

Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

(nazwa i dane adresowe podmiotu
habilitującego, wybranego do przeprowadzenia
postępowania)

za pośrednictwem:

Rady Doskonałości Naukowej

pl. Defilad 1

00-901 Warszawa

(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

Lukasz Szablowski

(imię i nazwisko wnioskodawcy)

Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Ciepłej
Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa

(miejsce pracy/jednostka naukowa)

Wniosek

z dnia 21.09.2023 r.

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego
w dziedzinie **nauk inżynieryjno-technicznych** w dyscyplinie¹ **inżynieria środowiska,
górnictwo i energetyka**.

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia
doktora habilitowanego

Osiągnięcie nr I: **Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego układów do
magazynowania energii przy pomocy sprężonego powietrza** – opublikowane w
formie monografii naukowej.

Osiągnięcie nr II: **Badania numeryczne i eksperymentalne wybranych metod
wytwarzania i wykorzystania wodoru** – opublikowane w formie cyklu publikacji
powiązanych tematycznie.

Wnoszę – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie
wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała
uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu **tajnym/jawnym**^{*2}

Zostałem poinformowany, że:

*Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w
sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej*

¹ Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

² * Niepotrzebne skreślić.

z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).

Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl, tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.

Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c) Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art. 232 - 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu przeprowadzenia postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.

Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html

Łukasz
Szabłowski

Elektronicznie podpisany
przez Łukasz Szabłowski
Data: 2023.09.21 14:36:17
+02'00'

.....
(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

1. Kopia dokumentu potwierdzającego posiadanie stopnia naukowego doktora.
2. Dane wnioskodawcy.
3. Autoreferat.
4. Wykaz osiągnięć naukowych.
5. Wersje elektroniczne składników przedłożonych osiągnięć naukowych.
6. Wersje elektroniczne poświadczeń ważniejszych osiągnięć naukowych.
7. Oświadczenia o wkładzie autorskim dla osiągnięcia nr II.



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

Autoreferat

dr inż. Łukasz Szablowski

ORCID: 0000-0002-6646-2297

Warszawa 2023

1 SPIS TREŚCI

2	Imię i nazwisko	4
3	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	4
4	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	4
5	Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)	4
5.1	Elementy składowe I osiągnięcia	4
5.2	Elementy składowe II osiągnięcia	5
5.3	Opis I osiągnięcia	5
5.3.1	Geneza, cel i zakres osiągnięcia	5
5.3.2	Metodologia	6
5.3.3	Syntetyczny opis otrzymanych wyników	14
5.3.4	Utylitaryzm wyników wykonanych badań	49
5.4	Podsumowanie najważniejszych cech I osiągnięcia naukowego	50
5.5	Opis II osiągnięcia	52
5.5.1	Geneza, cel i zakres osiągnięcia	52
5.5.2	Metodologia	53
5.5.3	Syntetyczny opis otrzymanych wyników	60
5.5.4	Utylitaryzm wyników wykonanych badań	74
5.6	Podsumowanie najważniejszych cech II osiągnięcia naukowego	75
6	Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej	81
6.1	Staże naukowe po doktoracie	81
6.2	Staże naukowe przed doktoratem:	82
7	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	83
7.1	Prowadzone przedmioty dydaktyczne i prace dyplomowe	83
7.2	Udział w redakcjach czasopism naukowych	83
7.3	Redakcja wydań specjalnych czasopism naukowych	83
7.4	Nagrody Rektora PW	84
7.5	Nagroda Nernsta	85
7.6	Stypendium MNiSW	85
7.7	Publikacje dla organizacji ekologicznych (WWF)	85
7.8	Publikacje dla innych organizacji (Polski Instytut Ekonomiczny)	85

8	Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej	85
8.1	Kierowanie projektami	85
8.2	Zgłoszenia patentowe	86
8.3	Wdrożenia	86
8.4	Recenzje	86

2 IMIĘ I NAZWISKO

Łukasz Szablowski

3 POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE LUB ARTYSTYCZNE – Z PODANIEM PODMIOTU NADAJĄCEGO STOPIEŃ, ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

2009 – dyplom inżynierski, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej

2010 – dyplom magisterski, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej

2014 – dyplom doktorski, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Strategia sterowania źródłami pracującymi w systemie energetyki rozproszonej”

4 INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH

Od września 2014 - adiunkt na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej

5 OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (Dz. U. z 2021 R. POZ. 478 z PÓŹN. ZM.)

We wniosku przedstawione zostały dwa osiągnięcia naukowe:

- I. Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego układów do magazynowania energii przy pomocy sprężonego powietrza.
- II. Badania numeryczne i eksperymentalne wybranych metod wytwarzania i wykorzystania wodoru.

5.1 ELEMENTY SKŁADOWE I OSIĄGNIĘCIA

-Monografia [M1]: Łukasz Szablowski, Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego oraz oceny pod kątem energetycznym i egzergetycznym układów magazynujących energię przy

pomocy sprężonego powietrza, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2023 (MEiN 80 pkt).

5.2 ELEMENTY SKŁADOWE II OSIĄGNIĘCIA

-Artykuł [A1]: Szablowski, L., Milewski, J., Badyda, K., Kupecki, J. ANN-supported control strategy for a solid oxide fuel cell working on demand for a public utility building. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018, 43(6), 3555-3565.

IF (z 2018 r.): 4,084, MNiSW 35 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

-Artykuł [A2]: Kupecki, J., Motylinski, K., Szablowski, L., Zurawska, A., Naumovich, Y., Szczesniak, A., Milewski, J. Quantification of the Improvement of Performance of Solid Oxide Fuel Cell Using Chiller-Based Fuel Recirculation. *Journal of Energy Resources Technology* 2020, 142(2), 022002.

IF (z 2020 r.): 2,903, MEiN 100 pkt

-Artykuł [A3]: Szablowski, L., Kupecki, J., Milewski, J., Motylinski, K. Kinetic model of a plate fin heat exchanger with catalytic coating as a steam reformer of methane, biogas, and dimethyl ether. *International Journal of Energy Research* 2019, 43(7), 2930-2939.

IF (z 2019 r.): 3,741, MEiN 100 pkt

-Artykuł [A4]: Szablowski, L., Dybinski, O., Szczesniak, A., Milewski, J. Mathematical model of steam reforming in the anode channel of a molten carbonate fuel cell. *Energies* 2022, 15(2), 608.

IF (z 2022 r.): 3,2, MEiN 140 pkt

5.3 OPIS I OSIĄGNIĘCIA

Poniżej opisane zostało I osiągnięcie naukowe pt. „Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego układów do magazynowania energii przy pomocy sprężonego powietrza”, którego wyniki opublikowano w formie monografii [M1].

5.3.1 Geneza, cel i zakres osiągnięcia

Magazynowanie energii odgrywa coraz większą rolę w obecnym systemie energetycznym ze względu na bardzo intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii, wytwarzających energię elektryczną w sposób nieregularny i nieprzewidywalny.

Obecnie na dużą skalę stosowane są tylko dwie metody magazynowania energii: elektrownie szczytowo pompowe i magazynowanie energii sprężonego powietrza (CAES – ang. Compressed Air Energy Storage). Obydwie te technologie wymagają specyficznych warunków geograficznych lub geologicznych, co oznacza, że jest stosunkowo niewiele miejsc, w których istnieją odpowiednie warunki do rozwoju wyżej wymienionych technologii.

W przypadku elektrowni CAES do magazynowania sprężonego powietrza potrzebny jest zbiornik o dużej pojemności. Ze względu na wymaganą ilość powietrza i wynikające z tego ograniczenia finansowe, tylko naturalne zbiorniki wydają się być obecnie ekonomicznie opłacalne, np. kawerny solne, warstwy wodonośne, wyrobiska solne, kopalnie wapienia i inne formacje mineralne w twardych strukturach skalnych.

Natomiast dla elektrowni szczytowo-pompowych w idealnych warunkach wymagane jest jezioro położone u podnóża góry, na szczycie której można by zbudować zbiornik górny.

Alternatywą dla tych technologii jest elektrownia magazynująca energię w ciekłym powietrzu (LAES – ang. Liquid Air Energy Storage), która może magazynować duże ilości energii w przypadku braku wymagających warunków.

Technologia CAES jest stosunkowo dobrze znana. Obecnie na świecie istnieją dwa duże zakłady tego typu: Huntorf w Niemczech (pierwotnie 290 MW, w 2006 zmodyfikowana do 321 MW) oraz McIntosh w USA (110 MW). Pierwszy został zbudowany w 1978 roku, drugi w 1991 roku.

5.3.2 Metodologia

Zastosowaną metodyką badań będzie modelowanie matematyczne i symulacja cyfrowa.

Zarówno statyczne jak i dynamiczne modele matematyczne układów CAES zostały zbudowane przy użyciu oprogramowania Aspen HYSYS [1,2]. Równania opisujące procesy dynamiczne w poszczególnych elementach modelowanych układów zostały opisane również we wcześniejszych pracach autora [3–5].

Model czynnika roboczego wykorzystujący równanie stanu Penga-Robinsona ma następującą postać [6]:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b) + b(v - b)}, \quad (1)$$

gdzie: p – ciśnienie, R – stała gazowa, T – temperatura w skali bezwzględnej, v – objętość molowa, a – współczynnik przyciągania, b – współczynnik uwzględniający rozmiary cząsteczek (van der Waals covolume).

Przepływ masowy czynnika roboczego przez zawór opisano następującym wzorem:

$$\dot{m} = k\sqrt{\Delta p}, \quad (2)$$

gdzie: $\dot{m}$ – przepływ masowy, k – współczynnik przewodności przepływu, Δp – spadek ciśnienia na zaworze.

Podstawowe równanie określające charakterystykę zaworów uwzględnia współczynnik C_v oraz stratę ciśnienia na zaworze z powodu oporów przepływu

$$\dot{m} = f(C_v, p_1, p_2), \quad (3)$$

gdzie: $\dot{m}$ – przepływ masowy, C_v – współczynnik przewodności przepływu, p_1 – ciśnienie na wlocie, p_2 – ciśnienie na wylocie.

Zależność opisująca wymianę ciepła w wymienniku płaszczowo-rurowym po stronie płaszcza ma następującą postać:

$$\dot{m}_{shell} \cdot (h_{in} - h_{out})_{shell} - Q_{loss} + Q = \frac{d(V \cdot h_{out})_{shell}}{dt}. \quad (4)$$

Z kolei zależność opisującą wymianę ciepła po stronie rurek wymiennika płaszczowo-rurowego można opisać poniższym równaniem:

$$\dot{m}_{tube} \cdot (h_{in} - h_{out})_{tube} - Q = \frac{d(V \cdot h_{out})_{tube}}{dt}, \quad (5)$$

gdzie: $\dot{m}_{shell}$ – przepływ masowy czynnika po stronie płaszcza wymiennika, $\dot{m}_{tube}$ – przepływ masowy czynnika po stronie rurek, h – entalpia właściwa czynnika roboczego, Q – ciepło wymieniane pomiędzy płaszczem a rurkami płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła, Q_{loss} – straty ciepła, V – objętość czynnika zalegającego w płaszczu lub rurkach.

Zarówno politropowa jak i izentropowa moc sprężarki lub turbiny może być obliczona przy pomocy wzoru (6)

$$P = \dot{n}_1 \cdot M \cdot \left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot CF \cdot \left(\frac{p_1}{\rho_1}\right) \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} - 1 \right], \quad (6)$$

gdzie: n – wykładnik objętości, CF – współczynnik korekcyjny, p_1 – ciśnienie na wlocie, p_2 – ciśnienie na wylocie, ρ_1 – gęstość czynnika na wlocie, $\dot{n}_1$ – strumień molowy na wlocie, M – masa molowa czynnika roboczego.

Do policzenia mocy izentropowej wykładnik objętości obliczany jest według zależności (7)

$$n = \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(\rho'_2/\rho_1)}, \quad (7)$$

gdzie: ρ'_2 – gęstość czynnika na wylocie przy entropii równej entropii czynnika na wlocie.

Moc politropowa jest obliczana przy użyciu wykładnika objętości opisanego równaniem (8)

$$n = \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(\rho_2/\rho_1)}, \quad (8)$$

gdzie: ρ_2 – gęstość czynnika na wylocie.

Współczynnik korekcyjny z wzoru (6) obliczany jest według równania (9)

$$CF = \frac{h'_2 - h_1}{\left(\frac{n}{n-1}\right) \left(\frac{p_2}{\rho'_2} - \frac{p_1}{\rho_1}\right)}, \quad (9)$$

gdzie: h'_2 – entalpia właściwa czynnika na wylocie dla procesu izentropowego, h_1 – entalpia właściwa czynnika na wlocie.

Moc dostarczana do czynnika roboczego w trakcie sprężania jest opisana równaniem (10)

$$P_{1-2} = \dot{n}_1 \cdot M \cdot (h_2 - h_1), \quad (10)$$

gdzie: $\dot{n}_1$ – strumień molowy na wlocie, h_2 – entalpia właściwa czynnika roboczego na wylocie, h_1 – entalpia właściwa czynnika roboczego na wlocie, M – masa molowa czynnika roboczego.

Moc uzyskaną w wyniku rozprężania czynnika roboczego w turbinie opisano poniżej:

$$P_{1-2} = \dot{n}_1 \cdot M \cdot (h_1 - h_2), \quad (11)$$

gdzie oznaczenia są takie same jak dla wzoru (10).

Z kolci moment bezwładności opisano równaniem (12)

$$I = m \cdot r^2, \quad (12)$$

gdzie: m – masa elementów obracających się, r – promień bezwładności.

Moc potrzebną do zmiany prędkości obrotowej można przedstawić w następujący sposób:

$$P_t = I|\omega| \frac{d\omega}{dt}, \quad (13)$$

gdzie: ω – prędkość obrotowa.

Bilanse masy i energii czynnika roboczego podczas napełniania i opróżniania zbiornika na sprężone powietrze można opisać poniższymi równaniami:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (14)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d(\rho \cdot V \cdot h)}{dt} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 + V \frac{dp}{dt} + Q \quad (15)$$

gdzie: m – masa, $\dot{m}$ – przepływ masowy, h – entalpia właściwa,

H – entalpia całkowita, p – ciśnienie, Q – ciepło wymieniane, ρ – gęstość, V – objętość, t – czas, 1 – indeks oznaczający parametry na wlocie, 2 – indeks oznaczający parametry na wylocie.

Wszystkie modele zostały zbudowane przy użyciu oprogramowania Aspen HYSYS. Skład masowy powietrza zastosowany w modelach przedstawiono w Tab. 1. Parametry powietrza przyjęte zgodnie z warunkami ISO, tj. temperatura 15°C, ciśnienie 1,013 bar. Założono, że wszystkie układy do magazynowania energii są ładowane podczas dolin obciążenia systemu elektroenergetycznego i rozładowywane w szczytach. Paliwem zużywanym podczas rozładunku w układach adiabatycznych był metan o wartości opałowej równej 50035 kJ/kg. W układach adiabatycznych jako czynnik roboczy w magazynie ciepła zastosowano olej termalny Therminol 55. Jest to syntetyczny olej stosowany w układach akumulujących ciepło [7], a jego zakres pracy wynosi od -28°C do 315°C [8].

Tab. 1. Skład masowy powietrza

Komponent	Udział masowy, %
Tlen	23.052
Azot	74.99
Dwutlenek węgla	0.046
Argon	1.276
Woda	0.636

Sprawność układów CAES można opisać różnymi wzorami. W niniejszym rozdziale przedstawiono cztery z nich [9–11]. Podstawową definicję sprawności opisano przy pomocy wzoru (16)

$$\eta_{CAES} = \frac{E_{elg}}{E_{elc} + Q_f}, \quad (16)$$

gdzie: E_{elc} – energia zużyta przez sprężarkę [kWh], E_{elg} – energia otrzymana na generatorze [kWh], Q_f – energia chemiczna paliwa [kWh].

Wzór (16) opisujący efektywność magazynowania ma pewne wady, ponieważ w tym wzorze sumuje się dwa różne rodzaje energii o różnej użyteczności. Zamiana energii chemicznej na energię elektryczną wiąże się z pewnymi stratami i nie należy ich traktować jednakowo. Aby uniknąć tego problemu, można zastosować wzór uwzględniający sprawność wytwarzania energii elektrycznej potrzebnej do sprężenia zmagazynowanego powietrza, tj.

$$\eta_{CAES II} = \frac{E_{elg}}{\frac{E_{elc}}{\eta_{elR} \cdot \eta_{tr}} + Q_f}, \quad (17)$$

gdzie: η_{elR} – sprawność elektrowni referencyjnej, η_{tr} – sprawność przesyłania energii elektrycznej.

Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest oszacowanie ilości energii chemicznej potrzebnej do wytworzenia energii elektrycznej zużywanej przez układ CAES. Problem sumowania energii o różnych jakościach można również rozwiązać stosując przedstawioną poniżej sprawność układu CAES:

$$\eta_{CAES III} = \frac{E_{elg} - E_{elc}}{Q_f}. \quad (18)$$

Równanie to traktuje system CAES jako źródło wytwarzające energię elektryczną za pomocą energii chemicznej. Definicja ta ocenia efektywność wykorzystania energii chemicznej w procesie produkcji energii elektrycznej netto. Co ciekawe, równanie (18) może mieć nawet wartość ujemną (jeśli $E_{elc} > E_{elg}$) lub nieskończoną (dla $Q_f = 0$).

Sprawność układu CAES można ocenić jeszcze w inny sposób. Można to osiągnąć dzięki sprawności magazynowania energii elektrycznej netto. Sprawność tę opisuje stosunek energii wytworzonej z gazu ziemnego do energii elektrycznej dostarczonej do systemu elektroenergetycznego:

$$\eta_{CAES IV} = \frac{1 - HR \cdot \eta_{gas}}{ER_{net}}, \quad (19)$$

gdzie: ER_{net} – wskaźnik energii netto [kWh/kWh], HR – jednostkowe zużycie ciepła dla turbiny gazowej [kWh/kWh], η_{gas} – sprawność generacji energii elektrycznej z energii chemicznej paliwa.

Jednostkowe zużycie ciepła dla turbiny gazowej oraz wskaźnik energii netto mogą być opisane w następujący sposób:

$$HR = \frac{Q_f}{E_{elg}} \quad (20)$$

$$ER_{net} = \frac{E_{elc}}{E_{elg}} \quad (21)$$

Pozostałe parametry wykorzystywane we wzorach z niniejszego podrozdziału mogą mieć następujące wartości: $\eta_{elR} = 42\%$; $\eta_{tr} = 90\%$; $\eta_{gas} = 36.9\%$ (dla $HR = 9743 \text{ kJ/kWh}$ [10]).

W ramach osiągnięcia przeprowadzono również analizę egzergetyczną (konwencjonalną i zaawansowaną) zamodelowanych układów CAES.

Konwencjonalna analiza egzergetyczna pozwala na zidentyfikowanie wielkości, lokalizacji, a także przyczyny nieefektywności termodynamicznej. Nie daje ona jednak możliwości zbadania interakcji pomiędzy poszczególnymi komponentami systemu. Równanie bilansu egzergii dla rozważanego systemu ma następującą postać [12]:

$$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{P,tot} + \dot{E}_{D,tot} + \dot{E}_{L,tot} = \dot{E}_{P,tot} + \sum_n \dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,tot}, \quad (22)$$

gdzie: $\dot{E}_{F,tot}$ – egzergia „paliwa” dla całego systemu, $\dot{E}_{P,tot}$ – egzergia produktu dla całego systemu, $\dot{E}_{D,tot}$ – całkowita destrukcja egzergii, $\dot{E}_{L,tot}$ – całkowita strata egzergii, $\dot{E}_{D,k}$ – destrukcja egzergii na k-tym elemencie.

Zastosowane we wzorze (22) pojęcia straty i destrukcji egzergii oznaczają odpowiednio egzergię traconą wraz z czynnikiem opuszczającym układ (gdy czynnik ten nie jest w stanie równowagi z otoczeniem) i egzergię rozpraszaną wewnątrz układu na skutek nieodwracalności procesów zachodzących w rozważanym układzie. Z kolei egzergia „paliwa” jest całkowitą egzergią dostarczoną do systemu.

Egzergię k-tego elementu opisano wzorem (23)

$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{D,k}, \quad (23)$$

gdzie: $\dot{E}_{P,k}$ – egzergia paliwa dla k-tego elementu.

Z kolei sprawność egzergetyczną systemu można zapisać jako

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\dot{E}_{P,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} = 1 - \sum_n y_k - \frac{\dot{E}_{L,tot}}{\dot{E}_{F,tot}}, \quad (24)$$

A sprawność egzergetyczną k-tego elementu układu jako

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}}. \quad (25)$$

Udział destrukcji egzergii k-tego elementu w całkowitym bilansie egzergii można przedstawić za pomocą poniższego wzoru:

$$y_{D,k} = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,tot}}. \quad (26)$$

Natomiast udział straty egzergii w całym systemie oblicza się ze wzoru

$$y_L = \frac{\dot{E}_{L,tot}}{\dot{E}_{F,tot}}. \quad (27)$$

Więcej na temat konwencjonalnej analizy egzergetycznej można znaleźć w [12].

Z kolei zaawansowana analiza egzergetyczna jest pomocna w trakcie oceny wzajemnych oddziaływań między komponentami rozważanego systemu, dzięki czemu daje możliwość przeanalizowania rzeczywistego potencjału poprawy komponentu systemu a także całego systemu.

Bilans egzergetyczny rozważanego systemu może być bardziej szczegółowy. Zgodnie z klasyfikacją zaproponowaną w [12,13] destrukcję egzergii na każdym komponentie systemu można podzielić na (i) endogeniczne/egzogeniczne oraz (ii) możliwe do uniknięcia/nieuniknione. Takie podejście nazywa się zaawansowaną analizą egzergetyczną.

Endogeniczne destrukcje egzergii komponentu można obliczyć, gdy wszystkie inne komponenty systemu są idealne, a rozpatrywany komponent ma swoją rzeczywistą sprawność. Oznacza to, że w celu policzenia endogenicznej destrukcji egzergii dla wszystkich elementów składowych układu konieczne jest zbudowanie tyłu modeli rozpatrywanego układu, ile elementów posiada ten układ. Egzogeniczne destrukcje egzergii oblicza się, odejmując endogenną destrukcję egzergii składnika od jego całkowitej destrukcji egzergii. Zatem, całkowitą destrukcję egzergii komponentu można opisać następująco:

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{EN} + \dot{E}_{D,k}^{EX}, \quad (28)$$

gdzie: $\dot{E}_{D,k}$ – destrukcja egzergii k-tego elementu, $\dot{E}_{D,k}^{EN}$ – endogeniczna destrukcja egzergii k-tego elementu, $\dot{E}_{D,k}^{EX}$ – egzogeniczna destrukcja egzergii k-tego elementu.

Jak wspomniano powyżej destrukcję egzergii komponentu można również podzielić na możliwe do uniknięcia i nieuniknione, tj.

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{UN} + \dot{E}_{D,k}^{AV} \quad (29)$$

Nieunikniona destrukcja egzergii jest częścią destrukcji egzergii, której nie można zmniejszyć z uwagi na ograniczenia technologiczne oraz ekonomiczne. A zatem jest to część destrukcji egzergii, która będzie generowana na komponencie gdy będzie on najlepszy w obecnie dostępnej technologii. Możliwą do uniknięcia destrukcję egzergii komponentu oblicza się poprzez odjęcie nieuniknionej destrukcji egzergii od całkowitej destrukcji egzergii komponentu.

Jeżeli połączymy obydwa powyżej opisane podziały destrukcji egzergii dla k-tego elementu można wyznaczyć: możliwą do uniknięcia, endogeniczną destrukcję egzergii ($\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$) oraz możliwą do uniknięcia, egzogeniczną destrukcję egzergii ($\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$).

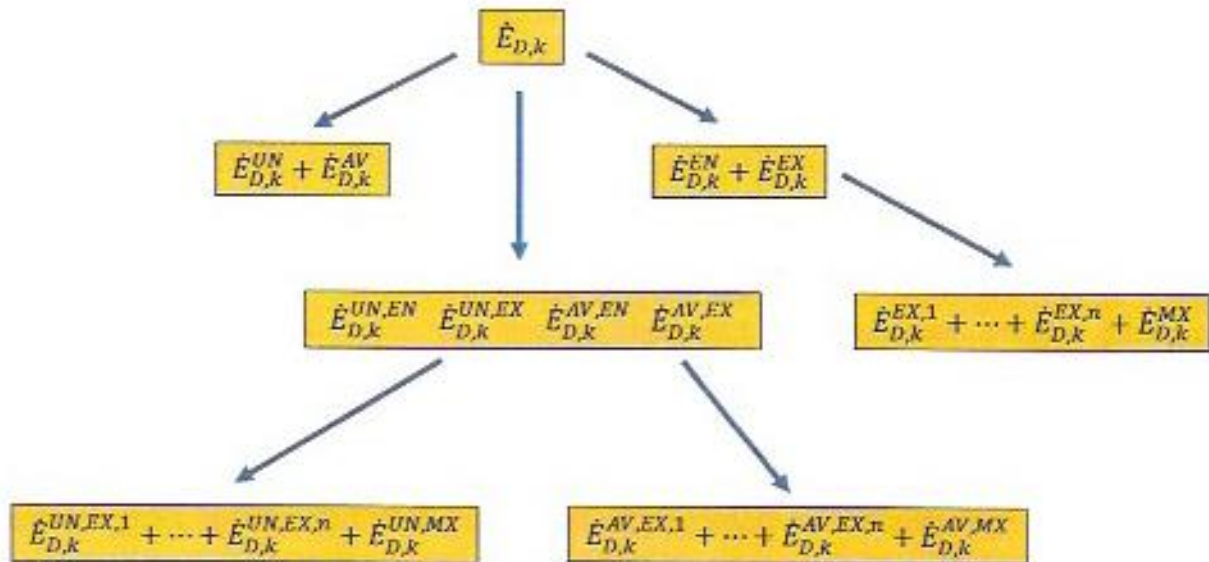
Możliwa do uniknięcia, endogeniczna destrukcja egzergii jest to część destrukcji egzergii, którą można wyeliminować poprzez zastosowanie najlepszej dostępnej technologii dla k-tego elementu. Możliwa do uniknięcia, egzogeniczna destrukcja egzergii jest to część destrukcji egzergii, którą można wyeliminować poprzez poprawę pozostałych elementów systemu (innych niż k-ty element) lub poprzez zmianę struktury całego systemu.

Z kolei egzogeniczna destrukcja egzergii w k-tym elemencie systemu można podzielić na części pochodzące z pozostałych, r-tych ($r \neq k$) elementów systemu ($\dot{E}_{D,k}^{EX,r}$). Części te oznaczają destrukcję egzergii w k-tym elemencie będącą skutkiem nieodwracalności procesów w r-tym elemencie systemu. Co ciekawe, suma $\dot{E}_{D,k}^{EX,r}$ nie jest równa egzogenicznej destrukcji egzergii w k-tym elemencie systemu ($\dot{E}_{D,k}^{EX}$), co jest spowodowane występowaniem interakcji pomiędzy pozostałymi (r-tych) elementami systemu. Różnica pomiędzy sumą $\dot{E}_{D,k}^{EX,r}$ a $\dot{E}_{D,k}^{EX}$ nazywana jest megzogeniczną destrukcją egzergii ($\dot{E}_{D,k}^{maxo}$) [14]:

$$\dot{E}_{D,k}^{maxo} = \dot{E}_{D,k}^{EX} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^{n-1} \dot{E}_{D,k}^{EX,r} \quad (30)$$

gdzie: n – całkowita liczba komponentów rozważanego systemu.

Egzogeniczną destrukcję egzergii ($\dot{E}_{D,k}^{EX}$) k-tego elementu można podzielić również na nieuniknioną, egzogeniczną destrukcję egzergii ($\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$) i na możliwą do uniknięcia, egzogeniczną destrukcję egzergii ($\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$). Możliwości podziału destrukcji egzergii w k-tym elemencie systemu pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. Możliwości podziału destrukcji egzergii w k -tym elemencie systemu (opracowanie własne)

Możliwe jest również zsumowanie składników możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii dla k -tego elementu:

$$\dot{E}_{D,k}^{AV,\Sigma} = \dot{E}_{D,k}^{AV,EN} + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^n \dot{E}_{D,r}^{AV,EX,k}, \quad (31)$$

gdzie: $\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^n \dot{E}_{D,r}^{AV,EX,k}$ – suma możliwych do uniknięcia, egzogenicznych destrukcji egzergii r -tych elementów rozważanego układu.

5.3.3 Syntetyczny opis otrzymanych wyników

W monografii przedstawiono wyniki modelowania matematycznego następujących układów CAES:

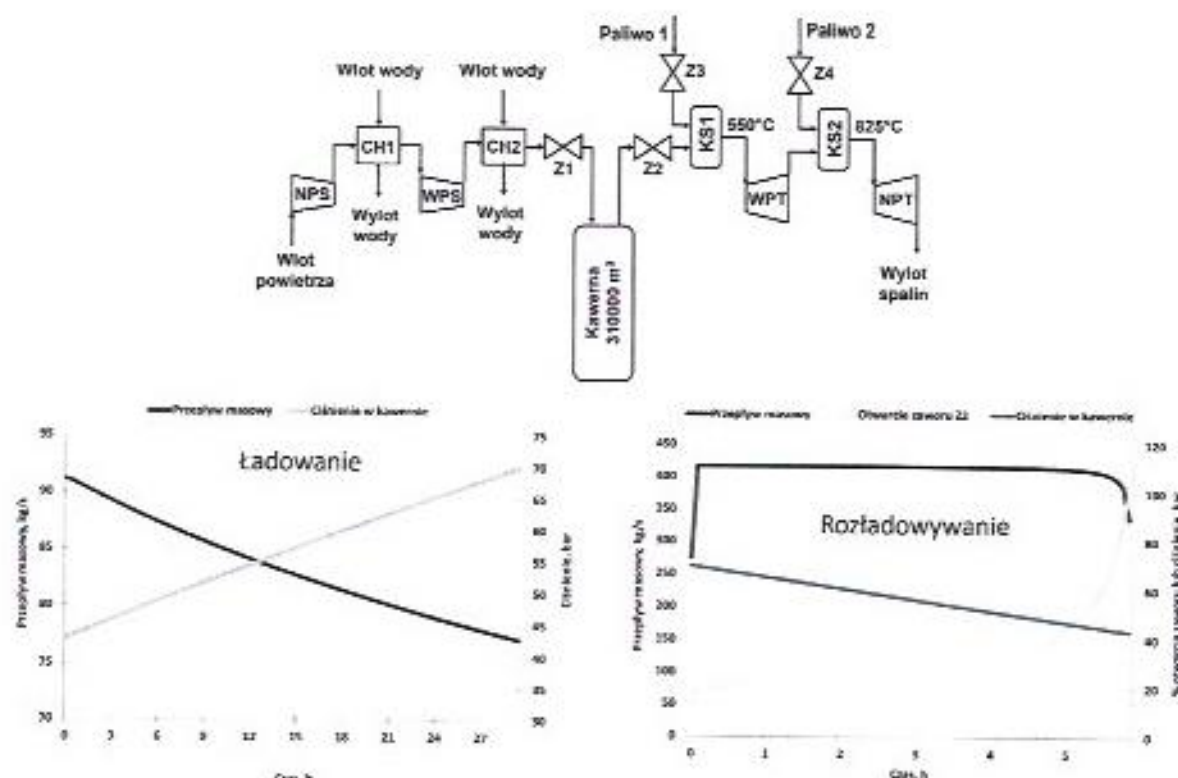
- układy o stałej objętości magazynowania
 - diabatyyczny CAES
 - adiabatyczny CAES
 - układ do zastosowań mobilnych (w 4 wariantach)
- układy o stałym ciśnieniu magazynowania
 - podwodny układ CAES (UWCAES)
 - diabatyyczny bez rekuperacji
 - diabatyyczny z rekuperacją
 - adiabatyczny

Diabatyyczny układ CAES o stałej objętości

Na Rys. 2 przedstawiono schemat zamodelowanego, diabatycznego układu CAES o stałej objętości oraz przebieg zmian jego niektórych parametrów w trakcie procesu ładowania i rozładowywania układu.

