Prawdopodobnie projekt nie wyszedł poza fazę planowania.	[129] [130]
35.	Advanced 2nd Generation CAES and ACAES Plants (US DoE)	AD	Wczesne lata 2010.	USA	KS	ZP/ WS	180, 310 i 450				Prace sfinansowane przez Departament Energii USA w ramach prac and systemami CAES drugiej generacji (systemy ACAES) wsparcia energii odnawialnej i inteligentnych sieci.	
36.	"ADELE" (RWE Power led consortium)	AD	2007 ÷ 2010	Stallfurt, Niemcy	KS	WS	360	358 674	400	5,0 ÷ 7,0	Wykonano prace badawcze oraz analizę techniczną ekonomiczną. Projekt zawieszony z przyczyn ekonomicznych.	
37.	Endesa assessment (Endesa S.A, and EPR1)	DI/ AD	W połowie lat 2010.	Hiszpania	KS	ZP	150				Studium wykonalności dla instalacji oraz magazynu sprężonego powietrza. Zidentyfikowano dwie	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Cisnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											odpowiednie kawerny solne. Brak dalszych informacji.	
38.	EU "Project 1010" Islandmagee (Gaelectric)	DI	Od 2010 do 2018	Północna Irlandia, UK	KS	ZP	330	480 000 (każda kawerna)	1500	9 ÷ 12, Maks.19, 3	Zaawansowane prace studialne, w tym raport o oddziaływaniu inwestycji na środowisko. Projekt prawdopodobnie zatrzymany.	[131] [132] [133]
39.	EU "Project 1005" (Gaelectric)	DI	W połowie lat 2010.	Cheshire, UK	KS	ZP	268		500		Zaawansowane prace studialne. Planowe ukończenie 2022, jednak projekt prawdopodobnie zatrzymany.	[134]
40.	EU "Project 1013" (Corre Enetgy Storage BV)	DI	W połowie lat 2010.	Zuidwending, Holandia	KS	WS?	330				Zaawansowane prace studialne dla CAES I farmy offshore. Projekt opóźniony co najmniej do 2024 roku.	[135] [136]
41.	EU "Project 1022 - CARES" (Storelectric)	AD	W połowie lat 2010.	Cheshire, UK	KS	ZP	540 (total)		~500		Instalacja planowana.	[137]
42.	EU "Project 1023 - Cheshire Gas CAES" (Storelectric)	DI	W połowie lat 2010.	Cheshire, UK	KS	ZP	300		~500		Instalacja w trakcie rozpatrywania.	[138]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
43.	Energy Storage Niederrhein project	DI	W połowie lat 2010.	Wesel, Niemcy	KS	WS			~930		Zaawansowane prace studialne. Projekt prawdopodobnie został wstrzymany.	
44.	“ALP-CAES” conceptual PHS/ CAES hybrid study	DI	W połowie lat 2010.	Dania	KS	WS/ ZP					Koncepcja z wykorzystaniem “tłoka hydraulicznego”	[139]
45.	Hybrid CAES fuel system (North China Electric Power University)	DI	2012 ÷ 2014	Chiny	KS	ZP	~410	400 000		6,5 do 7,5	Studium techniczno-ekonomiczne nowego hybrydowo-paliwowego systemu CAES.	[140]
46.	Huai’an City project (Sci, Foundation of China [973] program)	DI	2014	Jiangsu, Chiny	KS	ZP	60	246 000	1330 ÷ 1470	9,5 do 12,5	Geotechniczne stadium wykonalności dla potrzeby systemu CAES.	[141]
47.	“Three North Region” CAES + wind and solar (National Key R&D Program of China, Chongqing University)	DI	Późne lata 2010.	Pingdingshan, Chiny	KS	ZP	100MW		800MWh		Uzyskano wszelkie zgody.	[142]
48.	Wuhan project	AD	2019	Wuhan, Chiny	KS	ZP	10		10MWh		W 2018 roku rozpoczęto budowę.	[142]
49.	Feicheng A-CAES (Chinese Acad, Sciences, Energy)	AD	2019	Feicheng, Shandong, Chiny	KS	ZP	50		300MWh		W 2019 roku rozpoczęto budowę.	[142]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
	Storage Alliance, Gezhouba Utd Alliance) + wind/solar											
50.	"Salt Cave Compressed Air Energy Storage National Test and Demonstration Project" (Chinese Academy Sciences) + wind/solar	AD	Późne lata 2010.	Jintan, Jiangsu, Chiny	KS	ZP	Początkowo 60 (Finalnie 253) (300 MWh)			9,5	W sierpniu 2020 rozpoczęto budowę.	[143]
51.	CAES assessment N Spain (Catedra TECFUTURA [SACYR corporation and Madrid Polytechnic Uni,])	DI	Późne lata 2010.	Cantabrian Mts, Hiszpania	KS	WS	10 ÷ 100	400 do 800			Ewaluacja systemu CAES małej skali	
52.	University of Waterloo and industrial partners study	DI/ AD	2016	Nowa Szkocja, Ontario i Alberta, Kanada	KS	WS/ ZP					Studium dla systemu CAES optymalizowanego pod kątem ekonomicznym na potrzeby współpracy z mikro siecią.	
53.	Austrian study (Austrian Research Promotion Agency)	AD	2017	Austria	KS	ZP/WS	10 ÷ 50			1,9 ÷ 12	Studium wykonalności.	[144]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
54.	NAM70 Challenge (Storelectric)	DI?	2018	Holandia i Południe Morza Północnego	KS	WS?					Badanie dotyczące ponownego wykorzystania infrastruktury naftowej i gazowej, współpraca z morską farmą wiatrową	[145]
55.	Goderich Mine (NRStor-led consortium, incl, Hydrostor)	AD	2019	Ontario, Kanada	KS	ZP	1,75 (10+ MWh)		550		Pierwszy zrealizowany system ACAES na świecie. Instalacja pracuje od 2019 roku.	[33] [39]
56.	CEC feasibility study (Calif, Energy Commission and US DoE)	DI	Wczesne lata 90. XX	California, USA	WZ	PIA	3x 200 ÷ 250 (600 ÷ 750 łącznie)	785 000	670 ÷ 750	6,9	Studium wykonalności dla dziesięciu lokalizacji. Jedna wybrana do dalszych prac.	
				Princeton, Glen County, Kanada	WZ							Projekt koncepcyjny wykonany dla wcześniej wybranej lokalizacji. Brak dalszych działań.
57.	TVA (Tennessee Valley Authority)	DI	Wczesne lata 90. XX	Tennessee, USA	WZ	PIA	600 ÷ 1200				Ocena potencjału geotechnicznego. Brak dalszych działań.	
58.	EPRI and NYSERDA New York State feasibility study	DI	Wczesne lata 90. XX	Stan Nowy Jork, USA	WZ	różne	>100		457 ÷ 1525		Część studiów wykonalności dla stanu Nowy Jork, dotycząca systemów CAES. Brak dalszych działań.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
59.	Big Springs fields (NPPD)	DI	Wczesne lata 2010.	Nebraska, USA	WZ	PIA	100 + 300	845 500			Studium wykonalności i modelowanie. Prawdopodobnie projekt został zatrzymany.	
60.	Huntley field (Gaelectric)	DI	Wczesne lata 2010.	Montana, USA	WZ	PIA	270				Studium wykonalności i modelowanie geomechaniczne. Prawdopodobnie projekt został zatrzymany.	[146]
61.	East Keith field (Gaelectric)	DI	W połowie lat 2010.	Montana, USA	WZ	PIA	270				Studium wykonalności i modelowanie geomechaniczne. Prawdopodobnie projekt został zatrzymany.	[146]
62.	Dunnigan Hills (PG&E and EPRI)	DI	2009 ÷ 2010	Yolo County, California, USA	WZ	PIA	110		750	5,1	Wykonana została ocena geotechniczna dla systemu 110MW. Ocena została odrzucona.	
63.	King Island field PG&E (EPRI, ARRA 2009 and CEC funding)	DI	Od 2010	San Joaquin County, California, USA	WZ	PIA	300	>113 000	1450	18,6	Wykonane studium wykonalności oraz pozyskane zgody na rozpoczęcie inwestycji. zgody Prawdopodobnie projekt został zatrzymany.	[147]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
64.	East Island field	DI	Od 2010	San Joaquin County, California, USA	WZ	PIA	300	>113 000	1450	18,6	Zbadano alternatywne lokalizacje. Brak dalszych działań.	
65.	Thornton field PG&E/ EPRI/ Univ, Calgary	DI	Od 2010	San Joaquin County, California, USA	WZ	PIA	300	>113 000	1000	18,6	Prowadzono badania pod kątem ryzyka wystąpienia zapłonu i oksydacji dla mieszanin gazowo powietrznych.	
66.	“SMUD” CAES studies + wind integration (Sacramento Municipal Utility District)	DI	Wczesne lata 2010.	California, USA	WZ	PIA	135 ÷ 268	~343 500	1890	18,6	Pole North Sherman poddane zostało ocenie ale zostało Odrzucone. Wykonano ocenę potencjału i wytypowano jedną lokalizację. Prawdopodobnie projekt został zatrzymany.	[148]
67.	Tri-State (G&T - EPRI)	DI	W połowie lat 2010.	Colorado, USA	WZ	różne					Studium wykonalności	
68.	Southern California (Edison/ Hydrodynamics)	DI	2010	California, USA	WZ	PIA	1325				Badanie lokalizacji dla systemu CAES i ocena potencjalnych struktur magazynowania.	[11]
69.	Pecos Valley project (Montoya), Austin Energy	DI	2010	Texas, USA	WZ	różne					Ocena hydrodynamiczna 726 struktur roponośnych i gazonośnych	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Cisnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
70.	AJberta (Hydrodynamics for Altalink)	DI	2010	Alberta, Kanada	WZ	PIA					Ocena struktur, zidentyfikowane potencjalne miejsca	
71.	Pittsfield region (Hydro dynamics for Nicor Ventures)	DI	2010	Pittsfield, Illinois, USA	WZ	PIA					Część badania regionalnego	
72.	Portland Wind Farm support (Monash University)	DI	2011	Onshore Victoria, Australia	WZ	PIA?	80 ÷ 240 (2 x 20—80MW turbines)				Ocena potencjału i wykonalności CAES i/lub PHS w celu wsparcia wytwarzania energii elektrycznej z lądowej energii wiatrowej	
73.	“Three North Region” CAES + wind and solar (National Key R&D Program of China, Chongqing University)	DI	Późne lata 2010.	Chiny	WZ	PIA			Do 1000		Wczesna ocena regionalna dla systemu CAES wspierającego odnawialne źródła energii oraz sieć. Zubożone pola stanowią alternatywny rodzaj magazynowania	
74.	Conversion NGS sites to CAES study (Mississippi State Uni, Southern Company Services)	DI?	2019	Louisiana, Arkansas, USA	WZ	PIA	180 ÷ 800				Techniczno-ekonomiczne studium wykonalności ponownego wykorzystania nieekonomicznej instalacji magazynowania gazu	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											ziemnego dla systemu CAES na granicy Luizjany i Arkansas	
75.	Pays de Bray (EDF)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Francja	WW	różne					Opracowano studium wykonalności. Brak dalszych działań.	
76.	Brookville Dome (National Academy of Science study)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Illinois, USA	WW	PIA	150		205		Opracowano studium wykonalności. Brak dalszych działań.	
77.	CEC feasibility study (Calif, Energy Commission and US DoE)	DI + R	Wczesne lata 70. XX wieku	California, USA	WW	PIA	3x 200 ÷ 250 (600 ÷ 750 łącznie)		670	6,9	Badania warstwy wodonośnej, 3 zidentyfikowane. Brak dalszych działań.	
78.	Brookville storage site (General Electric, US Energy R&D Admin)	DI + R	W połowie lat 70. XX wieku	Illinois, USA	WW	PIA	600	671	205	1,17 ÷ 1,96	Projekt koncepcyjny, studium wymagań techniczno-ekonomicznych. Brak dalszych działań.	
79.	Calcutta-Carbon field (Strata Power of Indiana)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Indiana, USA	WW	PIA	150	850 000	380	3,2	Szczegółowe studia wykonalności i "testy gazowe". Brak dalszych działań.	
80.	Aquifer CAES development program (Public Service Company of Indiana, DoE/EPRI)	DI + R	Wczesne lata 70. XX wieku	Illinois, Indiana, Kentuky, and Tennessee, USA	WW	PIA	1120			1,4 ÷ 7,0	Studium wykonalności i techniczno-ekonomiczne trzech rodzajów składowania w warstwie wodonośnej.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Cisnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
81.	Kansas Utility System assessment (Black and Veatch)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Kansas, USA	WW	PIA/SKW	150 ÷ 200	>8 500 000	2 290 915	5,52	Wczesna regionalna ocena systemu CAES dla głównych rodzajów składowania. Brak dalszych działań.	
82.	Hume (URS Corporation/ Hydrodynamics)	DI	Późne lata 70. XX wieku	Illinois, USA	WW	SKW	200 ÷ 250	498,4	200	2,3	Wczesna regionalna ocena systemu CAES dla głównych rodzajów składowania. Brak dalszych działań.	
83.	Brocton (LTRS Corporation/ Hydrodynamics)	DI	Późne lata 70. XX wieku	Illinois, USA	WW	SKW	200 ÷ 250		200	2,3	Wczesna regionalna ocena systemu CAES dla głównych rodzajów składowania. Brak dalszych działań.	
84.	Pittsfield aquifer test (DoE/EPRI)	DI	1970 ÷ 1984	Illinois, USA	WW	PIA	25		200	2	Obszerne testy, wczesne wstrzykiwanie pęcherzyka powietrza. Brak dalszych działań.	
85.	Sesta injection test (ENEL)	DI	1987-1991	Sesta, Italy	WW	różne	25			2,3	Demonstrator. Zamknięty.	
86.	Israel Electric Corporation study	DI	1980 ÷ 1990	Izrael	WW	różne	200 ÷ 400				Szczegółowe analizy i studium wykonalności. Brak dalszych działań.	
87.	Gippsland Basin assessment (for State Elec Comm, Victoria)	DI + R	Wczesne lata 90. XX	Australia	WW	PIA	100 ÷ 300		600	6,3	Ocena i modelowanie warstwy wodonośnej. Brak dalszych działań.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
88.	EPRI and NYSERDA New York State feasibility study	DI	Wczesne lata 90. XX	Stan Nowy Jork, USA	WW	różne			457 ÷ 1525		Część ogólnych studiów wykonalności systemu CAES dla potrzeb stanu Nowy Jork. Brak dalszych działań.	
89.	Iowa Stored Energy Park (IESP), Dallas Centre + wind	DI	2000 ÷ 2010	Iowa, USA	WW	Mt Simon PIA	270		880	9	Przez osiem lat prowadzone intensywne testy i badania. Projekt porzucono.	[63]
90.	Vincent-Eagle Grove Structure (Hydrodynamics/ Prairie Wind)	DI	Wczesne lata 2000.	Iowa, USA	WW	PIA	100 ÷ 200				Studium wykonalności dla wsparcia energetyki wiatrowej. Brak dalszych działań.	
91.	NYSERDA and NYSEG CAES assessment	DI	Późne lata 2000.	Stan Nowy Jork, USA	WW	różne					Ukończone stadium wykonalności dla stanu Nowy Jork.	
92.	Bakersfield (PG&E with EPRI, ARRA 2009 and CEC funding)	DI	Wczesne lata 2010.	Kern County, USA	WW	PIA	300				Studium wykonalności i modelowanie, wstrzymane, zmiana zainteresowania na Północną Kalifornię	
93.	"SMUD" CAES (Sacramento Municipal Utility District)	DI	W połowie lat 2010.	California, USA	WW	PIA	268				Wykonano stadium wykonalności i oszacowano potencjał dla stanu Kalifornia. Projekt	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Cisnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											prawdopodobnie wstrzymany.	
94.	Columbia Hills (BPA and PNNL)	DI	Wczesne lata 2010.	Stan Waszyngton, USA	WW	BAZ	207		>3000	12,5	Zaawansowana ocena i planowanie	[149]
95.	Yakima Canyon, Selah (BPA and PNNL)	AD	Wczesne lata 2010.	Stan Waszyngton, USA	WW	BAZ	83		4250	49,6	Zaplanowano TES i wykorzystanie energii geotermalnej. Zaawansowana ocena i planowanie.	[149]
96.	UK offshore saline aquifer potential (research)	DI + AD	2018	Morze Północne	WW	PIA	4 ÷ 12		260 do 4000	25	Doktorat o potencjale podmorskich warstwy wodonośnej	
97.	Faludden reservoir for CAES on Gotland (onshore), Uppsala/ Lund Univ, and Swedish Survey	DI	2018/2019	Szwecja	WW	PIA	~70	600 000 do 9 800 000	270 do 410	2,9 do 4,3	Ocena regionalnej warstwy wodonośnej na wyspie w celu wsparcia produkcji wiatrowej. Szacowana pojemność magazynowa 130-1300 MWh	[150]
98.	CEC feasibility study (Calif, Energy Commission and US DoE)	DI	Wczesne lata 70. XX	California, USA	NK	TSK	3x 200 ÷ 250 (600 ÷ 750 łącznie)		700		Ocena kawern w skałach twardych. Zidentyfikowano 12 potencjalnych lokalizacji ale żadna z nich nie została wybrana.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
99.	Mt Hope mine (Jersey Central Power and Light Co)	DI	Wczesne lata 70. XX	New Jersey, USA	NK	RZE	190 ÷ 1000	764,555	825	4	Wstępne testy instalacji o planowanej mocy docelowej 1000 MW z wykorzystaniem Istniejących i nowych kawern. Brak dalszych działań.	
100.	Kamioka CAES test (Kamioka Mining and Smelting Co, Ltd,)	DI	1980 ÷ 1990	Kamioka mine, Japonia	NK	CYN			520		Podziemny zbiornik powietrza z kompensacją wodną. Badania szczelności na potrzeby instalacji CAES.	
101.	Norton Mine, Ohio (Ohio Edison Co,)	DI	Lata 80. XX	Norton, Cleveland, OH, USA	NK	WAP	100	8 500 000	686		Szacunki techniczne dla dziesięciogodzinnych cykli ładowania i rozładowania. Brak dalszych działań.	
102.	Pyhasalmi mine (Technical Research Centre of Finland)	DI	Wczesne lata 90. XX	Finlandia	NK	CYN	34 (150 ÷ 210 MWh)	30 000 ÷ 100 000	400 ÷ 800		Wstępne studium wykonalności. Brak dalszych działań.	
103.	Old Grace Mine (CAES Corp,)	DI	Wczesne lata 90. XX	Philadelphia, USA	NK	RZE/ WAP	110	76 455	270		Prace nad systemem z kompensacją wodną. Brak dalszych działań.	
104.	New York State assessment (Seneca	DI	1990	Stan Nowy Jork, USA	NK	SÓL	150 ÷ 300	2 000 000	625		Część ogólnych studiów wykonalności systemu CAES dla	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Cisnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
	Lakes Mine)										stanu Nowy Jork. Brak dalszych działań.	
105.	MSc CAES research study	DI	W połowie lat 90. XX wieku	Południowa Afryka	NK	różne	200 ÷ 1000	Do 1 000 000			Nieczynna kopalnia złota. Brak dalszych działań.	
106.	Norton Mine (Haddington Ventures FirstEnergy Generation Corp)	DI	2001 ÷ 2013	Norton, Cleveland, Ohio, USA	NK	TSK/WAP	Up to 2700 (jednostki i po 300MW)	9 600 000	722	5,5 ÷ 11	Pozyskano wszystkie pozwolenia. Zaawansowane projekty i testy. Projekt zakończono w 2013 roku.	[151]
107.	ESKOM	DI/ AD	1990 ÷ 2000	Południowa Afryka	NK	różne					Rozważane korzyści ekonomiczne systemu CAES dla zintegrowanych planów energetycznych	
108.	"Shen Lang" studies	DI	Wczesne lata 2000.	Chiny	NK	WGL					Uzyskano patent na zastosowane rozwiązania. Brak szczegółów.	
109.	Energy Storage and Power + wind (PSEG Holdings)	DI	W połowie lat 2000.	Stany New Jersey i Nowy Jork, USA	NK	SÓL/WGL					Koncepcja z wykorzystaniem nieczynnej kopalni.	
110.	NYSERDA and NYSEG CAES assessment	DI	Późne lata 2000.	Stan Nowy Jork, USA	NK	różne					Wykonano studium wykonalności.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
111.	Clear Creek Power Wind and CAES (Clear Creek Power)	DI	2007	Georgetown, Colorado, USA	NK	ZŁO/SRE	50 ÷ 1000 (525 ÷ 10,000 MWh)	100 000		3,5 ÷ 8,3	Jedna do pięciu farm wiatrowych połączonych z systemem CAES. Brak dalszych działań.	
112.	Lyons Salt Mine (Empire, BSC Holding Inc., Sega Inc.)	DI	2009	Kansas, USA	NK	SÓL			~305		Przeprowadzono testy przy niskim ciśnieniu. Brak dalszych działań.	
113.	Minnesota mine study, + wind (Uni, Minnesota)	DI	Wczesne lata 2010.	Minnesota, USA	NK	RŻE	100				Studium wykonalności i ocena kopalń. Prawdopodobnie projekt jest rozpatrywany.	[152]
114.	"Three North Region" CAES + wind and solar (National Key R&D Program of China, Chongqing University, Chinese Academy of Science)	DI	Późne lata 2010.	Chiny	NK	WGL	~10		Do 1000		Wczesna ocena regionalna dla systemu CAES wspierającego odnawialne źródła energii oraz sieć. Planowane wykorzystanie nieczynnych kopalń węgla kamiennego.	
115.	Angas ACAES Project (Hydrostor and ARENA [Australian Renewable Energy Agency])	AD	2019-2021	Adelaide, Australia	NK	CYN	5 (10 MWh)		~240	Kompensacja wodna	Komercyjny demonstrator. W budowie.	[153]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
116.	Battelle assessment	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	USA	KSDN	różne	174	6 116 440 (6 kawern)	183	1,01	Wczesne stadium wykonalności dla kawern wykonanych przy użyciu eksplozji jądrowych. Brak dalszych działań.	
117.	Gian (Vattenfall/ Stal Laval)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Szwecja	KSDN	GNE	220 ÷ 230	137 000	435	4,35,	Zaawansowane plany, w tym próbne odwierty (1972-1973), Kompensacja wodna. Brak dalszych działań.	
118.	Vaxjd (Sydsvenska Kraftgrupp A, B,/Stal Laval)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Szwecja	KSDN	GNE	240	250 000	250	2,5	Zaawansowane planowanie. Kompensacja wodna. Brak dalszych działań.	
119.	"Airstore" (Vattenfall/ Stal Laval)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Szwecja	KSDN	GNE	232	291 500	250	2,6	Zaawansowane planowanie. Kompensacja wodna. Łączone tunele. Brak dalszych działań.	
120.	"SITRA" subsurface power plants study	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Finlandia	KSDN	różne GNE/ GRA	200	120 000 ÷ 540 000	100 ÷ 600	1,5 ÷ 6,0 (4,1)	Studium wykonalności system z kompensacją wodną w celu zastąpienia elektrowni szczytowo-pompowych.	
121.	Ffestiniog test (CEGB)		Wczesne lata 70. XX wieku	Północna Walia, UK	KSDN	GRE/ TSK					Wstępne próby ciśnieniowe, mała niewyłożona kawerna.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
122.	National Science Foundation (NSF) study	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Illinois, Indiana, Ohio, USA	KSDN	SKW	280	212 253	490		Oceny regionalne. Brak dalszych działań.	
				Okolice Bostonu, USA	KSDN	GNE/ GRA	280	212 253	490	Oceny regionalne. Brak dalszych działań.		
123.	CEC feasibility study (Calif, Energy Commission and US DoE)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	California, USA	KSDN	WAP	252,5 (x 3)	385 000	690	6,7	Wczesne rozpoznanie terenu w skałach twardych. Studia wykonalności. projekty z kompensacją wodną. Brak dalszych działań.	
				Shultz Mountain, USA	KSDN	TSK	250x3 (750 total)		700	Studium wykonalności i koncepcja system z kompensacją wodną. Brak dalszych działań.		
124.	Kansas Utility System assessment (Black and Veatch)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Kansas, USA	KSDN	GNE/ GRA	150 ÷ 200	700,000 ÷ 1 420 000	259 ÷ 915	6,76	Wczesna regionalna ocena zastosowania systemu CAES dla głównych rodzajów składowania. Brak dalszych działań.	
125.	Vianden (Société Electrique de L'Our and RWE)	DI	Wczesne lata 70. XX wieku	Luksembourg	KSDN	TSK	285	100 000	500	5	Studium wykonalności i koncepcja system z kompensacją wodną. Brak dalszych działań.	
126.	Bremm test (Société Electrique de L'Our and RWE)		Wczesne lata 70. XX wieku	Mosel, Niemcy	KSDN	ŁUP		6500			Kawerna testowa dla planowanej elektrowni szczytowo-pompowej	
127.	Yugoslavia	DI + R	1970	Dawna Jugosławia	KSDN	TSK	260				Projekt wstępny system z kompensacją wodą	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											i rekuperatorem, Brak dalszych działań.	
128.	Meadowbank Mine test (I,C,I, Ltd.)		Późne lata 70. XX wieku	Cheshire, UK	KSDN	SÓL		~8,53	140	1,38	Testy z użyciem sprężonego powietrza na potrzeby budowy magazynu gazu	
129.	EDF CAES plant	DI	1980	Bretagne, Francja	KSDN	TSK	250 ÷ 300	300 000		2,5	Zaawansowana koncepcja system z kompensacją wodną. Rozpoznano teren i wykonano odwierty badawcze. Brak dalszych działań.	
130.	Mt Hope mine (Jersey Central Power and Light Co)	DI	W połowie lat 70. XX wieku	New Jersey, USA	KSDN	RZE	190 ÷ 1000	764 555	~825	4	Wstępne testy instalacji o planowanej mocy docelowej 1000 MW z wykorzystaniem Istniejących i nowych kawern. Brak dalszych działań.	
131.	Potomac Electric Power Co, feasibility study (DoE/ EPRI fund)	DI + R	Wczesne lata 70. XX wieku	Maryland, USA	KSDN	GNE	924	690 000	1500	4,8 ÷ 7,0	Studium wykonalności dla trzech różnych typów magazynów sprężonego powietrza.	
132.	Sykesville storage site (General Electric, US Energy R&D Admin)	DI + R	Wczesne lata 70. XX wieku	Maryland, USA	KSDN	GNE	600 150	1 690 000	220		Koncepcja techniczno ekonomiczna system CAES z kompensacją wodną. Brak dalszych działań.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
133.	Jefferson Island salt mine (LSU and US DoE)	DI	1970 ÷ 1980	Louisiana, USA	KSDN	SÓL			400		Wykonano odwierty w kopalni soli na potrzeby prób systemu CAES	
134.	Soyland CAES study (Soyland Power Cooperative, Inc.)	DI + R	Wczesne lata 80. XX	Illinois, USA	KSDN	TSK	220		700		System CAES dla wsparcia elektrowni węglowej. Kompensacja wodna. Wydano stosowne pozwolenia i podpisano umowy. Elektrownię odstawiono w 1982 roku. Brak dalszych działań.	[154]
135.	San Diego hard rock (San Diego Gas and Electric Co.)	DI	1980	California, USA	KSDN	GRA	100				Szacunki techniczne dla dziesięciogodzinnych cykli ładowania i rozładowania. Brak dalszych działań.	
136.	EPRI and NYSERDA New York State feasibility study	DI	Wczesne lata 90. XX	Stan Nowy Jork, USA	KSDN	TSK	150	990 000	305 ÷ 1525		Część studiów wykonalności dla stanu Nowy Jork uwzględniająca wykorzystanie systemów CAES z kompensacją wodną. Brak dalszych działań.	
137.	Upper Midwest studies	DI	1990	Upper Midwest, USA	KSDN	TSK/ GRA	220 ÷ 880	290 000	450 ÷ 540	4,5 ÷ 5,5	Analiza system CAES wykorzystującego	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
			Wczesne lata 2010.		KSDN		Do 1080	~114 000 (8 kawern)	607	3,0 ÷ 6,0	kompensację wodną. Brak dalszych działań. Projekt w fazie planów z uwagi na prowadzony program dotyczący energetyki wiatrowej w tym rejonie.	
138.	Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)	DI	1980 ÷ 1990	Kemgo, Japonia Kyushu, Japonia	KSDN	GRA	500			4,0 ÷ 8,0	Wykonano studium wykonalności oraz sprawdzono teren - badania ciśnienia w otworach dla dwóch rodzajów skał.	
139.	Suez + large-scale wind (University Nottingham)	AD	W połowie lat 2010.	Suez, Egipt	KSDN	TSK	Do 580	1 248 000		4,5 ÷ 7,5	Wykonana została ocena techniczna dla trzech pełnoekranowych systemów CAES wyposażonych w TES, mających współpracować z energetyką wiatrową. Instalacja planowana.	
140.	Datang CAES (Datang Power Company)	DI	W połowie lat 2010.	Datang, Chiny	KSDN	PIA	300	900 000	500	5,0 ÷ 8,0	Prace zakończone z uwagi na nieuszczelności magazynu.	[155] [156]
141.	Pollegio - Loderio tunnel (ALACAES)	AD	Od 2015	Ticino, Szwajcaria	KSDN	GNE	0,5	~1945		7,0	Demonstrator. Pracuje. Brak ekspandera.	[72] [73]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
142.	DEMETAIR small-scale CAES	AD	2016	Europe and USA	KSDN						Studium wykonalności i ocean systemu CAES małej skali z wykorzystaniem szybu wierconego i/lub wyłożonego wykładziną.	
143.	Petit- Couronne (Geostock)	AD	2017	Północna Francja	KSDN	KRD	130 ÷ 180	62 500	150		Ocena konwersji kawerny magazynującej LPG na potrzeby systemu CAES	
144.	Sodegaura test (CRIEPI)	DI	1980 ÷ 1990	Tokyo Bay, Sodegaura, Japonia	KSD W			100 000	600 ÷ 640	6,0	Analizy mechaniczne, geomechaniczne oraz ekonomiczne. Brak dalszych działań.	
145.	Roda Stern laboratories		1980 ÷ 1990	Gbteburg, Szwecja	KSD W	TSK		336	60	8,0	Instalacja testowa. Testy magazynowania sprężonego powietrza w komorze skalnej z wykładziną.	
146.	"Urban CAES tank"	DI	Późne lata 90. XX	Japonia	KSD W					2,0	Mała instalacja testowa z wykorzystaniem betonowego zbiornika w zalany wodą szybie o głębokości 200 m. Projekt zamknięty.	