Sprawności politropowe maszyn wirnikowych (turbiny i sprężarek) wchodzących w skład modelowanego układu przyjęto na poziomie 75%. Objętość kawerny w modelu matematycznym wynosiła 310 000 m³ a ciśnienie w niej panujące w trakcie warunków normalnej pracy wynosiło od 43 do 70 bar. Temperatura powietrza za chłodnicami sprężarki wynosi 50°C a spadki ciśnienia na tych wymiennikach ciepła (po stronie powietrza) w warunkach znamionowych wynoszą odpowiednio 0,1 i 0,5 bar (w trakcie zmiany przepływu podczas ładowania te spadki ciśnienia również ulegają zmianie) dla pierwszej i drugiej chłodnicy. Temperatura i ciśnienie wody chłodzącej na wlocie do tych wymienników ciepła wynoszą 15°C i 2 bary a na wylocie osiągają wartości równe 75°C i 1,9 bara. Sprężarka została podzielona na dwie części pobierające w trakcie ładowania układu CAES po 30 MW każda. Temperatury spalin za pierwszą i drugą komorą spalania (za wysokociśnieniową i niskociśnieniową komorą spalania) wynoszą odpowiednio 550°C i 825°C. Ciśnienie za wysokoprężną częścią turbiny (WPT) przyjęto na poziomie 22 bar. W trakcie rozładowywania przepływ masowy powietrza z kawerny jest kontrolowany przy pomocy zaworu Z2 w celu utrzymania go na stałym poziomie równym 416 kg/s.

Poza wyjątkiem sprawności maszyn wirnikowych, parametry opisanego powyżej układu są takie same jak w przypadku elektrowni Huntorf.



Rys. 2. Schemat zamodelowanego, adiabatycznego układu CAES o stałej objętości oraz przebieg zmian jego niektórych parametrów w trakcie procesu ładowania i rozładowywania układu

W trakcie ładowania i rozładowywania stałoobjętościowego układu CAES mamy do czynienia z procesami zmiennymi w czasie. Oznacza to, że warunki pracy maszyn wirnikowych (zwłaszcza w części sprężarkowej) również ulegają zmianie w zależności od ciśnienia panującego w kawernie, które jest zależne od jej stopnia napełnienia sprężonym powietrzem. Przebieg zmian ciśnienia wewnątrz kawerny oraz strumień masowy wtłaczanego do niej powietrza w trakcie ładowania układu CAES pokazano na Rys. 2.

Aby utrzymać stały przepływ masowy powietrza w trakcie rozładowywania układu CAES stopień otwarcia zaworu Z2 jest sukcesywnie zwiększany – co zostało pokazane na Rys. 2. Zmiany ciśnienia w kawernie w trakcie rozładowywania układu również przedstawiono na Rys. 2.

W trakcie ładowania układu nieliniowość tego procesu można zauważyć na przykładzie przebiegu zmian przepływu masowego (Rys. 2). W przypadku przebiegu zmian ciśnienia (w trakcie ładowania i rozładowywania) nieliniowość byłaby widoczna przy niższych jego wartościach. W związku z tym, że kawerna pracuje z zakresie ciśnień 43-70 bar nie jest to zauważalne.

Jak już wspomniano powyżej, podczas procesu opróżniania kawerny przepływ masowy sprężonego powietrza jest utrzymywany na stałym poziomie poprzez zmianę stopnia otwarcia

zaworu Z2. Jak widać na Rys. 2 krzywa pokazująca stopień otwarcia zaworu jest mocno nieliniowa.

Adiabatyczny układ CAES o stałej objętości

Z kolei na Rys. 3 pokazano schemat zamodelowanego, adiabatycznego układu CAES o stałej objętości oraz przebieg zmian jego niektórych parametrów w trakcie procesu ładowania i rozładowywania układu.

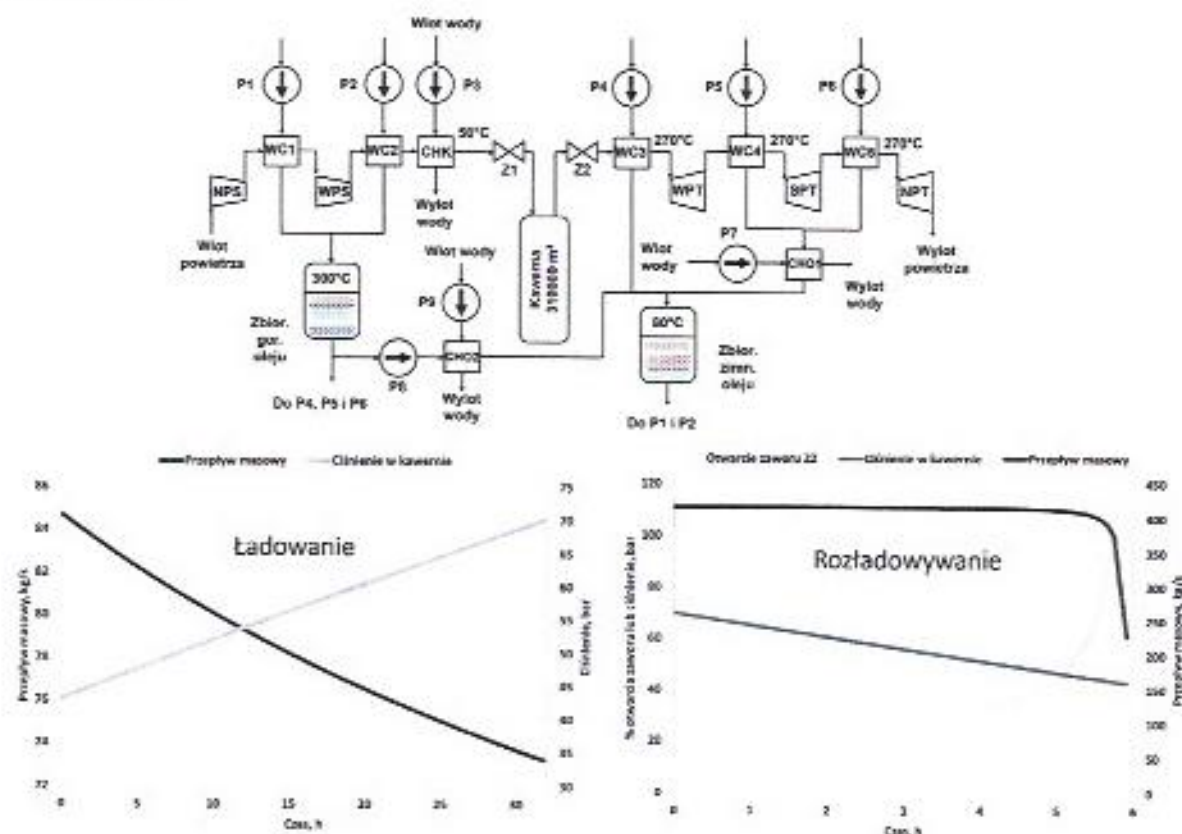
Do obliczeń przyjęto, że sprawność politropowa turbin i sprężarek wynosi 75%. Ciśnienie robocze kawerny zmieniało się w zakresie od 43 do 70 bar a jej objętość była równa 310000 m³. Z uwagi na ograniczenia materiałowe temperatura powietrza przed kawerną została zredukowana do 50°C. W nominalnych warunkach pracy spadki ciśnienia na wymiennikach ciepła WC1, WC2, CHK, WC3, WC4 i WC5 wynosiły odpowiednio 0,1, 0,25, 0,25, 0,1, 0,1 i 0,1 bar. Spadki te były uzależnione od przepływu czynnika przez wymienniki (zmniejszenie przepływu skutkowało zmniejszeniem spadków ciśnienia).

Zmiana przepływu przez te wymienniki skutkowałą zmianą spadków ciśnienia. Woda zasilająca chłodnice CHK, CHO1 i CHO2 miała temperaturę 15°C i ciśnienie 2 bary (za pompami P3, P7 i P9). Na wylocie z chłodnic woda miała temperaturę 75°C i ciśnienie 1 bar. Spadek ciśnienia oleju na każdym wymienniku wynosił 1 bar (również na chłodnicach oleju CHO1 i CHO2). Każdy z wymienników ciepła (WC1, WC2, CHK, WC3, WC4, WC5, CHO1 i CHO2) jest obliczeniowo podzielony na 10 interwałów. Dla każdego interwału muszą być spełnione równania (4) i (5). Temperatura w zbiorniku gorącego oleju wynosiła 300°C, a pompy P1 i P2 sterowano tak, aby uzyskać stałą temperaturę oleju za wymiennikami WC1 i WC2 (aby uniknąć destrukcji egzergii na skutek mieszania się strumieni o różnej temperaturze). Objętość zbiornika gorącego oleju wynosiła 15 627,9 m³.

Temperatura w zbiorniku zimnego oleju wynosiła 80°C, a jego objętość – 12 685,6 m³.

Zadaniem chłodnic oleju CHO1 i CHO2 było odprowadzenie ciepła, które nie mogło zostać zużyte podczas rozładowywania A-CAES (główną przyczyną tego było dławienie na zaworze Z2, przez co spadek entalpii na turbinach był mniejszy). Straty ciepła poprzez ścianki zbiornika gorącego oleju zostały pominięte, ponieważ znacznie więcej ciepła (niż mogłoby potencjalnie zostać utracone przez ścianę zbiornika) zostało niewykorzystane podczas rozładowywania układu A-CAES. Sprężarka została podzielona na 2 części. NPS podczas ładowania potrzebowała 33 MW, a WPS – 27 MW mocy. Moc poszczególnych części sprężarki zostały dobrane tak, aby temperatura powietrza po obu częściach była podobna. Turbinę podzielono na 3 części. Moc znamionowa WPT, SPT i NPT wynosiła odpowiednio: 46,5 MW, 52 MW i

62,5 MW. Ciśnienie po każdej części turbiny było dobierane tak, aby zmaksymalizować moc całej turbiny. Temperatura powietrza przed każdą częścią turbiny wynosiła 270°C. Zawór Z2 był sterowany aby utrzymać stały przepływ masowy (417 kg/s) podczas rozładowywania układu A-CAES.

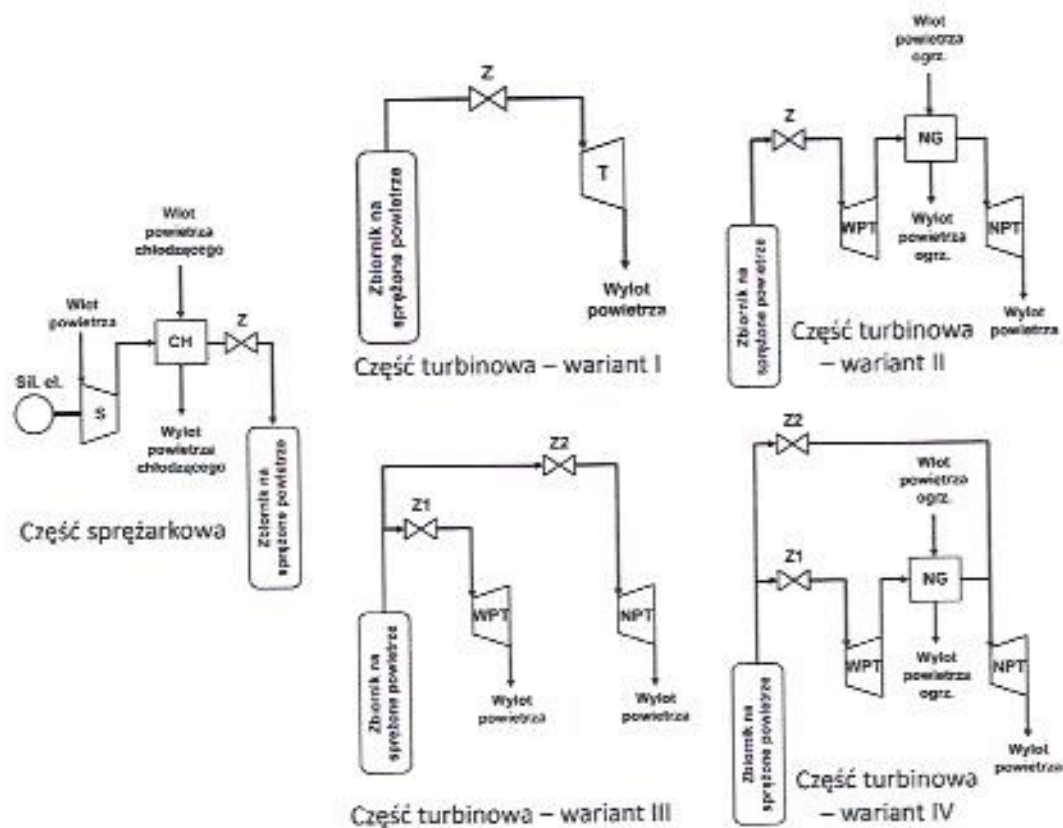


Rys. 3. Schemat zamodelowanego, adiabatycznego układu CAES o stałej objętości oraz przebieg zmian jego niektórych parametrów w trakcie procesu ładowania i rozładowywania układu

Z uwagi na taką samą objętość kawerny oraz zbliżone przepływy powietrza w trakcie ładowania (oraz taką samą temperaturę za ostatnią chłodnicą w trakcie ładowania) i rozładowywania wykresy pokazujące zmiany parametrów wewnątrz kawerny (Rys. 3) są bardzo podobne jak w przypadku układu diabatyicznego (Rys. 2). Różnicę można zauważyć w przypadku czasu ładowania, który w przypadku zamodelowanego układu adiabatycznego jest nieco dłuższy niż w przypadku układu diabatyicznego.

Układ CAES (o stałej objętości) do zastosowań mobilnych

Na Rys. 4 pokazano schematy układów CAES do zastosowań mobilnych w 4 wariantach.



Rys. 4. Schemat układu CAES do zastosowań mobilnych w 4 wariantach

Budowę części turbinowej układu CAES do zastosowań mobilnych zaproponowano w następujących wariantach:

Wariant I. Układ prosty z jedną turbiną pracującą przy stałym ciśnieniu.

Wariant II. Układ z dwiema turbinami (pracującymi przy stałych ciśnieniach) połączonymi szeregowo i nagrzewnicą powietrzną pomiędzy nimi.

Wariant III. Układ z dwiema turbinami połączonymi równolegle. Pierwsza pracująca przy ciśnieniu w zbiorniku od 350 do 100 bar (turbina wysokoprężna pracująca przy stałym ciśnieniu 99 bar) a druga od 100 bar do 20 bar (turbina niskoprężna pracująca przy stałym ciśnieniu 19 bar).

Wariant IV. Układ jak w przypadku wariantu II z dodatkowym bajpasem turbiny wysokoprężnej i nagrzewnicą, włączanym pod koniec procesu rozprężania ($\Delta p_{WPT}=92$ bar, $\Delta p_{NPT}=7$ bar).

Główne założenia modelu matematycznego układu CAES do zastosowań mobilnych przedstawiono w Tab. 2.

Tab. 2 Główne założenia modelu matematycznego układu CAES do zastosowań mobilnych

Parametr	Wartość
Temperatura otoczenia, °C	15
Ciśnienie otoczenia, bar	1
Czynnik roboczy	Powietrze
Model czynnika roboczego	Peng-Robinson

Objętość zbiornika na sprężone powietrze [15], litry	200
Ciśnienie przy pełnym naładowaniu, bar	350
Temperatura początkowa, °C	99
Sprawność sprężarki powietrza, %	80
Sprawność turbin, %	80
Moc silnika elektrycznego, kW	5.5
Sprawność silnika elektrycznego [16], %	85
Spadek ciśnienia na wymiennikach ciepła, bar	0.5
Temperatura na wylocie z nagrzewnicy, °C	0

Układy CAES o stałym ciśnieniu magazynowania

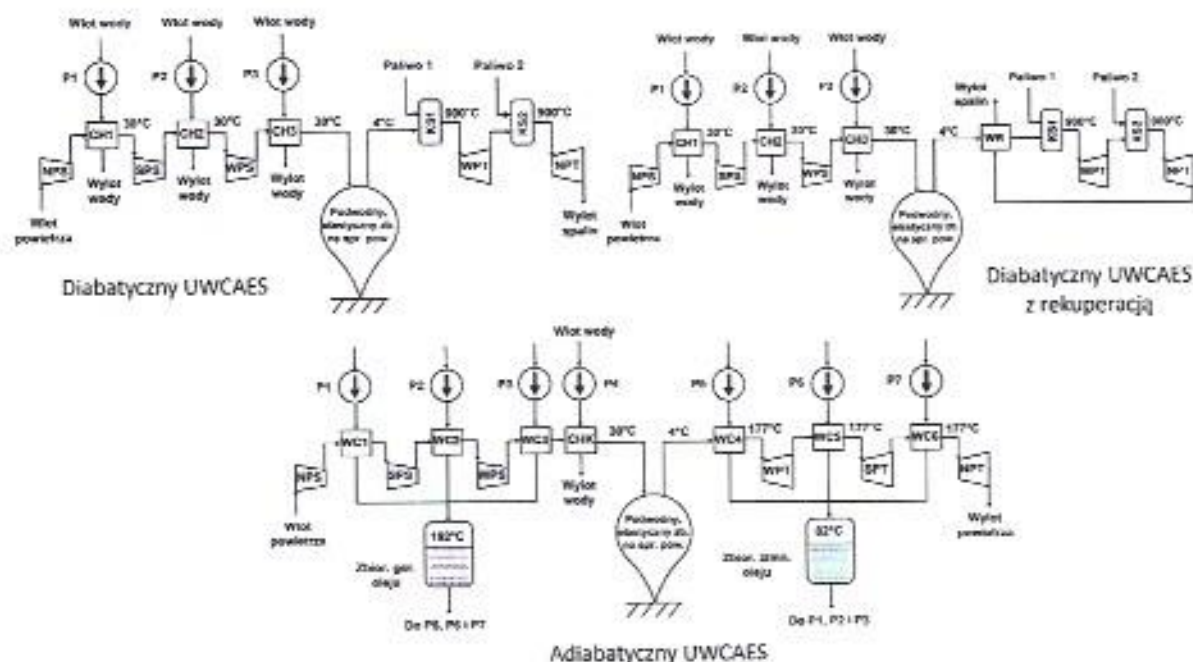
W przedstawionej jako pierwsze osiągnięcie monografii układy stałociśnieniowe pokazano na przykładzie podwodnych układów CAES (diabatyicznego, diabatyicznego z rekuperacją oraz adiabatycznego).

Schematy zamodelowanych układów UWCAES pokazano na Rys. 5.

W przypadku podwodnego układu do magazynowania energii przy użyciu sprężonego powietrza (UWCAES) przyjęto, że stosunek czasu ładowania do czasu rozładowania wynosi 2 (czas ładowania – osiem godzin; czas rozładowania – cztery godziny). Przyjęto, że w trakcie ładowania układów przepływ powietrza zasysany przez sprężarkę jest równy 100 kg/s. W związku z tym, moce sprężarki i turbiny zostały obliczone a nie założone. Założono, że sprawności sprężarek, turbin i pomp wynoszą odpowiednio 75%, 80% i 75%. Spadki ciśnień na wymiennikach ciepła założono jako równe 0,1 bara po stronie powietrza i 0,5 bara po stronie cieczy (woda lub olej termalny).

Dla diabatyicznego układu UWCAES z rekuperacją założony stopień regeneracji dla wymiennika WR wynosił 80%, a spadki ciśnienia po stronie niskiego i wysokiego ciśnienia wynosiły odpowiednio 0,04 bar i 0,1 bar.

Dla wszystkich układów UWCAES wybrano stosunkowo niskie ciśnienie magazynowania sprężonego powietrza (15 bar), co było spowodowane założoną głębokością położenia pod powierzchnią wody elastycznego zbiornika na sprężone powietrze wynoszącą 150 m. Głębokość ta jest możliwa do uzyskania w zbiorniku wodnym, który może powstać po planowanym zalaniu wyrobiska za Elektrownią Bełchatów. Zgodnie z planami spółki PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna maksymalna głębokość jeziora, które powstanie na terenie kopalni Bełchatów po zakończeniu jej pracy wyniesie 170 m, dlatego będzie to najgłębsze jezioro w Polsce.



Rys. 5. Schematy podwodnych układów CAES

W przypadku diabatyycznego układu UWCAES obliczona moc poszczególnych części sprężarki wynosiła: 13,631 MW dla NPS, 12,126 MW dla SPS oraz 12,079 MW dla WPS. Z kolei moc wysokoprężnej oraz niskoprężnej części turbiny była równa odpowiednio 64,792 MW i 65,600 MW.

W przypadku diabatyycznego układu UWCAES z rekuperacją obliczona moc poszczególnych części sprężarki wynosiła dokładnie tyle samo co w przypadku układu bez regeneracji: 13,631 MW dla NPS, 12,126 MW dla SPS oraz 12,079 MW dla WPS. Z kolei moc wysokoprężnej oraz niskoprężnej części turbiny uległa zmniejszeniu (z powodu spadku ciśnienia na WR) do 63,160 MW i 62,339 MW.

Natomiast dla adiabatyycznego układu UWCAES obliczona moc poszczególnych części sprężarki wynosiła: 19,664 MW dla NPS, 11,386 MW dla SPS oraz 11,395 MW dla WPS. Z kolei moc wysokoprężnej, średnioprężnej oraz niskoprężnej części turbiny była równa odpowiednio 16,170 MW, 16,158 MW i 15,160 MW.

Przy takim samym przepływie powietrza do sprężarki w trakcie ładowania jak dla poprzednich dwóch układów (100 kg/s) moc części turbinowej układu adiabatyycznego jest ponad 2,5 razy mniejsza w porównaniu do układów diabatyycznych.

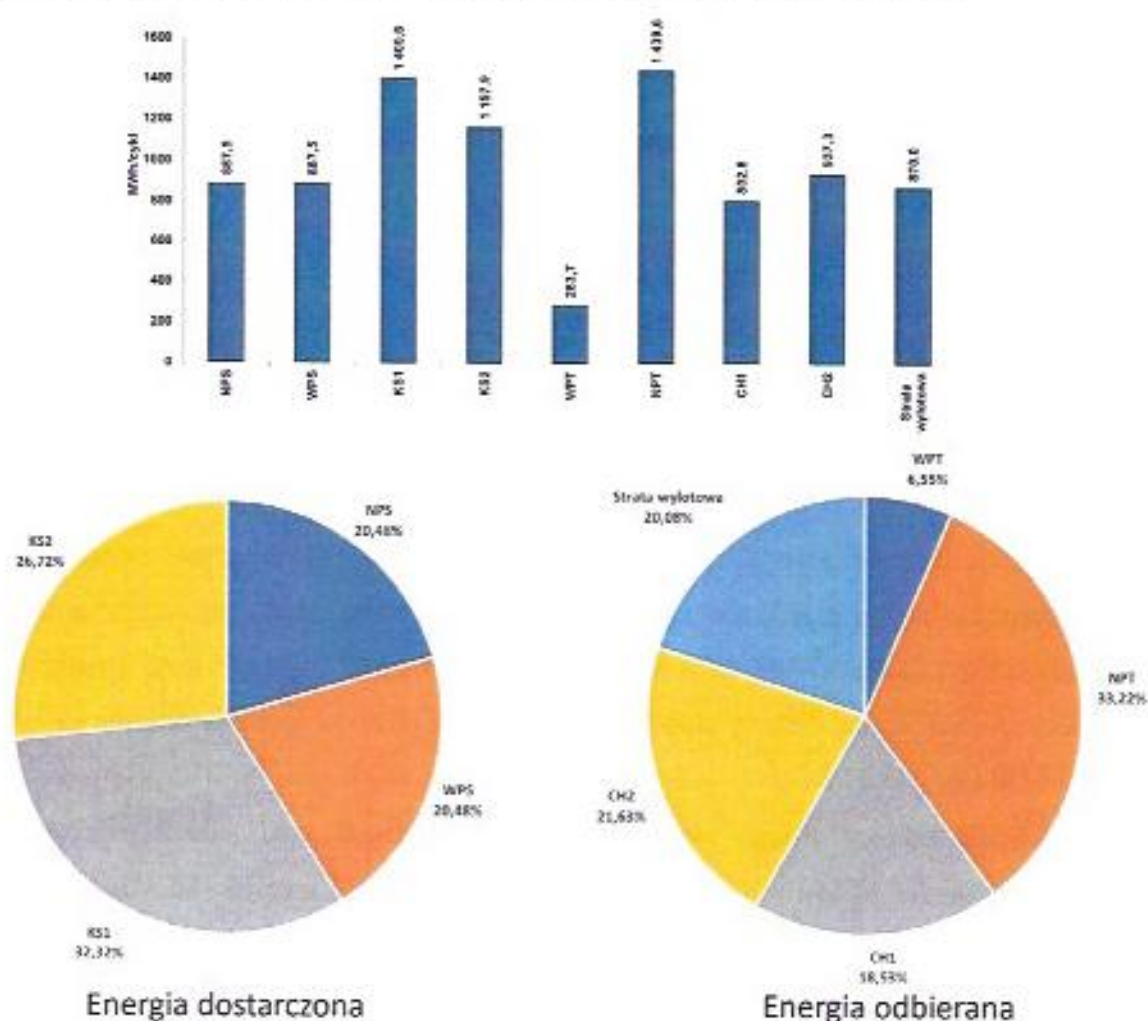
Analiza energetyczna

Diabatyyczny układ CAES o stałej objętości

Moc potrzebna do napędu sprężarek analizowanego układu CAES wynosi 60 MW a zużycie energii podczas cyklu ładowania jest równe 1775 MWh.

Moc generowana w trakcie cyklu rozładowywania układu do magazynowania energii osiąga 290 MW i jest otrzymywana w sposób ciągły. Z kolei energia otrzymywana w takich warunkach wynosi 1723 MWh. Otrzymana w wyniku obliczeń całkowita sprawność magazynowania energii (z uwzględnieniem energii chemicznej paliwa dodawanego do komór spalania) jest równa 39,8%.

Bilans energetyczny dla zamodelowanego układu d-CAES pokazano na Rys. 6.



Rys. 6. Bilans energetyczny dla stałobjętościowego, diabatycznego układu CAES

Najwięcej energii (1439,6 MWh/cykl) odebrano od niskoprężnej części turbiny, natomiast z punktu widzenia energii dostarczonej dominującą rolę odgrywa pierwsza komora spalania (1400,6 MWh/cykl).

W ujęciu procentowym można zauważyć, że komory spalania sumarycznie odpowiadają za około 59% energii dostarczonej do układu. Można stąd wyciągnąć wniosek, że diabatyczny układ CAES jest dobrym rozwiązaniem z punktu widzenia pokrywania zapotrzebowania

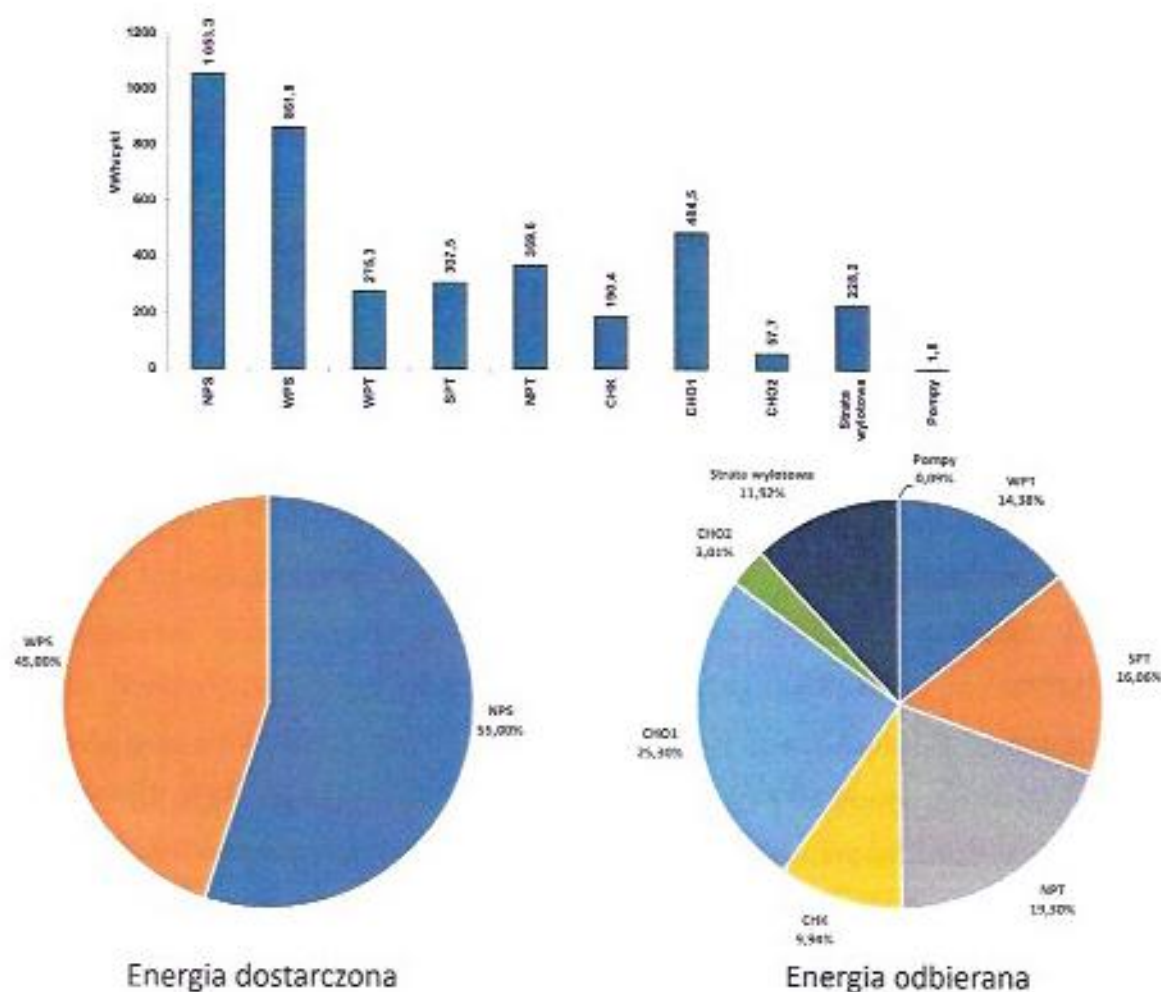
na dodatkową moc w systemie elektroenergetycznym, natomiast słabiej sprawdza się w roli magazynu nadmiarowej energii elektrycznej z tego systemu.

Z punktu widzenia strat największy udział przypada na stratę chłodzenia (sumarycznie około 40%). Z kolei strata wylotowa stanowi 20,08% energii opuszczającej układ. Sumaryczna energia mechaniczna odbierana z układu stanowi około 39,8% całkowitej energii układu (co jest równoznaczne ze sprawnością magazynowania energii).

Adiabatyczny układ CAES o stałej objętości

Bilans energetyczny adiabatycznego układu CAES (A-CAES) pokazano na Rys. 7. Energia potrzebna do napędu pomp jest o rzędy wielkości niższa niż energia potrzebna do napędu sprężarek lub energia otrzymywana z turbin. Sumaryczna energia zużywana przez pompy wynosi zaledwie 1,811 MWh/cykl. Z kolei zużycie energii przez sprężarki wynosi 1915 MWh/cykl. Całkowita produkcja energii mechanicznej przez część turbinową modelowanego układu A-CAES jest równa 952,373 MWh/cykl. Chwilowa moc potrzebna do napędu sprężarek wynosi 60 MW a moc otrzymywana z turbin to 161 MW. Dla porównania można powiedzieć, że przy takim samym strumieniu masowym powietrza układ z komorami spalania (diabatyczny) generowałby 290 MW (przy założeniu takich samych temperatur za komorami spalania jak w elektrowni Huntorf).

Całkowita sprawność magazynowania energii mechanicznej dla modelowanego układu osiągała 50%. Oznacza to, że wykorzystanie ciepła powstałego w procesie sprężania powietrza (w celu jego zmagazynowania) do ogrzania tego samego powietrza w trakcie jego rozprężania (podczas opróżniania magazynu) może znacząco podnieść sprawność układu CAES, ale jednocześnie prowadzi do zmniejszenia jego mocy.