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
147.	CAES-G/T Pilot Plant (New Energy Found, METI)	DI	1990 ÷ 2000	Kamisunagawa, Hokkaido, Japonia	KSD W	WGL		78,5	450		Wstępne badania na miejscu.	
148.	CAES-G/T Pilot Plant (New Energy Found, METI)	DI	1990 ÷ 2000	Kamisunagawa, Hokkaido, Japonia	KSD W	WGL	2	1600	450	4,0 ÷ 8,0	Instalacja pilotażowa. Przeprowadzono testy pracy. Instalacja nieczynna	
149.	CAES-G/T Pilot Plant (New Energy Found, METI)	DI	Wczesne lata 2010.	Kamisunagawa-cho, Hokkaido, Japonia	KSD W	WGL	35	30 000	450	4,0 ÷ 8,0	Planowana instalacja pilotażowa. Nigdy nie rozpoczęta.	
150.	LRC feasibility study (Israel Inst, of Technology)	DI	Wczesne lata 2010.	Izrael	KSD W	TSK	17,5 (dla jednej kawerny)	11 300 (dla każdej kawerny)	>100	1,0 ÷ 8,0	Studium wykonalności oraz szacowanie strat energii w komorach skalnych z wykładziną betonową w pojedynczych i połączonych tunelach.	
151.	Kamioka (ANGAS project)		Wczesne lata 2010.	Kamioka mine, Japonia	KSD W	CYN		240	400	0 ÷ 20	Testy małej komory skalnej z wykładziną na potrzeby budowy dużego magazynu gazu ziemnego. Testy hydrauliczne oraz z użyciem sprężonego powietrza. Prace badawcze nad systemem ACAES z magazynowaniem	[157]

LP	Obiekt / projekt	Typ systemu	Data	Lokalizacja	Struktura magazynująca	Geologia	Moc elektryczna MW	Pojemność struktury magazynującej m ³	Głębokość składowania m	Ciśnienie magazynowania MPa	Status	Dodatkowa bibliografia
											ciepła w komorze skalnej.	
152.	SEARCH (CAES) - National Research Agency (ANR)	AD	2009-2013	Francja	KSD W	GRA			100	5,0 ÷ 8,0	Przygotowano kawerny I przeprowadzono szereg testów.	
153.	Jongson pilot test (Korea Inst, Geosci, and Min Res, Kunsan Nat Uni.)	DI	Wczesne lata 2010.	Jongson, South, Korea	KSD W	WAP			100			
154.	CAES plant study (China Datang Corp, Ren, Power Co., Ltd., Tongji Uni.)	DI	W połowie lat 2010.	Inner Mongolia, Chiny	KSD W	GRA	100		100 000	5,0 ÷ 10,0	Studium wykonalności I dalsze prace projektowe. Instalacja planowana.	
155.	DEMETAIR small-scale CAES	AD	2016	Europa i USA	KSD W						Studium wykonalności I ocean systemu CAES wykorzystaniem szybu wierconego	
156.	RICAS2020 Mine Project (Consortium led by Montan-universitat Leoben)	AD	2017	Eisenerz, Austria	KSD W	TWS/ RZE	5 100	15 000 250 000	~220	3,0 ÷ 3,6 4,8 ÷ 6,7	Instalacja finansowana przez UE w ramach programu "Horizon 2020". Studium wykonalności i testy systemu CAES małej skali, prowadzące do pełnowymiarowej instalacji testowej (planowanej)	[158] [159] [160] [161] [162] [163]