Rys. 7. Bilans energetyczny dla stałoobjętościowego, adiabatycznego układu CAES

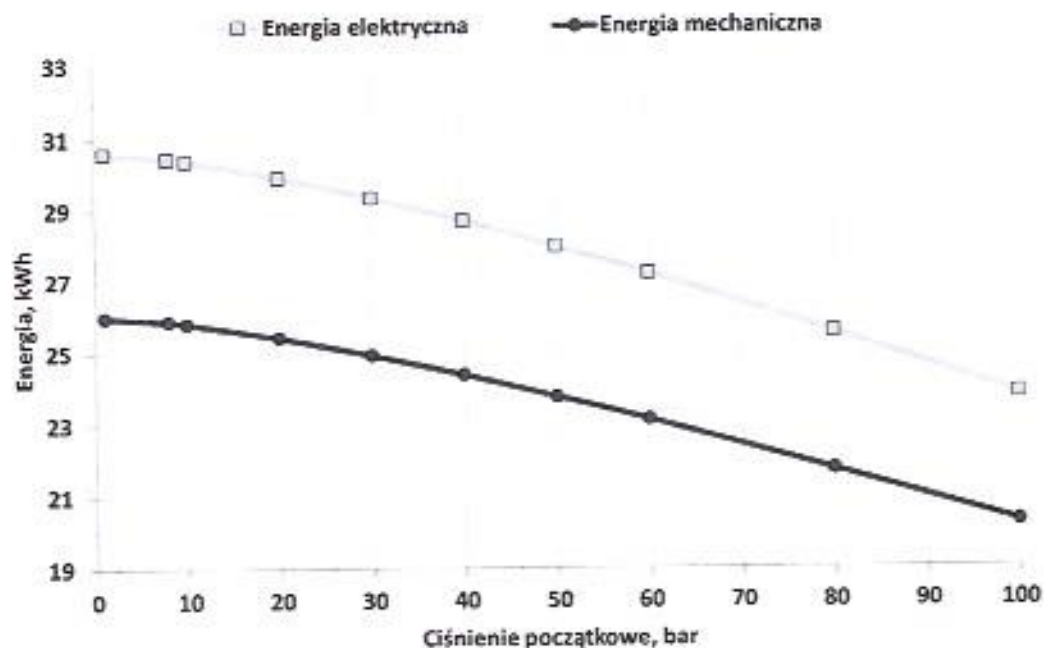
W przypadku układu adiabatycznego energia została dostarczona wyłącznie do sprężarki. Większy udział procentowy przypada tutaj na jej niskoprężną część (55%). Podział ten dobierany był tak, aby zmaksymalizować sprawność magazynowania.

Procentowe straty energii układu A-CAES można uszeregować w następujący sposób: chłodnice oleju (sumarycznie około 28,3%), strata wylotowa (11,92%), chłodnica końcowa (9,94%) oraz pomijalne z punktu widzenia całości bilansu zużycie energii przez pompy. Udział procentowy energii mechanicznej odbieranej od turbin wynosi sumarycznie około 50% całości energii (i jest równoznaczny ze sprawnością magazynowania).

Dużo niższa strata wylotowa układu adiabatycznego (w porównaniu do układu diabatyicznego) przekłada się na znacznie lepsze wykorzystanie energii, a tym samym większą sprawność.

Układ CAES (o stałej objętości) do zastosowań mobilnych

Zużycie energii w trakcie napełnienia 200-litrowego zbiornika sprężonym powietrzem do 350 bar wynosiło od 23,83 kWh (dla ciśnienia początkowego $p_p=100$ bar) do 30,59 kWh (dla ciśnienia na początku procesu $p_p=1,1$ bar), co zostało pokazane na Rys. 8.

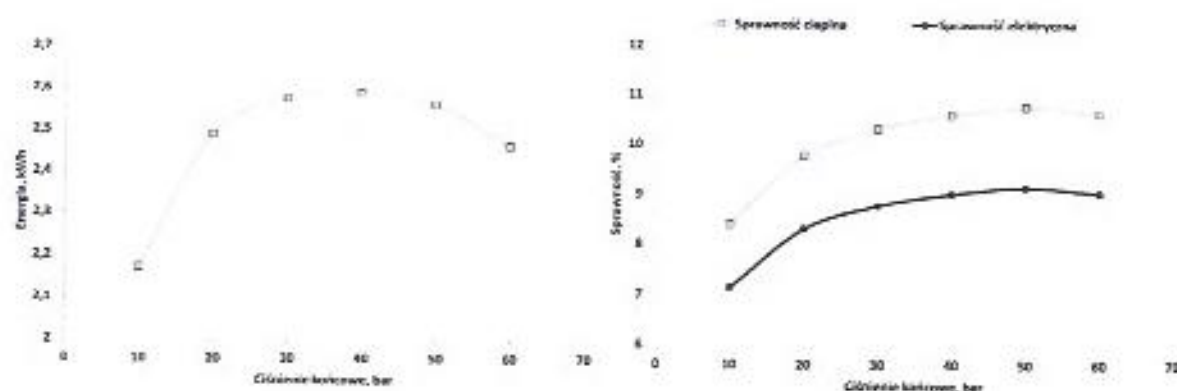


Rys. 8. Zużycie energii w trakcie napełniania sprężonym (i schłodzonym do 99°C) powietrzem 200-litrowego zbiornika do 350 bar

Podczas procesu sprężania zorganizowanego w ten sposób zużycie energii jest największe z możliwych z uwagi na to, że chłodzenie odbywa się dopiero po sprężaniu. W celu zmniejszenia zużycia energii należałoby rozbić proces sprężania na kilka stopni z chłodzeniem po każdym z nich.

Część turbinowa – wariant I

Wpływ ciśnienia końcowego ($\Delta p_T + 1$ bar) na energię otrzymaną w wyniku rozładowywania oraz na sprawność układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu I (temperatura początkowa $t_p = 99^\circ\text{C}$) zostały pokazane na Rys. 9.



Rys. 9. Wpływ ciśnienia końcowego ($\Delta p_i = 1$ bar) na energię otrzymaną w wyniku rozładowywania oraz na sprawność układu CAES dla zastosowań mobilnych dla wariantu I (temperatura początkowa $t_p = 99^\circ\text{C}$)

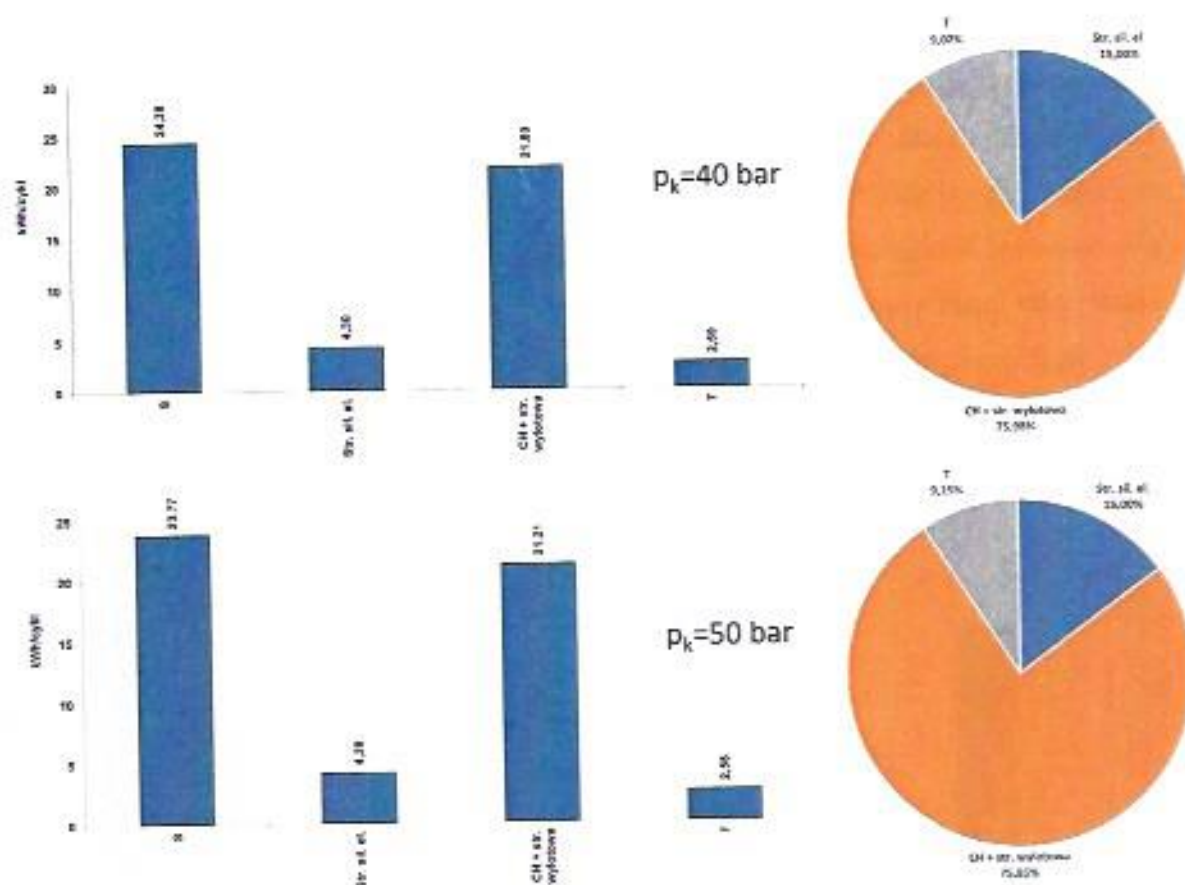
Na wykresie tym widoczne jest maksimum energii możliwej do uzyskania. Dzieje się tak dlatego, że przy większych spadkach ciśnienia można uzyskać większe spadki entalpii, ale jednocześnie więcej niewykorzystanego powietrza zostaje w zbiorniku.

Sprawność procesu wzrasta wraz z ciśnieniem końcowym, pomimo spadku ilości uzyskanej energii powyżej $\Delta p_T = 39$ bar. Jest to wynikiem zmniejszenia zużycia energii do sprężania powietrza z uwagi na wyższe ciśnienia początkowe dla procesu ładowania. Maksimum uzyskanych w obliczeniach sprawności cieplnej i sprawności elektrycznej wyniosło odpowiednio 10,77% i 9,15% (dla $p_k = 50$ bar).

Dla scenariuszy z ciśnieniami końcowymi dającymi najdłuższy zasięg ($p_k = 40$ bar) i największą sprawność ($p_k = 50$ bar) sporządzono szczegółowe bilanse energetyczne – patrz Rys. 10.

Na wykresie dla $p_k = 40$ bar tym można zauważyć, że największą stratę stanowi suma chłodzenia i straty wylotowej, odpowiada ona za prawie 22 kWh/cykl. Strata energii na silniku elektrycznym wynosi 4,3 kWh/cykl i jest większa niż energia użyteczna na wale turbiny (2,59 kWh/cykl). Udział chłodzenia i straty wylotowej w bilansie energetycznym stanowi prawie 76%.

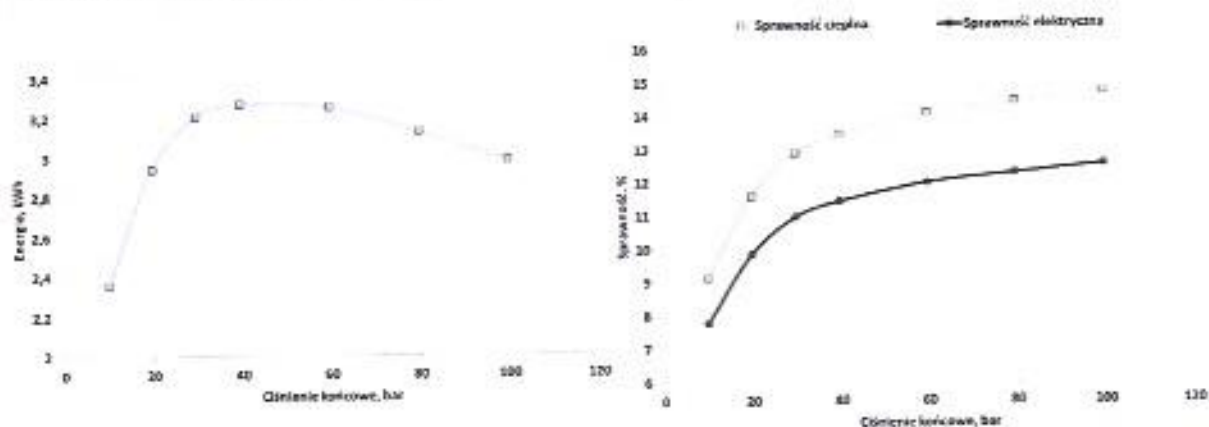
Dla $p_k = 50$ bar chłodzenie oraz strata wylotowa odpowiadają za nieco ponad 21 kWh/cykl strat energii i są nieznacznie mniejsze niż dla poprzedniego ciśnienia końcowego. Strata na silniku elektrycznym również jest nieco mniejsza i wynosi 4,2 kWh/cykl. Straty te są mniejsze, ponieważ dla tego scenariusza sprężanie odbywa się od nieco wyższego ciśnienia początkowego (będącego jednocześnie ciśnieniem końcowym dla procesu rozładowywania). Podobnie jak dla poprzedniego ciśnienia końcowego udział chłodzenia oraz straty wylotowej w bilansie energetycznym stanowi tutaj prawie 76%.



Rys. 10. Bilans energetyczny dla mobilnego układu CAES w wariancie I dla ciśnienia końcowego równego 40 i 50 bar

Część turbinowa – wariant II

Wpływ ciśnienia końcowego ($\Delta p_{WPT} + \Delta p_{NPT} + 1$ bar) na energię otrzymaną w wyniku rozładowywania oraz na sprawność układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu II (temperatura początkowa $t_p = 99^\circ\text{C}$) przedstawiono na Rys. 11.

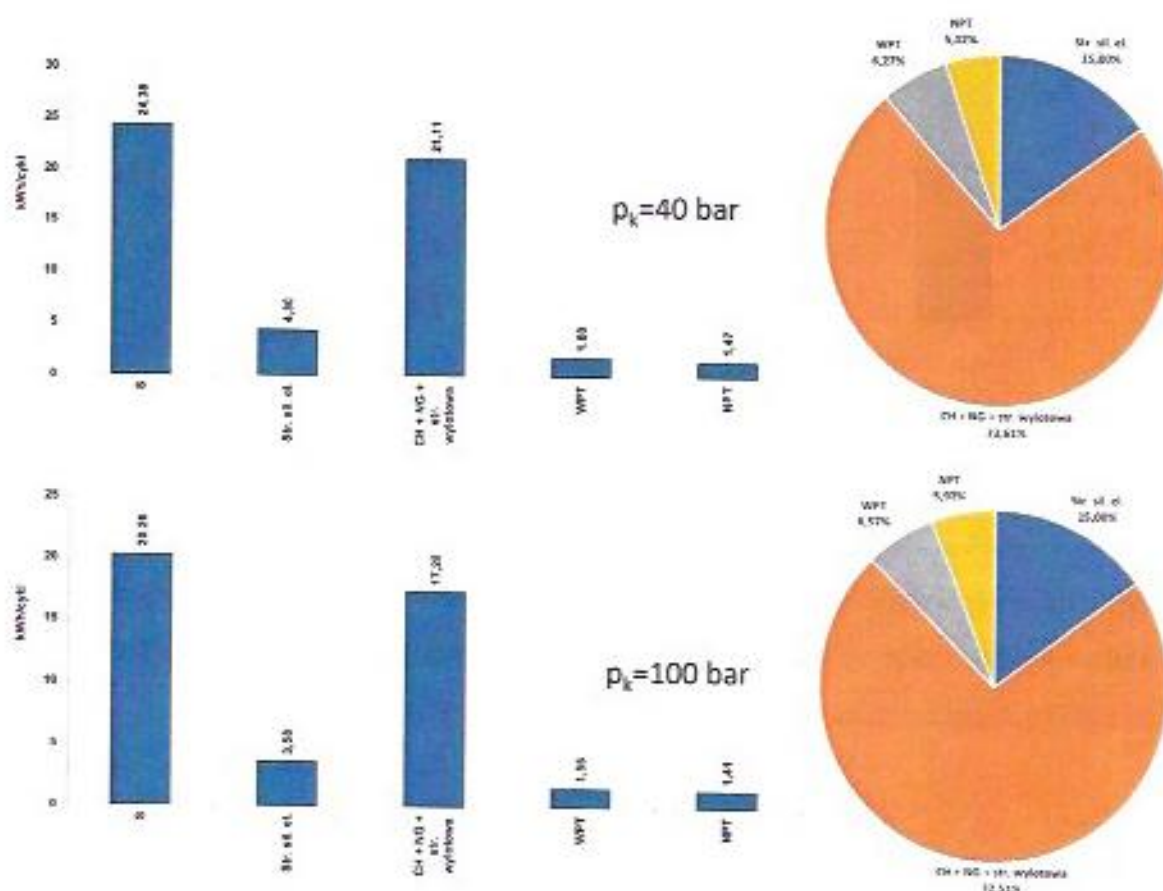


Rys. 11. Wpływ ciśnienia końcowego ($\Delta p_{WPT} + \Delta p_{NPT} + 1$ bar) na energię otrzymaną w wyniku rozładowywania oraz na sprawność układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu II (temperatura początkowa $t_p = 99^\circ\text{C}$)

Podobnie jak dla wariantu I, sprawność procesu rozładowywania w układzie z dwiema turbinami i nagrzewnicą powietrzną (wariant II) rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia końcowego. Dla ciśnienia końcowego równego 100 bar sprawność cieplna i sprawność elektryczna wynosiły odpowiednio 14,70% i 12,49%.