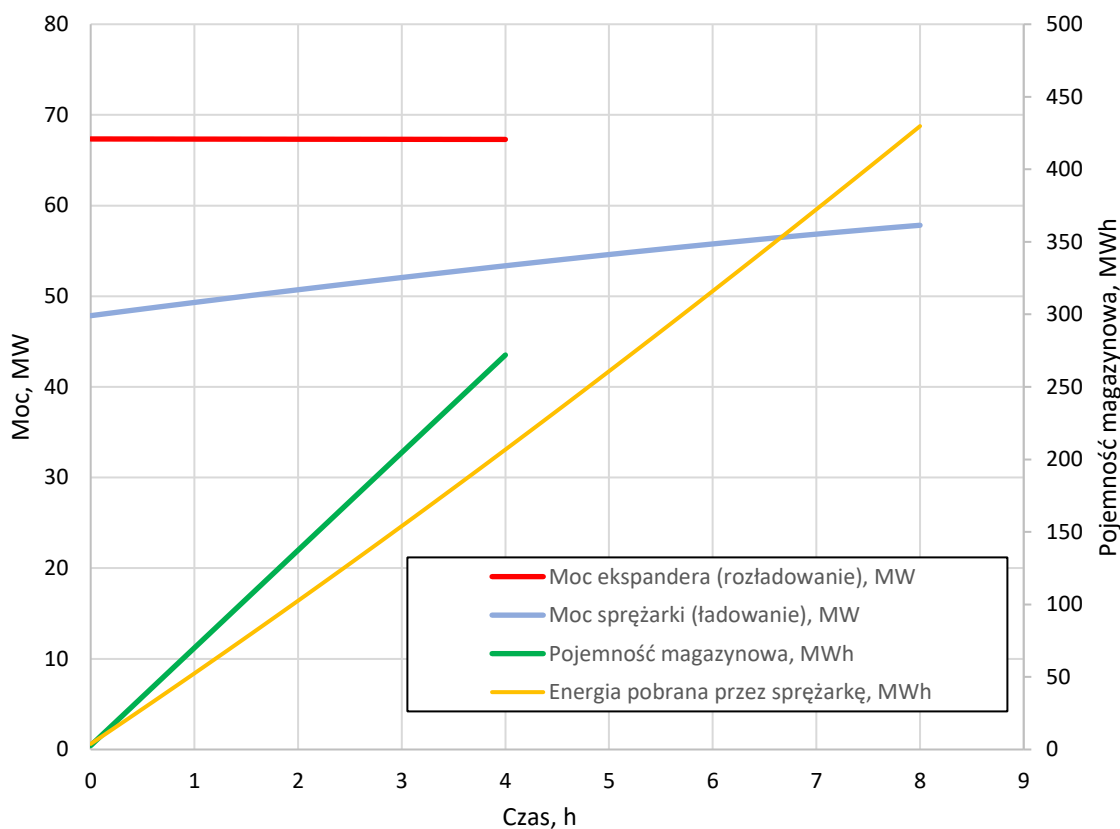
Załącznik nr 2 - Zestawienie wyników

Tabela Z2.1 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t = 350,0 \text{ }^\circ\text{C}$, dla różnych stosunków ciśnień p_{6_max}/p_{6_min}

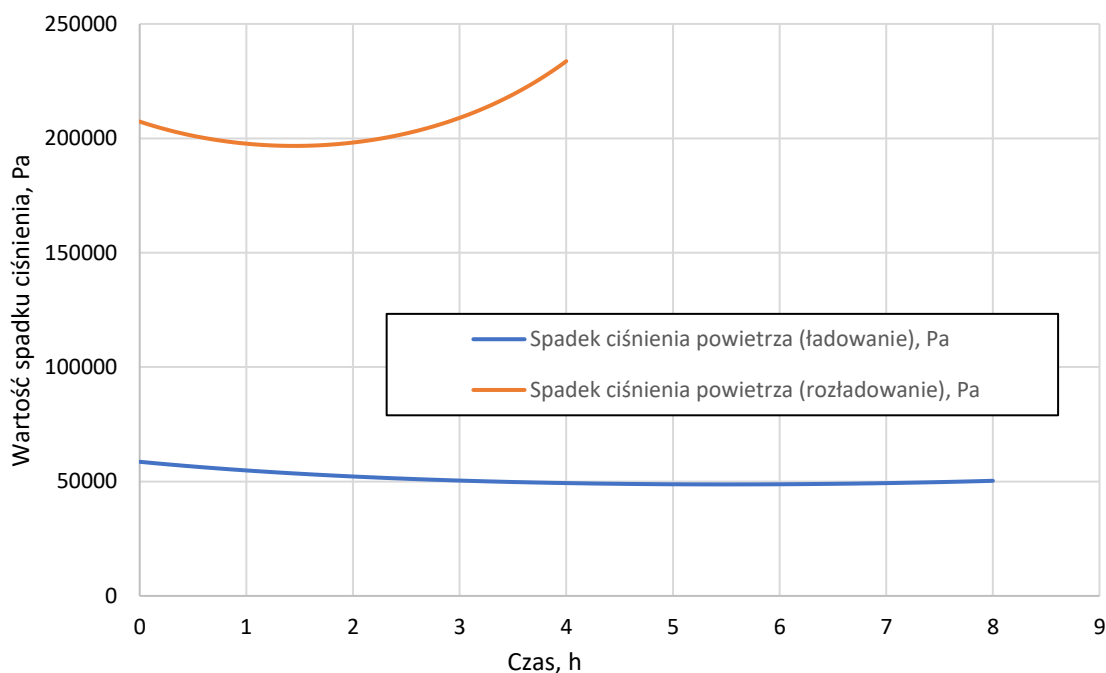
Parametr	Jednostka	Wariant 8/350/2,5	Wariant 8/350/2,0	Wariant 8/350/1,5	Wariant 8/350/1,4	Wariant 8/350/1,3	Wariant 8/350/1,2
Stosunek ciśnień magazynowania p_{6_max}/p_{6_min}	-	2,5	2,0	1,5	1,4	1,3	1,2
Maksymalna temperatura powietrza ładującego	$^\circ\text{C}$	350	350	350	350	350	350
Ciśnienie maksymalne w magazynie	MPa	8	8	8	8	8	8
Ciśnienie minimalne w magazynie	MPa	3,20	4,00	5,33	5,71	6,15	6,67
Ciśnienie przed ekspanderem	MPa	2,90	3,00	3,15	3,20	3,25	3,30
Najwyższa moc elektryczna zespołu sprężarki	MW	68,87	57,24	38,06	32,60	26,32	19,00
Moc elektryczna zespołu ekspandera	MW	71,47	60,26	40,96	35,32	28,72	20,91
Moc cieplna wymiennika ciepłowniczego	MW	7,68	8,47	7,56	6,90	5,94	4,58
Wymagana moc chłodnicza przed drugą sekcją sprężarki	MW	8,5 do 25,03	8,04 do 18,78	6,24 do 10,61	5,54 do 8,68	4,64 do 6,64	3,49 do 4,5
Sprawność energetyczna	%	57,77	57,42	56,81	56,69	56,55	56,42
Sprawność energetyczna z pracującym wymiennikiem ciepłowniczym	%	70,07	73,40	77,59	78,61	79,70	80,90
Pojemność energetyczna	MWh	288,69	243,46	165,46	142,68	116,02	84,48
Gęstość energii	MJ/m ³	18,15	15,31	10,40	8,97	7,30	5,31
Gęstość energii	kWh/m ³	5,04	4,25	2,89	2,49	2,03	1,48
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	MJ/m ³	22,01	19,57	14,21	12,44	10,28	7,62
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	kWh/m ³	6,11	5,44	3,95	3,46	2,86	2,12
Ilość segmentów TES	sztuki	12	10	7	6	5	4
Maksymalny spadek ciśnienia TES	kPa	504,26	233,72	62,18	39,36	21,56	9,12
Nominalny przepływ w sprężarce	kg/s	109,60	91,34	60,89	52,19	42,16	30,45
Nominalny przepływ przez ekspander	kg/s	219,65	183,12	122,23	104,83	84,76	61,34

Tabela Z2.2 Wyniki analiz dla temperatury maksymalnej za drugą sekcją sprężarki $t = 300,0 \text{ }^\circ\text{C}$, dla różnych stosunków ciśnień p_{6_max}/p_{6_min}

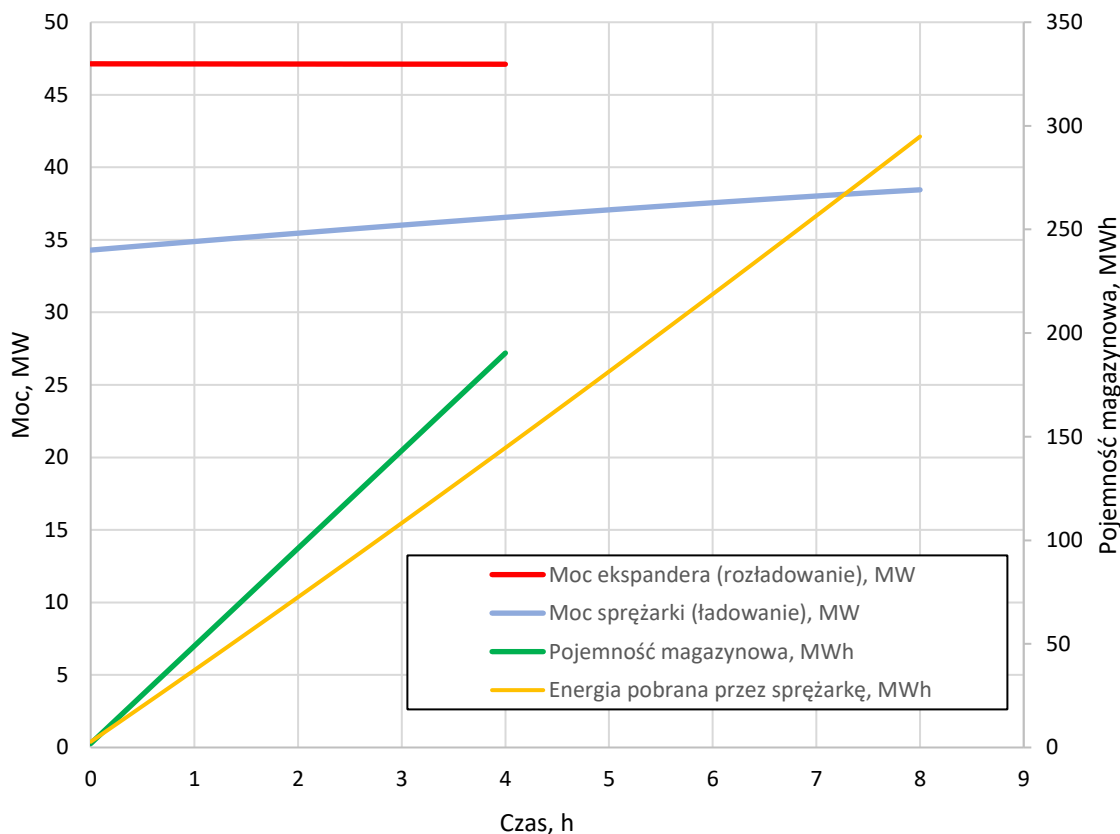
Parametr	Jednostka	Wariant 8/300/2,5	Wariant 8/300/2,0	Wariant 8/300/1,5	Wariant 8/300/1,4	Wariant 8/300/1,3	Wariant 8/300/1,2
Stosunek ciśnień magazynowania p_{6_max}/p_{6_min}	-	2,5	2,0	1,5	1,4	1,3	1,2
Maksymalna temperatura powietrza ładującego	$^\circ\text{C}$	300	300	300	300	300	300
Ciśnienie maksymalne w magazynie	MPa	8	8	8	8	8	8
Ciśnienie minimalne w magazynie	MPa	3,20	4,00	5,33	5,71	6,15	6,67
Ciśnienie przed ekspanderem	MPa	1,90	1,95	2,05	2,10	2,10	2,10
Najwyższa moc elektryczna zespołu sprężarki	MW	68,98	57,34	38,12	32,65	26,36	19,03
Moc elektryczna zespołu ekspandera	MW	60,20	50,75	34,56	29,87	24,22	17,59
Moc cieplna wymiennika ciepłowniczego	MW	10,83	11,27	9,59	8,67	7,40	5,66
Wymagana moc chłodnicza przed drugą sekcją sprężarki	MW	9,95 do 27,87	9,33 do 20,98	7,18 do 11,91	6,36 do 9,76	5,32 do 7,48	3,99 do 5,09
Sprawność energetyczna	%	48,75	48,40	47,94	47,94	47,67	47,42
Sprawność energetyczna z pracującym wymyennikiem ciepłowniczym	%	66,13	69,70	74,29	75,49	76,52	77,65
Pojemność energetyczna	MWh	243,08	204,93	139,58	120,64	97,84	71,05
Gęstość energii	MJ/m ³	15,28	12,89	8,78	7,59	6,15	4,47
Gęstość energii	kWh/m ³	4,25	3,58	2,44	2,11	1,71	1,24
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	MJ/m ³	20,73	18,55	13,60	11,95	9,87	7,32
Gęstość energii przy uwzględnieniu pracy wymiennika ciepłowniczego	kWh/m ³	5,76	5,15	3,78	3,32	2,74	2,03
Ilość segmentów TES	sztuki	12,00	10,00	7,00	6,00	5,00	4,00
Maksymalny spadek ciśnienia TES	kPa	504,26	233,72	58,71	37,16	20,35	8,60
Nominalny przepływ w sprężarce	kg/s	109,60	91,34	60,89	52,19	42,16	30,45
Nominalny przepływ przez ekspander	kg/s	219,65	183,12	122,23	104,83	84,76	61,34



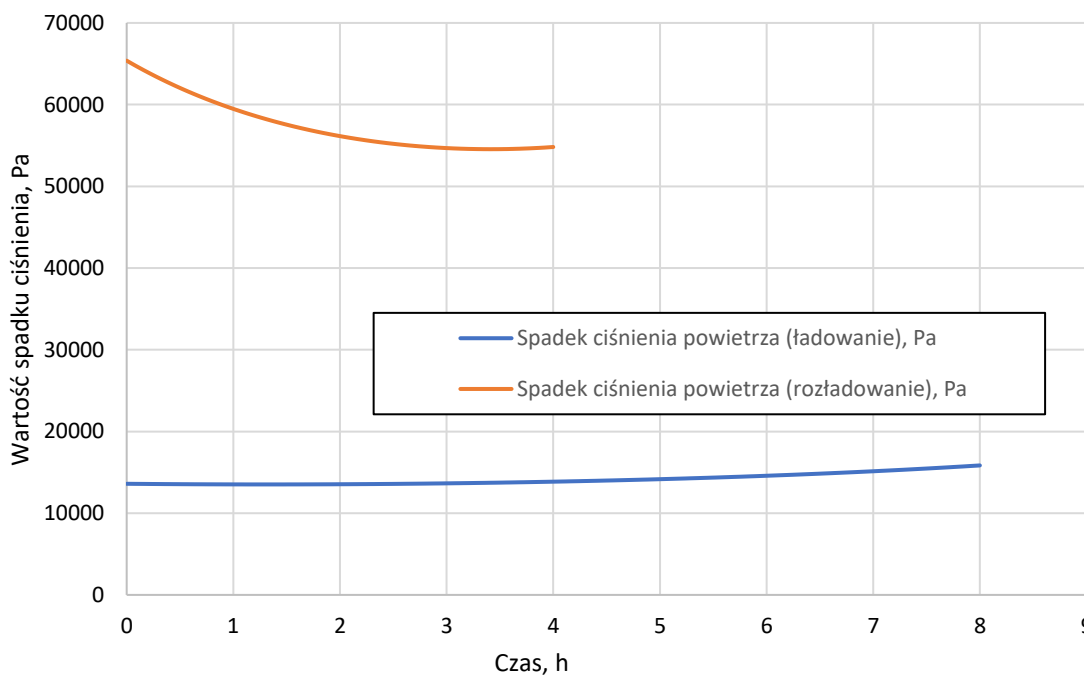
Rysunek Z2.1 Wariant 8/400/2,0. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



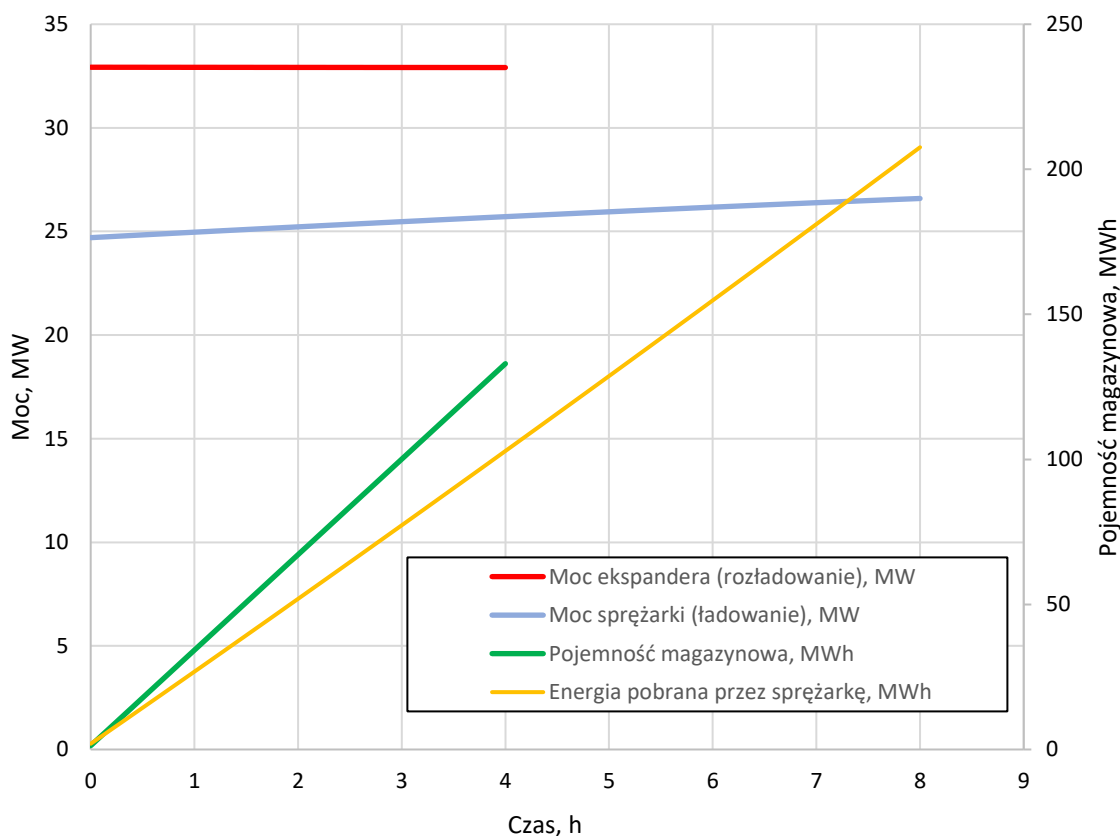
Rysunek Z2.2 Wariant 8/400/2,0. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



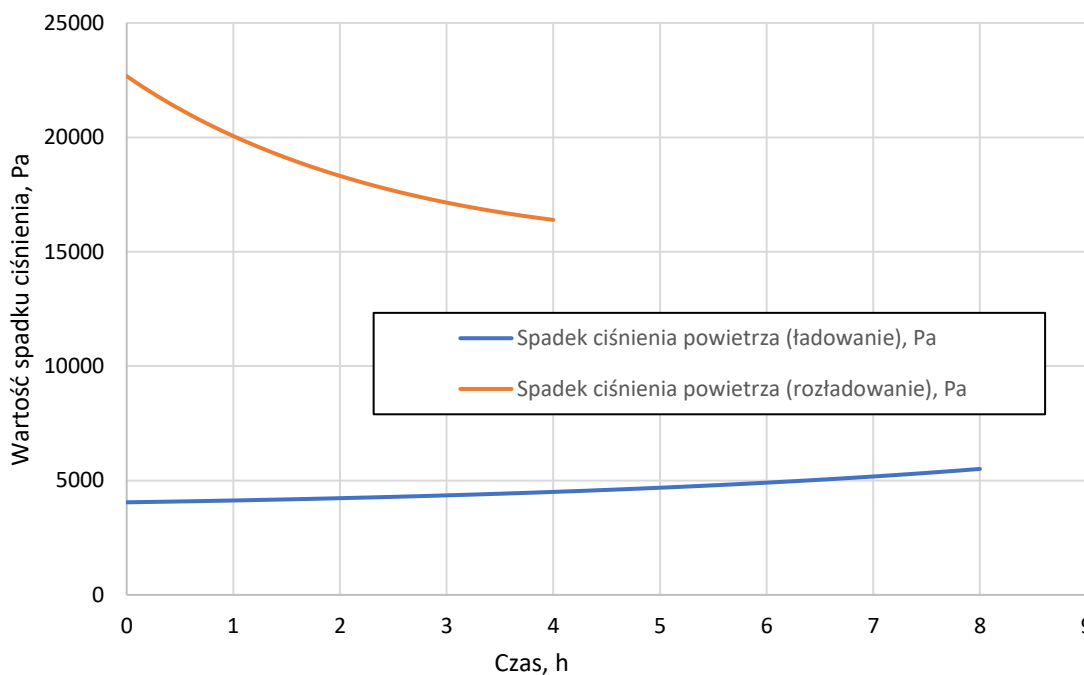
Rysunek Z2.3 Wariant 8/400/1,5. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



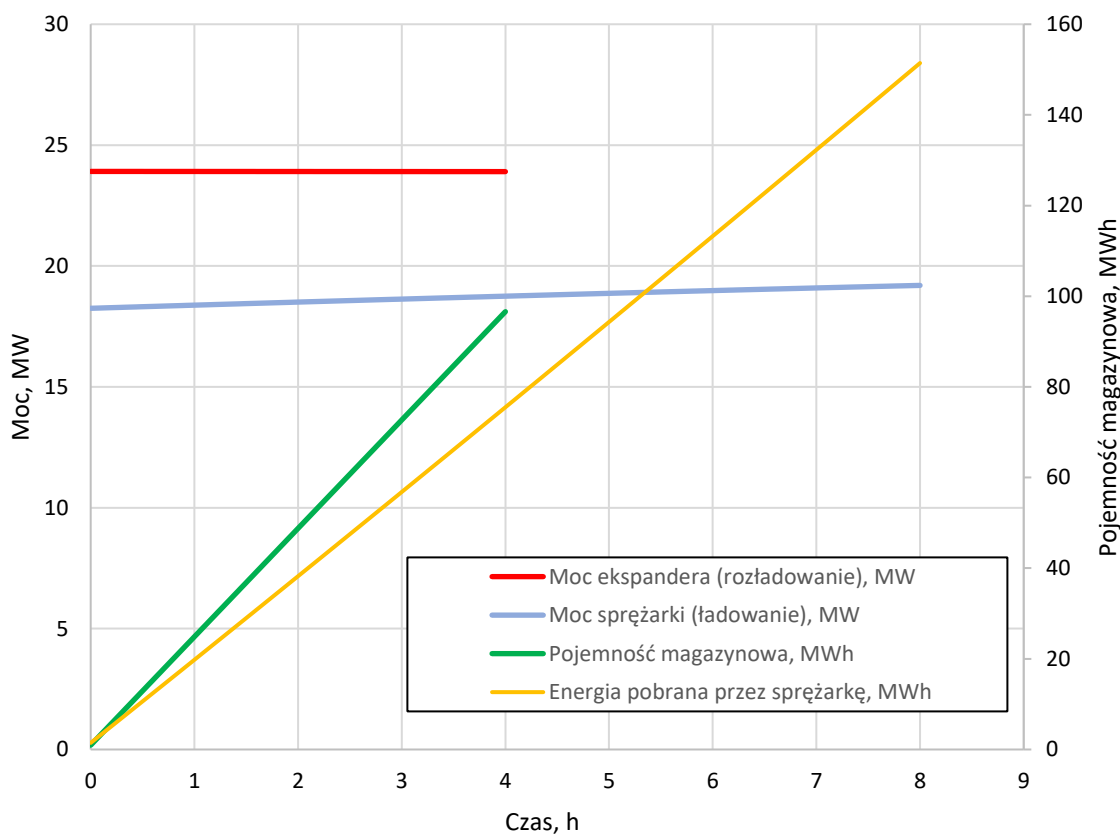
Rysunek Z2.4 Wariant 8/400/1,5. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