Dla wariantu II uzyskano wyższe niż dla wariantu I wartości energii z rozładowywania oraz sprawności magazynowania.

Dla analizowanych ciśnień końcowych dających najdłuższy zasięg ($p_k = 40$ bar) oraz największą sprawność ($p_k = 100$ bar) sporządzono szczegółowe bilanse energetyczne – patrz Rys. 12.



Rys. 12. Bilans energetyczny dla mobilnego układu CAES w wariantie II dla ciśnienia końcowego równego 40 i 100 bar

Dla wariantu II przy ciśnieniu końcowym równym 40 bar straty na silniku elektrycznym są takie same jak dla wariantu I (z uwagi na takie samo ciśnienie końcowe). Zauważyć można natomiast, że energia użyteczna otrzymana z turbin jest tu znacznie większa niż dla wariantu I. Można zauważyć, że zmniejszeniu uległa strata związana z wymianą ciepła z otoczeniem (CH+NG) oraz stratą wylotową, które teraz wyniosły 73,61%. Stało się tak z uwagi na pojawienie się w układzie nagrzewnicy powietrznej, dzięki czemu możliwe było pozyskanie ciepła z otoczenia.

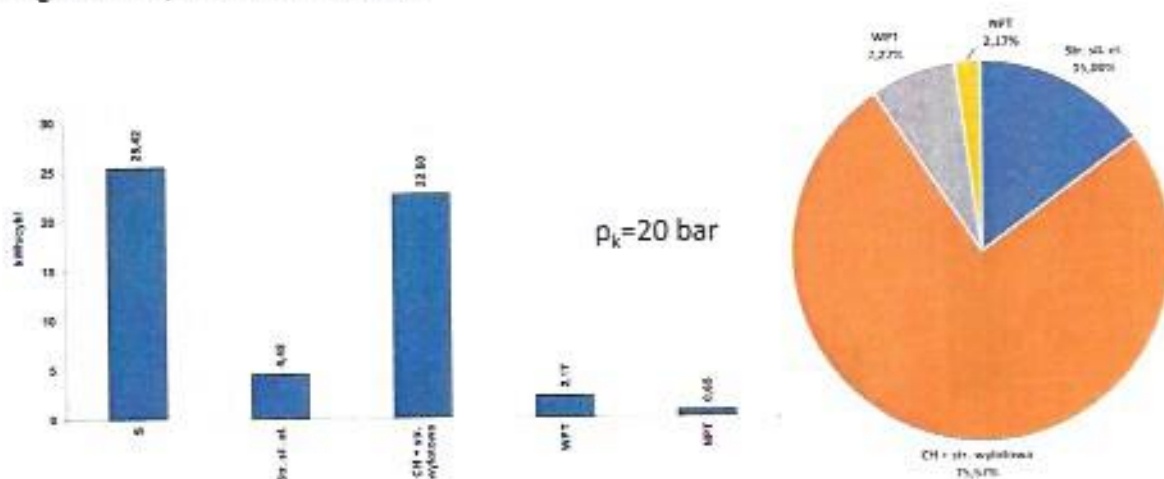
Z kolci przy ciśnieniu końcowym rozładowywania równym 100 bar najbardziej widoczne jest zmniejszenie strat związanych z wymianą ciepłą z otoczeniem (CH+NG) oraz stratą wylotową (sumarycznie 17,28 kWh/cykl), a także straty na silniku elektrycznym (3,58 kWh/cykl). Spowodowane jest to głównie większym ciśnieniem początkowym dla procesu sprężania. W tym przypadku (dla ciśnienia końcowego równego 100 bar) wymiana ciepła z otoczeniem (CH+NG) oraz strata wylotowa odpowiadają za 72,51% strat energii.

Część turbinowa – wariant III

Energia uzyskana z rozładowania układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu III wyniosła 2,82 kWh. Temperatura powietrza opuszczającego układ w pierwszej części rozładowywania (z turbiny wysokoprężnej) wynosiła -134°C , natomiast w drugiej części (z turbiny niskoprężnej) osiągnęła wartość -91°C .

Sprawność cieplna procesu wyniosła 11,10%, natomiast sprawność elektryczna była równa 9,43%. Oznacza to, że dla wariantu III osiągnięto lepsze rezultaty niż dla wariantu I. Lepsze osiągnięcia dla wariantu III wynikają z większych spadków entalpii na początku procesu rozładowywania (dzięki czemu uzyskano mniejsze straty dławienia) oraz z wykorzystania większej ilości sprężonego powietrza (głębsze rozładowanie) dzięki zastosowaniu oddzielnej turbiny niskoprężnej.

Bilans energetyczny dla mobilnego układu CAES w wariantcie III dla ciśnienia końcowego równego 20 bar pokazano na Rys. 13.



Rys. 13. Bilans energetyczny dla mobilnego układu CAES w wariantcie III dla ciśnienia końcowego równego 20 bar

Straty chłodzenia oraz wylotowa są tutaj największe z analizowanych dotychczas wariantów (sumarycznie 22,6 kWh/cykl), podobną zależność można zauważyć również dla straty energii na silniku elektrycznym (4,49 kWh/cykl). Jest to związane z głębszym rozładowaniem układu (aż do 20 bar).

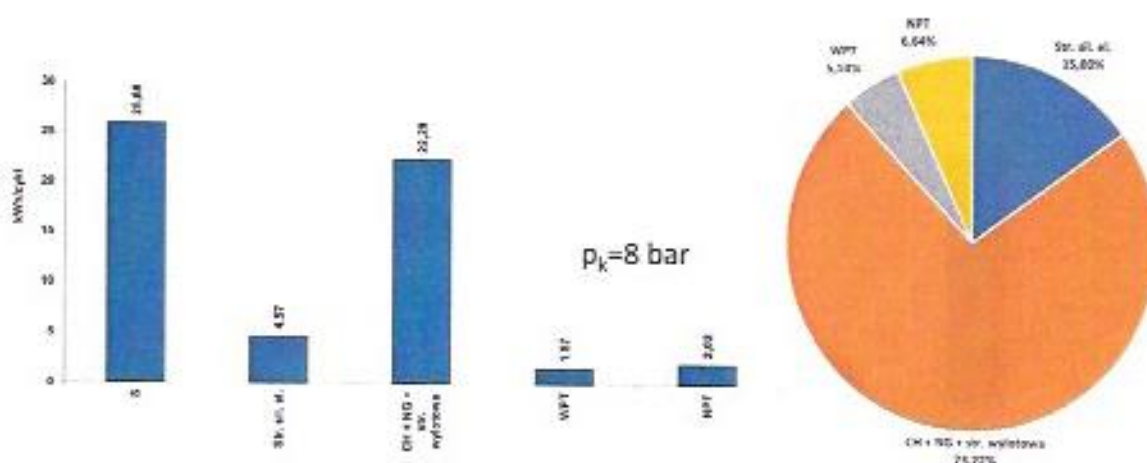
Straty chłodzenia i wylotowa stanowią dla tego wariantu sumarycznie 75,57% a udział energii użytecznej odebranej z turbin był większy niż dla wariantu I i wynosił około 9,4%.

Jeszcze lepsze rezultaty niż dla omawianego wariantu III można by uzyskać przy zastosowaniu czterech turbin (o takich samych sprężach). W trakcie rozładowywania takie turbiny mogłyby najpierw pracować w połączeniu szeregowym, potem w szeregowo-równoległym a na końcu w połączeniu równoległym. W miarę przejścia na połączenie równoległe zwiększy się również powierzchnia wylotowa, co umożliwiłoby większy przepływ czynnika roboczego, a tym samym zmniejszenie ubytku mocy podczas opróżniania zbiornika na sprężone powietrze.

Część turbinowa – wariant IV

W wyniku rozładowywania układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu IV uzyskano 3,59 kWh energii, co jest najlepszym wynikiem ze wszystkich dotychczas rozpatrywanych wariantów. Temperatura powietrza opuszczającego układ początkowo wynosiła -101°C a pod koniec wzrosła do $-56,5^{\circ}\text{C}$. Sprawność cieplna dla tego przypadku była równa 13,86% a sprawność elektryczna wynosiła 11,78%. Wyniki sprawności są nieznacznie słabsze niż dla przypadku 2, aczkolwiek (jak wspomniano powyżej) dzięki zastosowaniu bajpasu uzyskano więcej energii z rozładowania.

Bilans energetyczny dla mobilnego układu CAES w wariantie IV dla ciśnienia końcowego równego 8 bar pokazano na Rys. 14.



Rys. 14. Bilans energetyczny dla mobilnego układu CAES w wariantie IV dla ciśnienia końcowego równego 8 bar

Z uwagi na najgłębsze rozładowanie układu, dla tego wariantu części turbinowej, strata energii na silniku elektrycznym jest największa (4,57 kWh/cykl). Tego samego nie można powiedzieć o stracie związanej z wymianą ciepła z otoczeniem (CH+NG) i stracie wylotowej (sumarycznie

22,29 kWh/cykl), które zostały zmniejszone z uwagi na występującą w analizowanym układzie nagrzewnicę powietrzną (NG).

Udział straty energii związanej z wymianą ciepła z otoczeniem i stratą wylotową wynosi nieco ponad 73% i jest mniejszy niż dla poprzedniego wariantu (dzięki zastosowaniu nagrzewnicy powietrznej).

Analiza tych wariantów pokazuje, że wymiana ciepła z otoczeniem ma decydujący wpływ na ilość energii uzyskiwanej z rozładowania, a tym samym na zasięg pojazdu, który mógłby być zasilany przy pomocy takiego układu CAES.

Układy CAES o stałym ciśnieniu magazynowania

Porównanie sprawności magazynowania energii dla zamodelowanych układów UWCAES przedstawiono w Tab. 3.

Tab. 3 Sprawności brutto i netto magazynowania energii dla zamodelowanych układów UWCAES

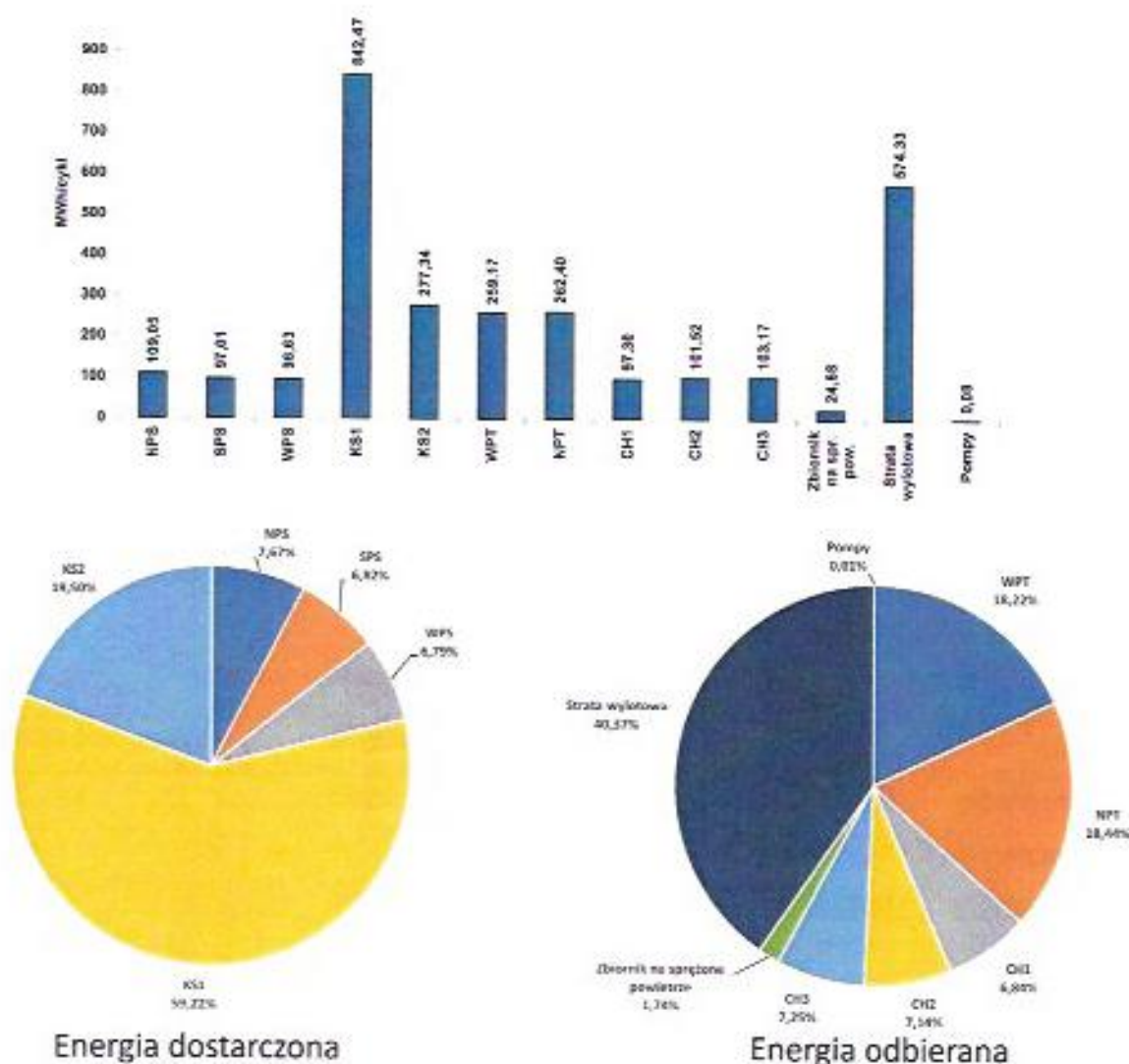
Układ	Sprawność brutto, %	Sprawność netto, %
Diabatyyczny UWCAES bez rekuperacji	36,67	36,66
Diabatyyczny UWCAES z rekuperacją	52,96	52,95
Adiabatyyczny UWCAES	55,94	55,91

Można zauważyć, że najwyższą sprawność osiągnięto dla układu adiabatyycznego, a najniższą dla układu diabatyycznego bez rekuperacji. Sprawność układu z rekuperacją była tylko nieznacznie mniejsza od układu adiabatyycznego. Sprawność układu adiabatyycznego znacznie wzrosłaby, gdyby ciśnienie magazynowania zostało zwiększone. Oznaczałoby to zwiększenie głębokości umieszczania elastycznych zbiorników na sprężone powietrze pod powierzchnią wody.

Diabatyyczny układ UWCAES

Bilans energetyczny dla podwodnego, stałociśnieniowego, diabatyycznego układu CAES pokazano na Rys. 15.

W bilansie tym z punktu widzenia energii dostarczonej do układu największe znaczenie ma pierwsza komora spalania, która jest odpowiedzialna za dostarczenie energii w ilości równej 842,47 MWh/cykl. W przypadku energii opuszczającej układ największy wpływ ma strata wylotowa, która wynosi 574,33 MWh/cykl.