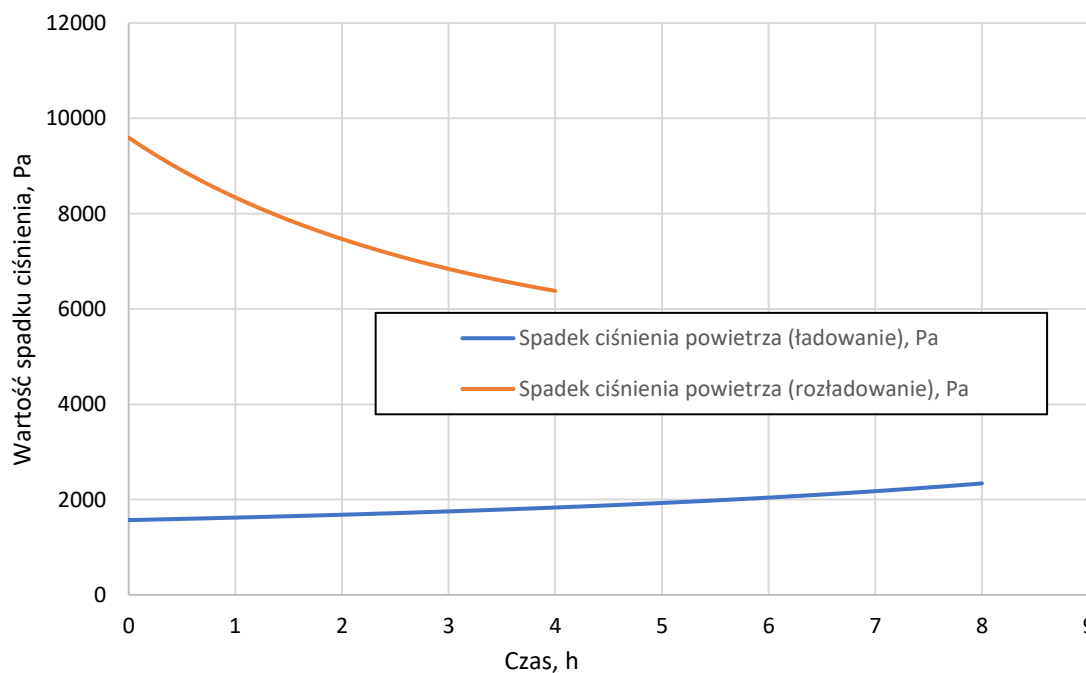
Rysunek Z2.5 Wariant 8/400/1,3. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



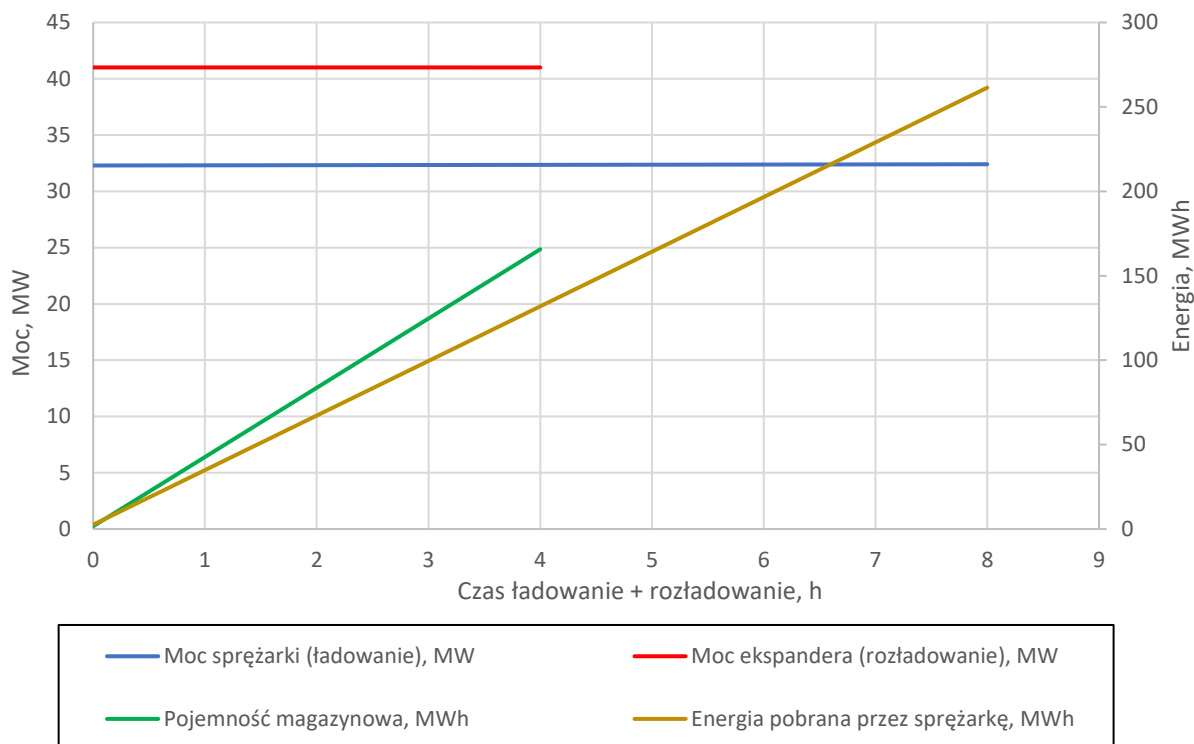
Rysunek Z2.6 Wariant 8/400/1,3. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



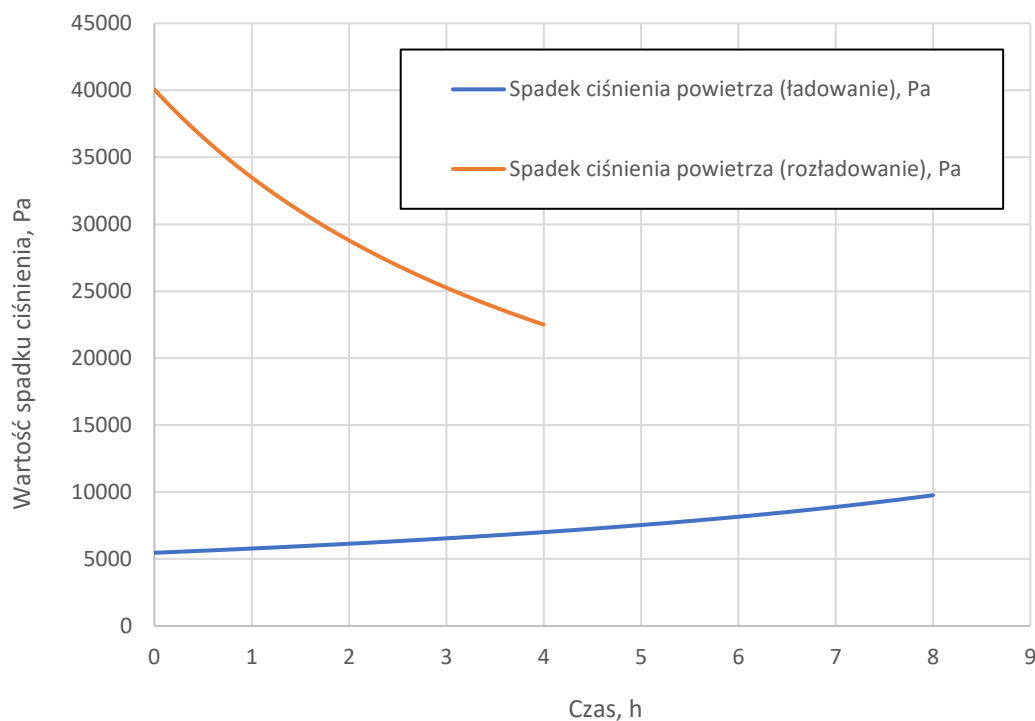
Rysunek Z2.7 Wariant 8/400/1,2. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



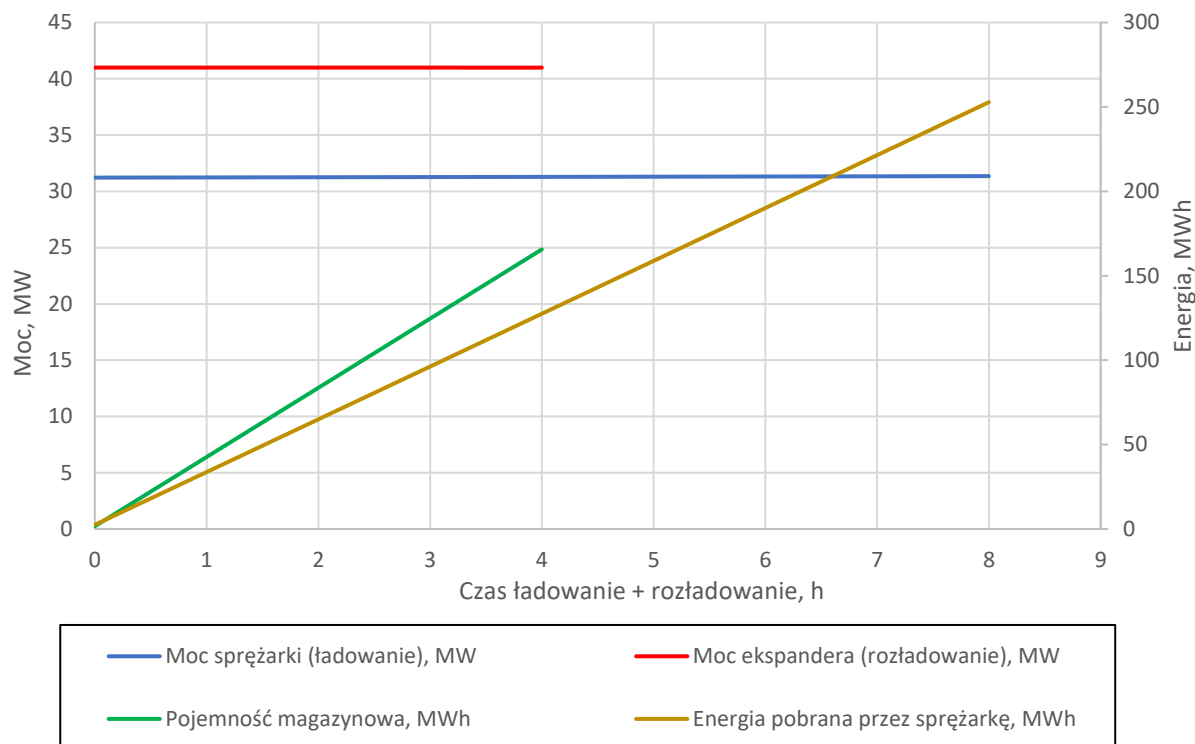
Rysunek Z2.8 Wariant 8/400/1,2. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



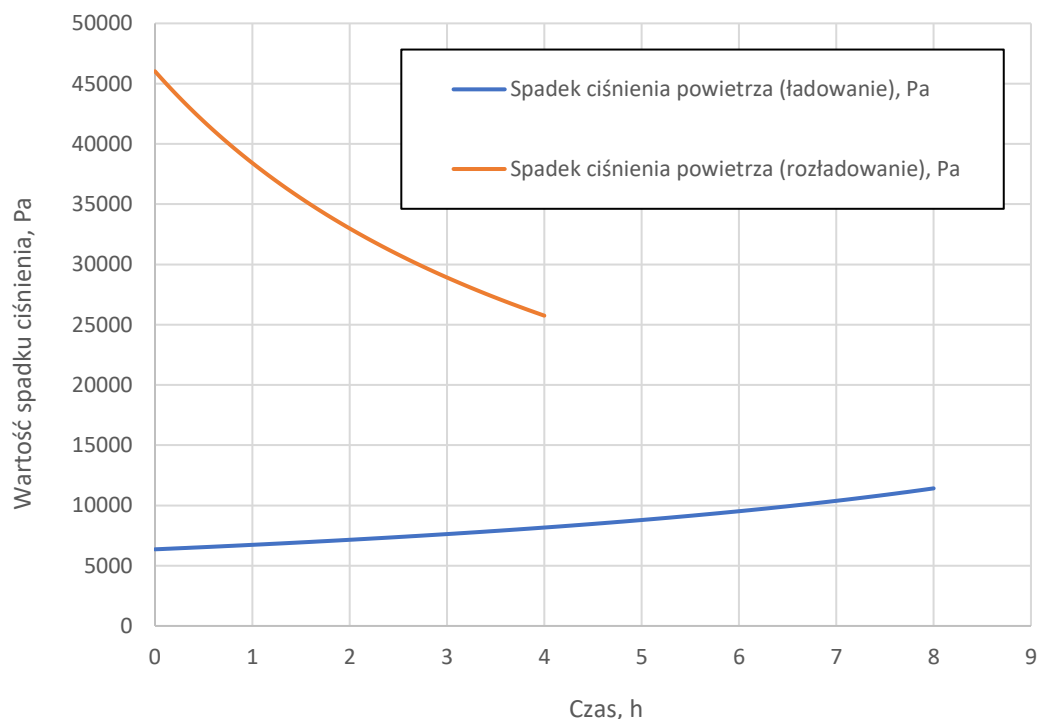
Rysunek Z2.9 Wariant 8/400/KW. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



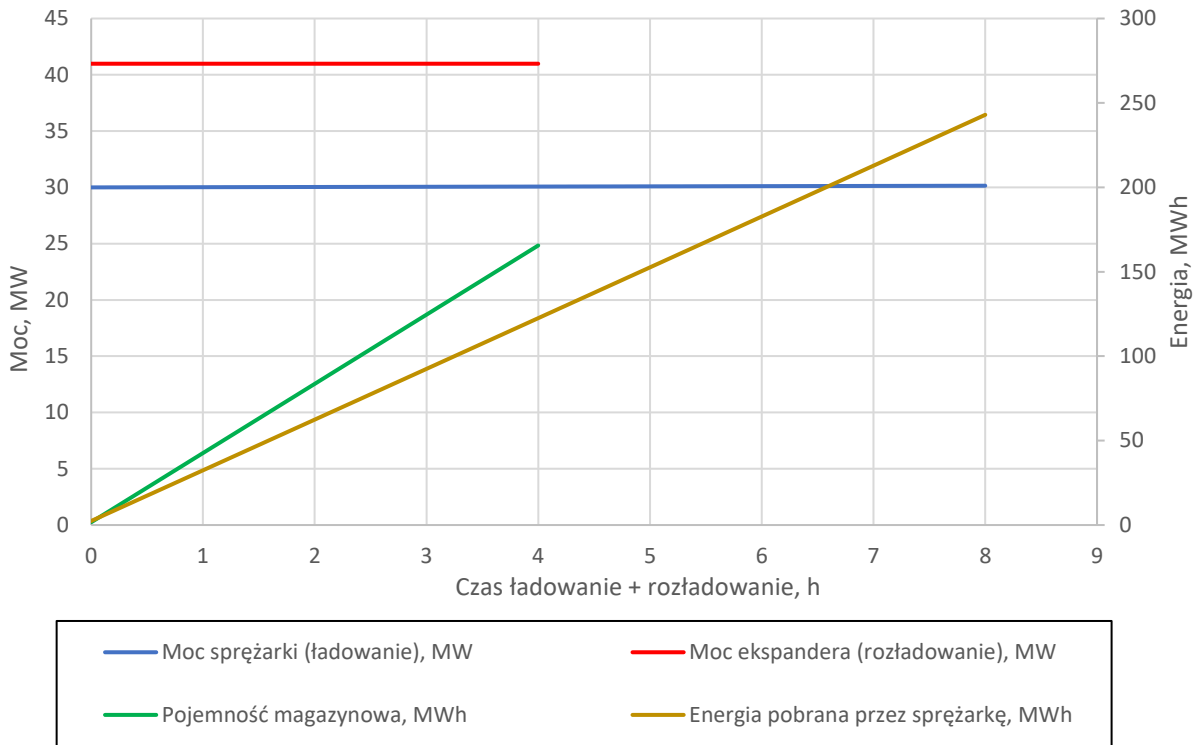
Rysunek Z2.10 Wariant 8/400/KW. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



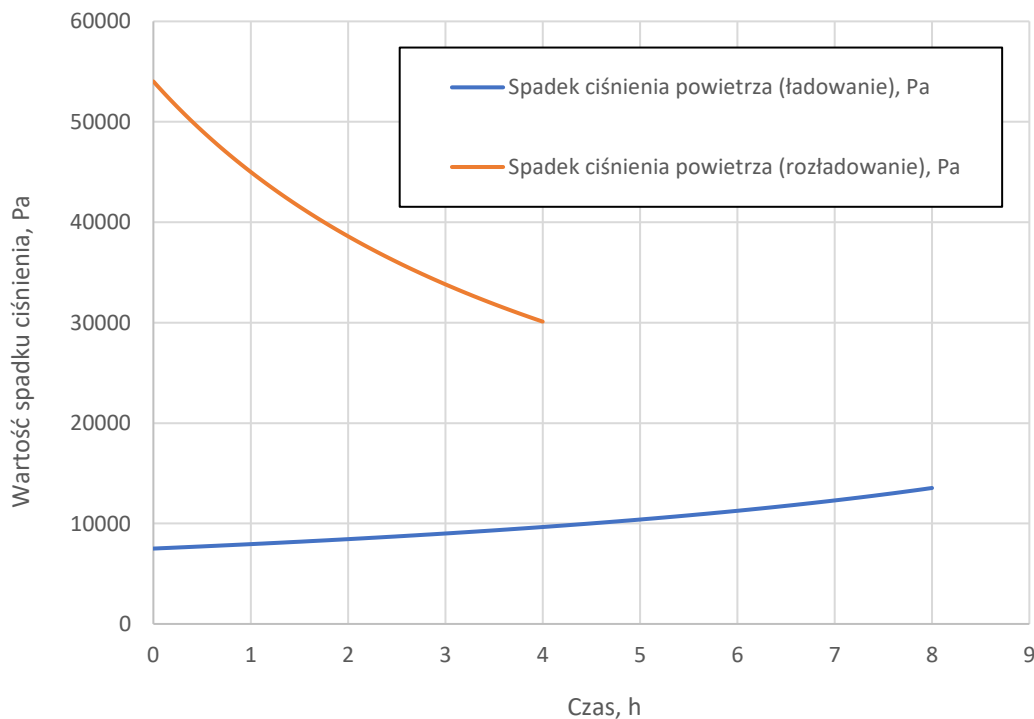
Rysunek Z2.11 Wariant 7/400/KW. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



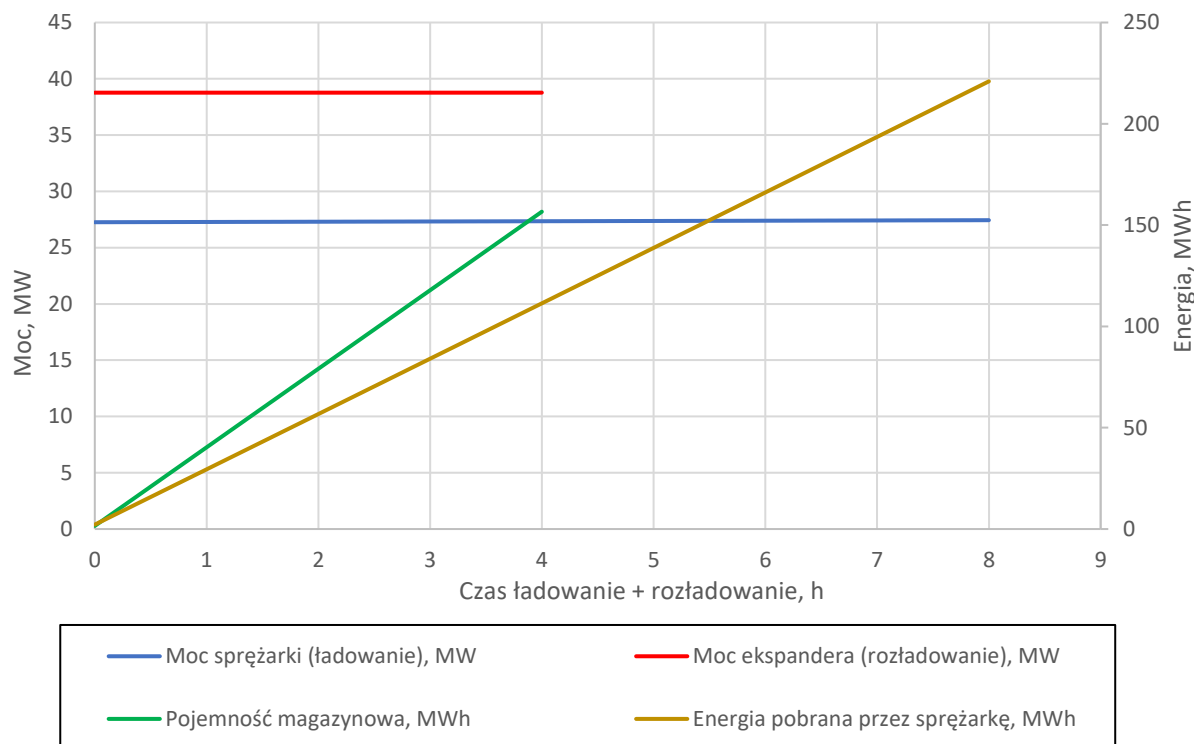
Rysunek Z2.12 Wariant 7/400/KW. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