Rys. 15. Bilans energetyczny dla podwrotnego, stałociśnieniowego, diabatyicznego układu CAES

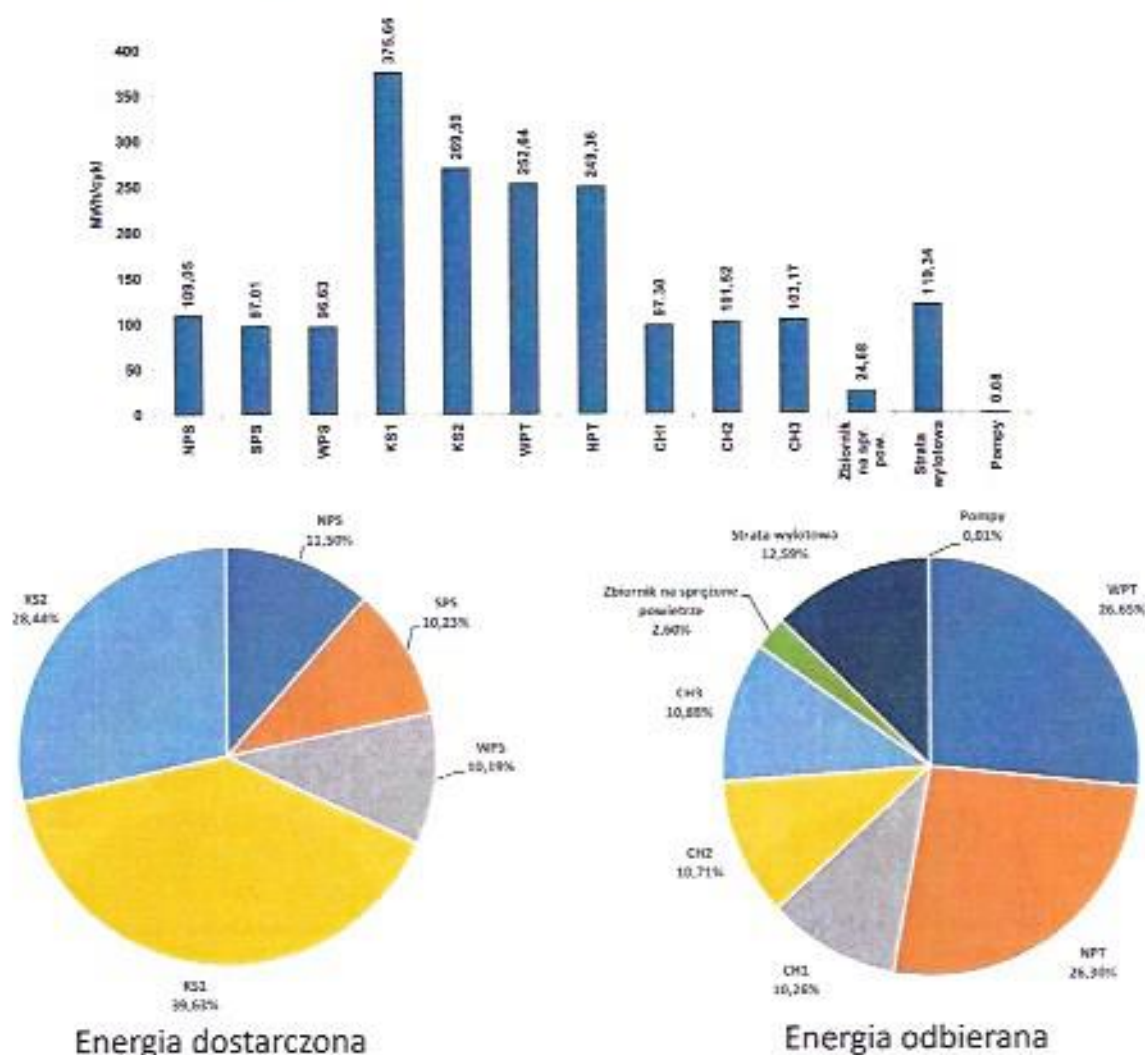
Dla układu diabatyicznego bez rekuperacji w przypadku energii dostarczonej mocno widoczna jest przewaga udziału energii pochodzącej z paliwa (zwłaszcza do pierwszej komory spalania) nad zmagazynowaną energią mechaniczną (dostarczoną sprężarki). Sumaryczny udział energii dostarczonej do komór spalania wynosi aż 78,72%.

Wśród przedstawionych źródeł wypływu energii z diabatyicznego układu UWCAES dominującą rolę odgrywa strata wylotowa (40,37%). Następnymi w kolejności miejscami wypływu energii są nisko i wysokoprężne części turbiny (energia użyteczna – sumarycznie 36,66%), ciepło odbierane od chłodziw sprężarki (sumarycznie 21,23%) oraz od samego zbiornika na sprężone powietrze (1,74%).

Diabatyiczny układ UWCAES z rekuperacją

Bilans energetyczny dla podwodnego, stałociśnieniowego, adiabatycznego układu CAES z rekuperacją przedstawiono na Rys. 16.

W wyniku zastosowania rekuperacyjnego wymiennika ciepła ilość energii dostarczanej do pierwszej komory spalania spadła do 375,66 MWh/cykl. Zmniejszyła się również wartość straty wylotowej, która obecnie wynosi 119,34 MWh/cykl.



Rys. 16. Bilans energetyczny dla podwodnego, stałociśnieniowego, adiabatycznego układu CAES z rekuperacją

Po dodaniu wymiennika regeneracyjnego do układu udział energii dostarczanej do pierwszej komory spalania uległ znacznemu zmniejszeniu (do 39,63%). Zmniejszył się również udział obydwu komór spalania łącznie – do 68,07%. Wzrósł za to udział energii mechanicznej kierowanej na wał sprężarki (sumarycznie prawie 32%).

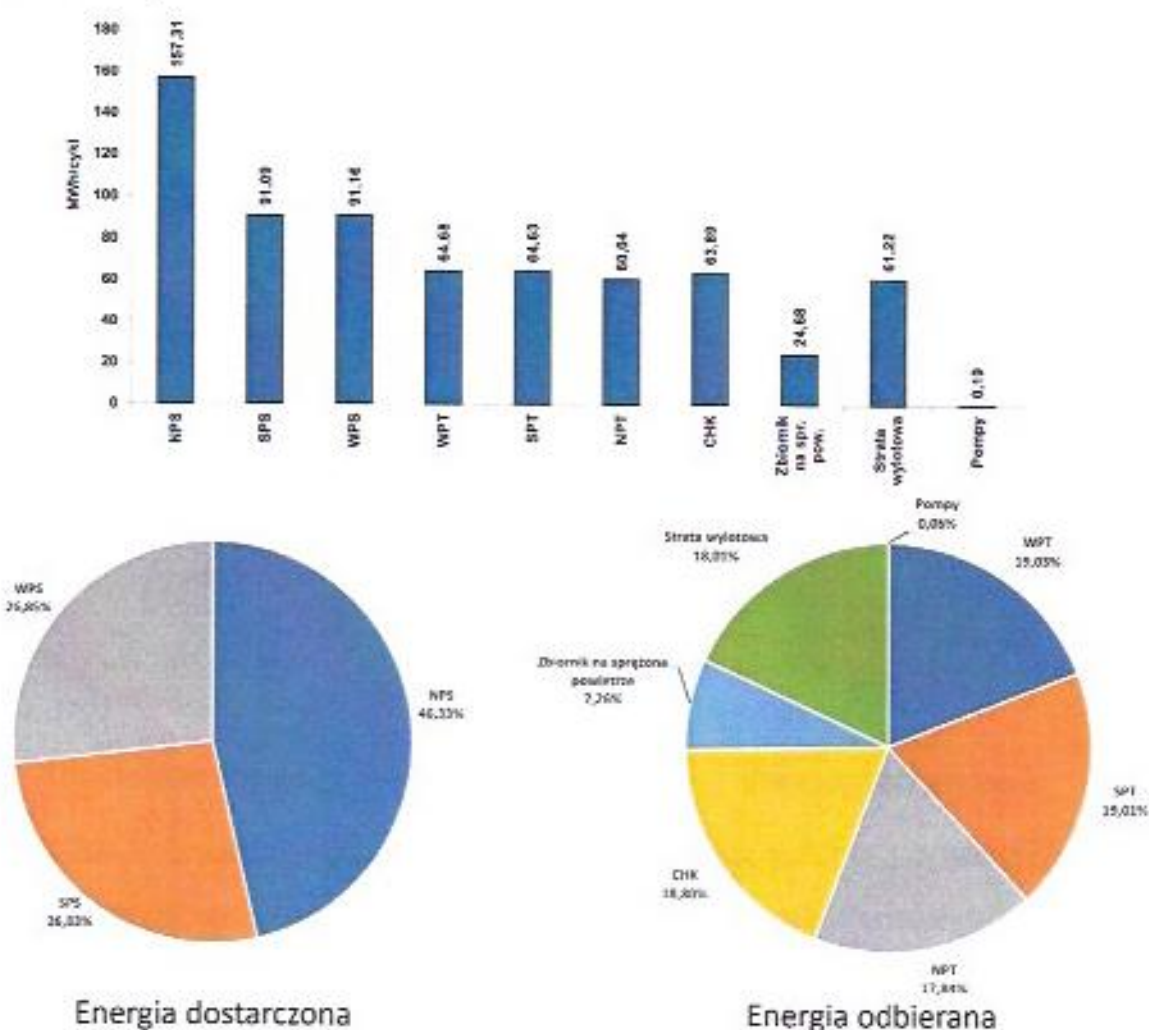
W przypadku adiabatycznego układu UWCAES z rekuperacją strata wylotowa nie jest już dominująca (12,59%) a największe udziały procentowe wśród energii opuszczających układ stanowią energie odebrane z wału wysoko i niskoprężnej części turbiny (sumarycznie prawie

53%). Udziały strat chłodzenia międzystopniowego i końcowego wynosiły sumarycznie prawie 32% a strata ciepła przez ścianki zbiornika na sprężone powietrze – 2,6%.

Adiabatyczny układ UWCAES

Bilans energetyczny dla podwodnego, stałociśnieniowego, adiabatycznego układu CAES zaprezentowano na Rys. 17.

W przypadku układu adiabatycznego całkowita energia dostarczona została do sprężarki (najwięcej do jej niskoprężnej części – 157,31 MWh/cykl). W przypadku energii odbieranej z układu najwięcej uzyskano w formie energii użytecznej na wale turbiny – sumarycznie 189,95 MWh/cykl.



Rys. 17. Bilans energetyczny dla podwodnego, stałociśnieniowego, adiabatycznego układu CAES

Udział niskoprężnej części sprężarki w całkowitej energii dostarczonej do układu wyniósł 46,33%. Każda z pozostałych części sprężarki odpowiadała za prawie 27% energii dostarczonej do układu.

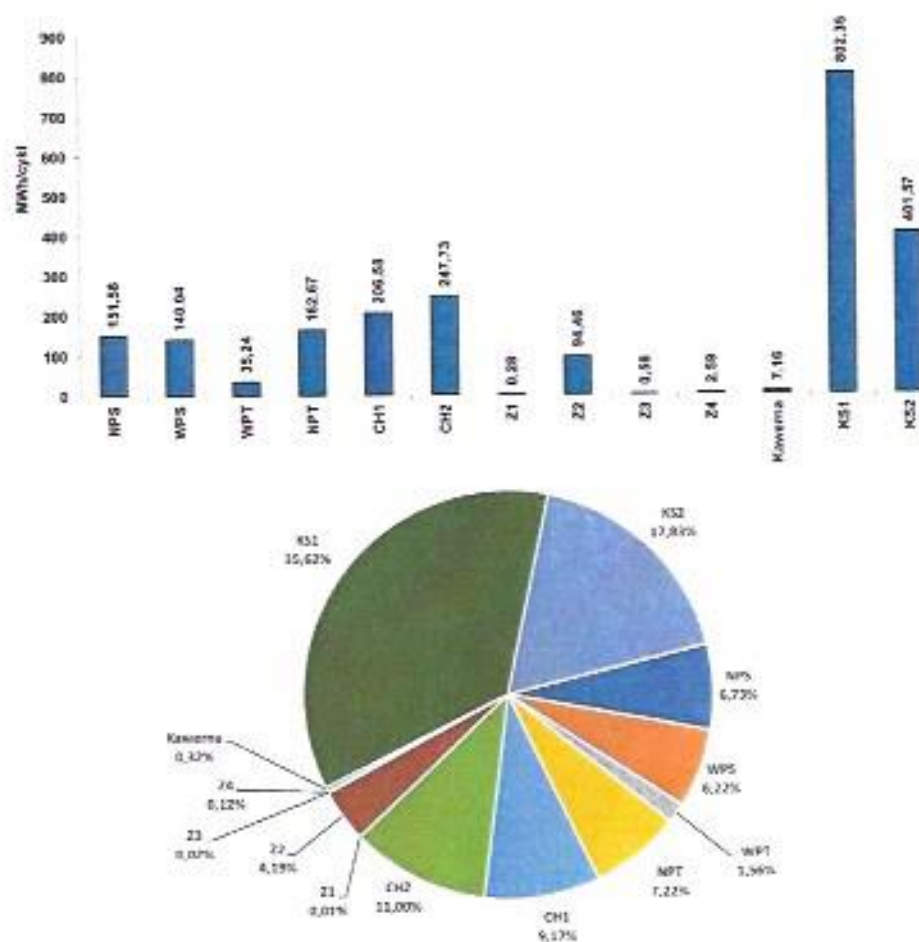
Udział energii użytecznej na wale turbiny wyniósł sumarycznie prawie 56%. Natomiast udziały strat w układzie można kolejno uszeregować w następujący sposób: strata ciepła z chłodnicy końcowej (18,8%), strata wylotowa (18,01%), strata ciepła przez ścianki zbiornika na sprężone powietrze (7,26%) i energia potrzebna do zasilania pomp (0,06%).

Konwencjonalna analiza egzergiczna

Diabatyczny układ CAES o stałej objętości

Wartości liczbowe oraz procentowe destrukcji egzergii na poszczególnych elementach diabatycznego układu CAES o stałej objętości pokazano na Rys. 18.

Największe destrukcje egzergii zaobserwowano na pierwszej (802,36 MWh/cykl) i drugiej (401,57 MWh/cykl) komorze spalania. Znaczące destrukcje egzergii były też na chłodnicach CH2 (247,73 MWh/cykl) i CH1 (206,58 MWh/cykl), niskoprężnej części turbiny (162,67 MWh/cykl), niskoprężnej części sprężarki (151,58 MWh/cykl) oraz wysokoprężnej części sprężarki (140,04 MWh/cykl).



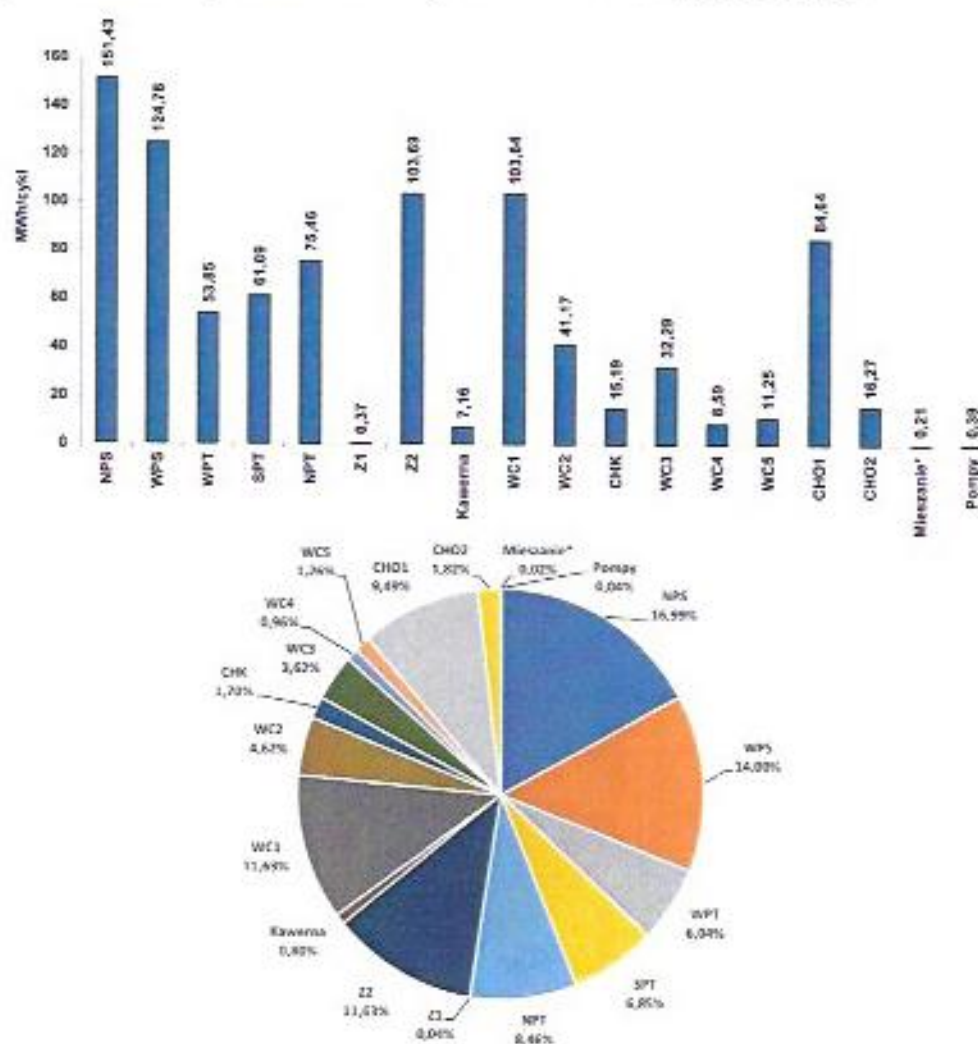
Rys. 18. Destrukcje egzergii na poszczególnych elementach układu d-CAES; wartości liczbowe oraz procentowe

Największe udziały destrukcji egzergii otrzymano dla komór spalania, które sumarycznie odpowiadały za 53,45% całkowitej destrukcji egzergii.