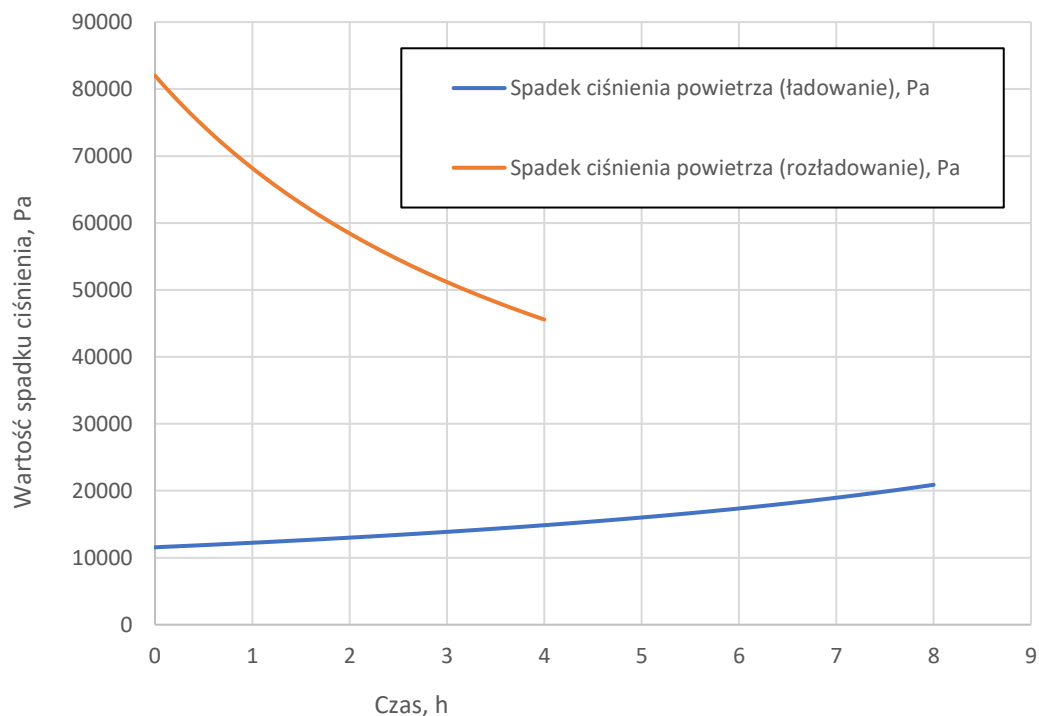
Rysunek Z2.13 Wariant 6/400/KW. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



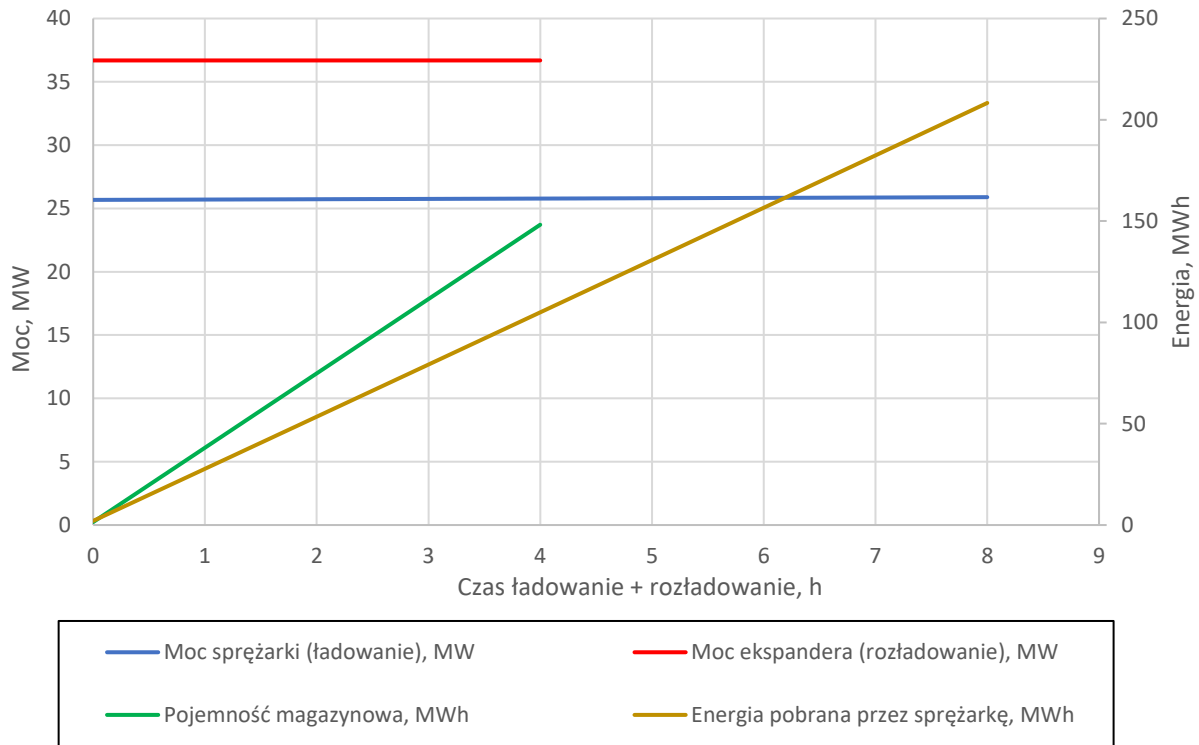
Rysunek Z2.14 Wariant 6/400/KW. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



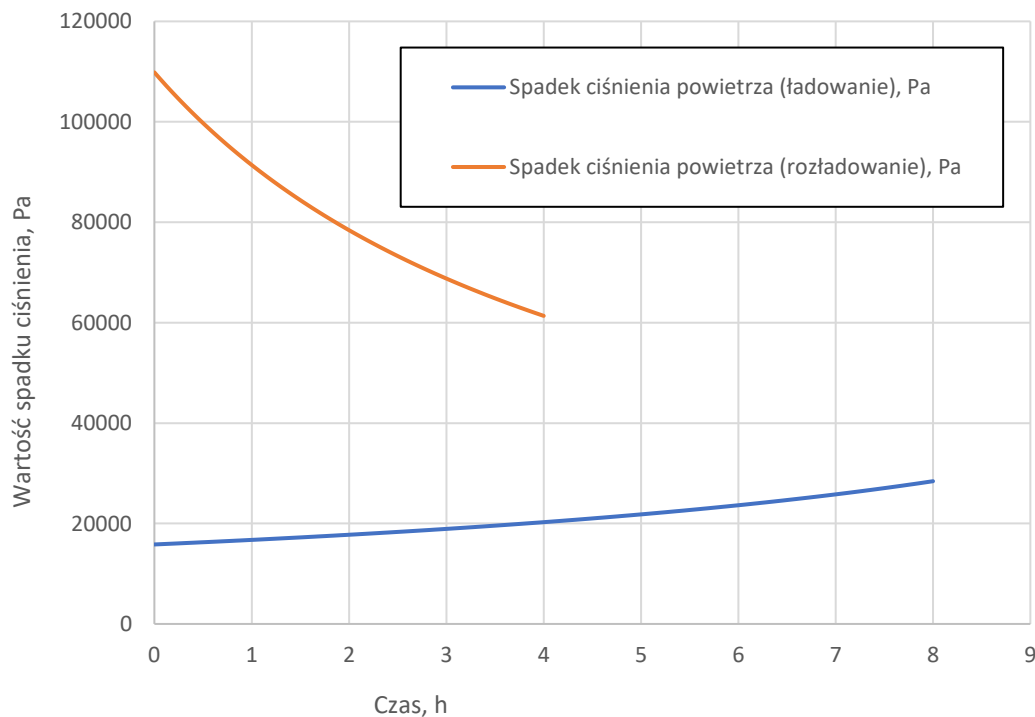
Rysunek Z2.15 Wariant 4/400/KW. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



Rysunek Z2.16 Wariant 4/400/KW. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu



Rysunek Z2.17 Wariant 3/400/KW. Wykres zmian mocy sprężarki i ekspandera oraz poziomu naładowania systemu w trakcie cyklu



Rysunek Z2.18 Wariant 3/400/KW. Wykres zmian spadku ciśnienia przepływającego powietrza przez TES w trakcie cyklu

Streszczenie

W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne dla systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu oraz dokonano przeglądu struktur możliwych do wykorzystania jako magazynu sprężonego powietrza na terenie Polski, jak również dokonano ogólnego przeglądu magazynów ciepła, które mogłyby zostać wykorzystane do budowy systemu adiabatycznego. Główny cel pracy, jakim było opracowanie koncepcji adiabatycznego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu, mogącego odegrać istotną rolę w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, został zrealizowany. W pracy przedstawiono dwa podstawowe warianty systemu, to znaczy z izochorycznym oraz z izobarycznym magazynem sprężonego powietrza, gdzie wykorzystuje się opatentowany wynalazek hybrydowego magazynu sprężonego powietrza oraz ciepła, wykorzystującego nieczynny szyb pokopalniany. Na potrzeby koncepcji dokonano wstępnej weryfikacji możliwości wykorzystania szybu jako zbiornika ciśnieniowego oraz zaproponowano rozwiązania konstrukcyjne dla segmentowego zasobnika ciepła. Dla obu konfiguracji systemu wykonano analizy termodynamiczne dla różnych kombinacji ciśnień w magazynie sprężonego powietrza oraz temperatur ładowania zasobnika ciepła, jak również uwzględniono możliwość wykorzystania ciepła, które nie jest na chwilę obecną możliwe do zmagazynowania w racjonalny sposób. Część ciepła normalnie traconego do toczenia w fazie ładowania, planuje się wykorzystać do podgrzewu wody w magistrali ciepłowniczej, z wykorzystaniem wymiennika ciepłowniczego. Przeprowadzone analizy wykazały, że najbardziej sprawny jest system z izobarycznym magazynem sprężonego powietrza. Wykorzystując wskaźnik NPV wykonano uproszczoną analizę ekonomiczną dla dwóch głównych konfiguracji pracy systemu, w opcjach z wykorzystaniem wymiennika ciepłowniczego i bez. Zastosowany wymiennik ciepłowniczy wskazuje na duży potencjał zaproponowanych koncepcji. Analizy ekonomiczne wykazały wyższość izobarycznego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu, w szczególności z wykorzystaniem wymiennika ciepłowniczego, jednocześnie wskazują, iż przy określonej różnicy cen energii elektrycznej system ten może być komercyjnie opłacalny.

Abstract

The work presents the theoretical basis for compressed air energy storage systems and reviews structures that could be used as compressed air storage in Poland, as well as a general review of heat storage that could be used to build an adiabatic system. The main objective of the work, which was to develop a concept for an adiabatic compressed air energy storage system that could play an important role in the National Electricity System, has been achieved. The paper presents two basic variants of the system, with isochoric and with isobaric compressed air storage, where the patented invention of a hybrid compressed air and heat storage using a disused post-mining shaft is used. For the concept, a preliminary verification of the feasibility of using the shaft as a pressure vessel was carried out, and design solutions were proposed for the segmented thermal energy storage. For both system configurations, thermodynamic analyses were performed for various combinations of compressed air storage pressures and heat storage charging temperatures, and the possibility of using heat that is not reasonably storable was taken into account. Part of the heat normally lost to rolling during the charging phase is planned to be used to heat water in the district heating main using a heat exchanger. The analysis carried out showed that the most efficient system is the one with isobaric compressed air storage, and this despite the adoption of compressor operation with unfavorable efficiency characteristics. Using the NPV ratio, a simplified economic analysis was performed for the two main configurations of system operation in options with and without the heat exchanger. The heat exchanger used shows the high potential of the proposed concepts. Economic analyses have shown the superiority of the isobaric compressed air energy storage system, particularly with the use of the heat exchanger, while also indicating that with a certain difference in electricity prices, this system can be commercially viable.