Adiabatyczny układ CAES o stałej objętości

Na Rys. 19 pokazano wartości liczbowe oraz procentowe destrukcji egzergii na poszczególnych elementach adiabatycznego układu CAES o stałej objętości.

Największe destrukcje egzergii występują w sprężarkach (łącznie 276,191 MWh/cykl) i turbinach (łącznie 190,394 MWh/cykl). Duże destrukcje egzergii odnotowano również w zaworze regulacyjnym Z2 (dławienie do 43 bar), wymienniku ciepła WC1 i chłodnicy oleju CHO1. Destrukcja egzergii w chłodnicy oleju CHO2 była dość mała ze względu na mały przepływ oleju (16,842 kg/s) przez ten element. Dla porównania przepływ oleju przez CHO1 wyniósł ponad 313 kg/s (co skutkowało dużą destrukcją egzergii). Destrukcja egzergii na pompach jest znikoma w porównaniu z innymi elementami układu A-CAES.



Rys. 19. Destrukcje egzergii na poszczególnych elementach układu A-CAES: wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji egzergii) (*mieszanie strumieni oleju z wymienników ciepła WC4 i WC5)

Całkowita destrukcja egzergii wyniosła około 440 MWh/cykl podczas procesu ładowania i około 451 MWh/cykl podczas procesu rozładowania.

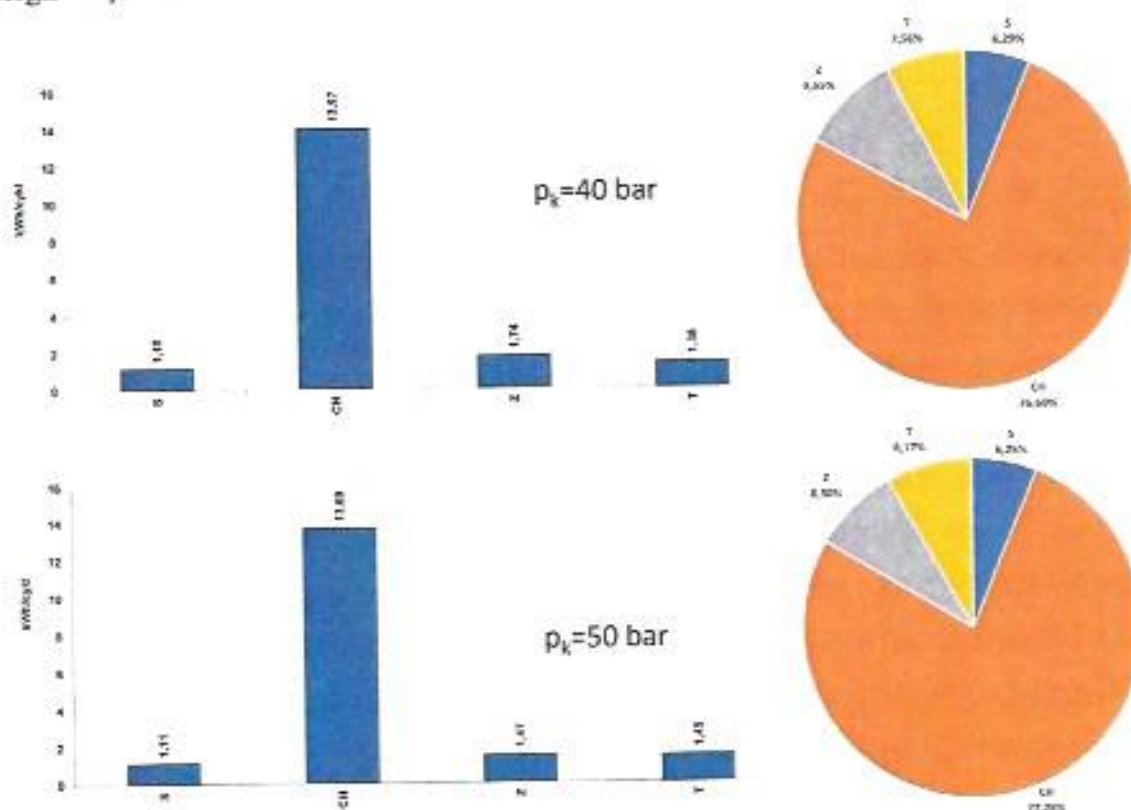
Sprężarka jest odpowiedzialna sumarycznie za prawie 31% całkowitej destrukcji egzergii, z kolei w przypadku turbiny sumaryczna destrukcja egzergii stanowi 21,35% całkowitej destrukcji egzergii. Znaczące udziały destrukcji egzergii otrzymano również dla zaworu Z2 (11,63%), wymiennika ciepła WC1 (11,63%) oraz dla chłodnicy oleju CHO1 (9,49%).

Układ CAES (o stałej objętości) do zastosowań mobilnych

Z uwagi na to, że proces ładowania samochodowego zbiornika na sprężone powietrze jest taki sam dla wszystkich rozważanych wariantów destrukcje egzergii będące wynikiem tego procesu przedstawione są razem z omawianymi wariantami (przedstawione poniżej).

Część turbinowa – wariant I

Dla ciśnień końcowych dających najdłuższy zasięg ($p_k = 40$ bar) oraz największą sprawność ($p_k = 50$ bar) przeanalizowano szczegółowo miejsca występowania i przyczyny destrukcji egzergii – Rys. 20.



Rys. 20. Destrakcja egzergii na poszczególnych elementach układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu I przy ciśnieniu końcowym rozładowywania równym 40 i 50 bar: wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji egzergii)

Dla $p_k = 40$ bar największą destrukcję egzergii odnotowano na chłodnicy umiejscowionej za sprężarką. Wynosiła ona 13,97 kWh/cykl. Pozostałe destrukcje egzergii w układzie można uszeregować w następujący sposób: destrukcja egzergii na zaworze (1,74 kWh/cykl), na turbinie (1,38 kWh/cykl) oraz na sprężarce (1,15 kWh/cykl).

Udział destrukcji egzergii na chłodnicy powietrza za sprężarką wynosi aż 76,6%. Udziały procentowe destrukcji egzergii w całkowitej jej destrukcji dla zaworu, turbiny i sprężarki wynoszą kolejno: 9,55%, 7,56% oraz 6,29%.

Dla ciśnienia końcowego równego 50 bar i tego samego wariantu destrukcja egzergii na chłodnicy wynosi 13,69 kWh/cykl. Pozostałe destrukcje egzergii w układzie można uszeregować w następujący sposób: destrukcja egzergii na zaworze (1,47 kWh/cykl), na turbinie (1,45 kWh/cykl) oraz na sprężarce (1,11 kWh/cykl).

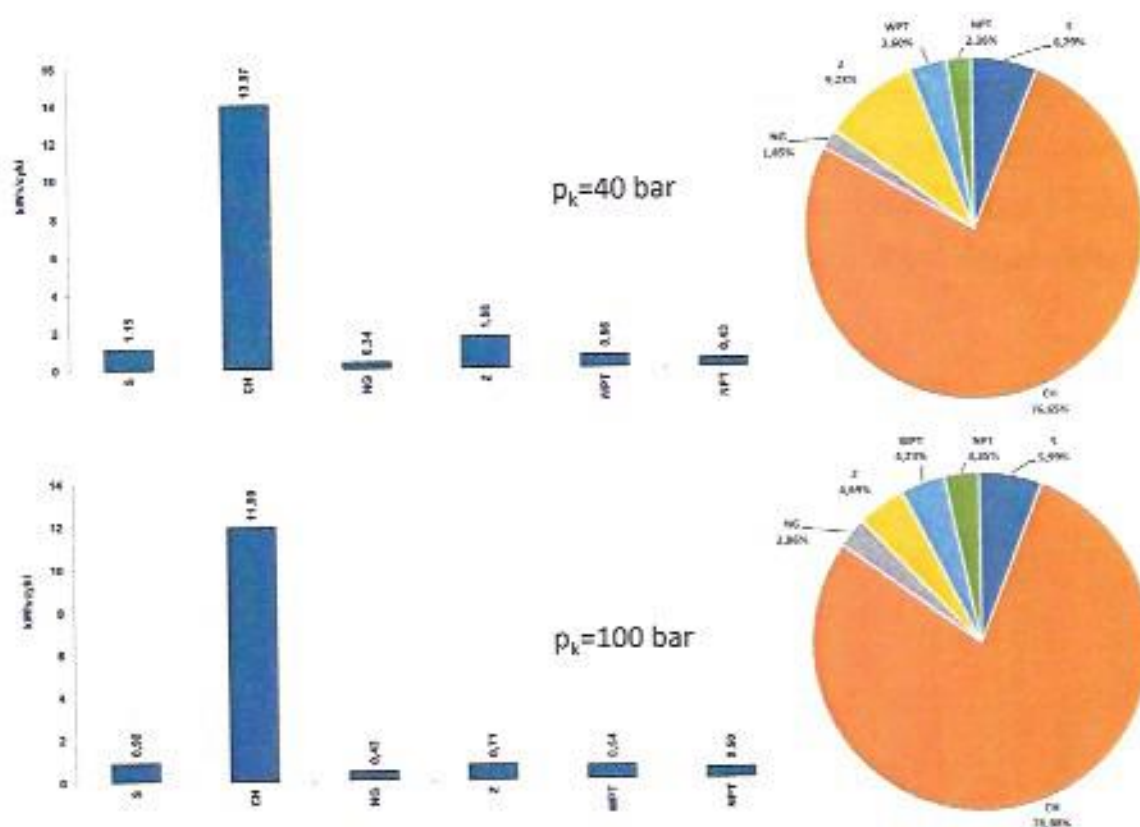
Dla tego ciśnienia końcowego udział destrukcji egzergii na chłodnicy w całkowitej destrukcji egzergii jest jeszcze większy niż poprzednio i wynosi 77,28%. Udziały procentowe destrukcji egzergii w całkowitej jej destrukcji dla zaworu, turbiny i sprężarki wynoszą kolejno: 8,3%, 8,17% oraz 6,25%.

Ze względu na to, że energia jest dostarczana do układu w formie energii elektrycznej oraz odbierana w postaci energii mechanicznej, sprawności energetyczna i egzergetyczna są sobie równe.

Część turbinowa – wariant II

Dla wariantu II również przeanalizowano szczegółowo miejsca występowania i przyczyny destrukcji egzergii dla ciśnień końcowych dających najdłuższy zasięg ($p_k = 40$ bar) oraz największą sprawność ($p_k = 100$ bar) – Rys. 21.

W przypadku $p_k = 40$ bar największą destrukcję egzergii odnotowano dla chłodnicy umiejscowionej za sprężarką. Wynosiła ona 13,97 kWh/cykl. Pozostałe destrukcje egzergii w układzie można uszeregować w następujący sposób: destrukcja egzergii na zaworze (1,68 kWh/cykl), na sprężarce (1,15 kWh/cykl), na wysokoprężnej części turbiny (0,66 kWh/cykl), na niskoprężnej części turbiny (0,43 kWh/cykl) oraz na nagrzewnicy powietrznej (0,34 kWh/cykl). Udział destrukcji egzergii chłodnicy powietrza za sprężarką wynosi 76,65%. Udziały procentowe destrukcji egzergii w całkowitej destrukcji egzergii dla zaworu, sprężarki, wysokoprężnej części turbiny, niskoprężnej części turbiny oraz nagrzewnicy powietrznej wynoszą kolejno: 9,23%, 6,29%, 3,6%, 2,36% i 1,85%.



Rys. 21. Destrakcje energii na poszczególnych elementach układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu II przy ciśnieniu końcowym rozładowywania równym 40 i 100 bar; wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji energii)

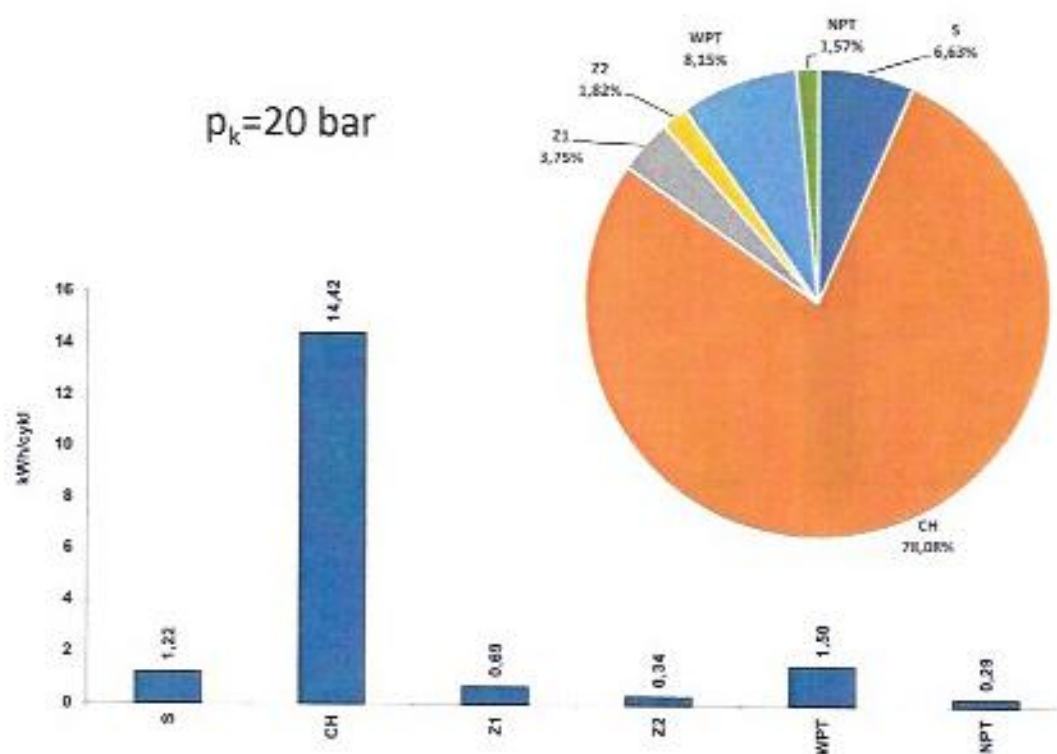
Dla ciśnienia końcowego równego 100 bar i tego samego wariantu destrukcja energii na chłodnicy wynosi 11,9 kWh/cykl. Pozostałe destrukcje energii w układzie można uszeregować w następujący sposób: destrukcja energii na sprężarce (0,9 kWh/cykl), na zaworze (0,71 kWh/cykl), na wysokoprężnej części turbiny (0,64 kWh/cykl), na niskoprężnej części turbiny (0,5 kWh/cykl) oraz na nagrzewnicy powietrznej (0,43 kWh/cykl).

Dla tego ciśnienia końcowego udział destrukcji energii na chłodnicy w całkowitej destrukcji energii jest jeszcze większy niż poprzednio i wynosi aż 78,88%. Udziały procentowe destrukcji energii w całkowitej destrukcji energii dla sprężarki, zaworu, wysokoprężnej części turbiny, niskoprężnej części turbiny oraz nagrzewnicy powietrznej wynoszą kolejno: 8,29%, 5,97%, 5,38%, 4,23% i 3,95%.

Część turbinowa – wariant III

Wartości liczbowe oraz procentowe destrukcji energii na poszczególnych elementach układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu III przy ciśnieniu końcowym rozładowywania równym 20 bar pokazano na Rys. 22.

Największą destrukcję egzergii odnotowano dla chłodnicy umiejscowionej za sprężarką – 14,42 kWh/cykl. Pozostałe destrukcje egzergii w układzie można uszeregować w następujący sposób: destrukcja egzergii na turbinie wysokoprężnej (1,5 kWh/cykl), na sprężarce (1,22 kWh/cykl), na zaworze 1 (0,69 kWh/cykl), na zaworze 2 (0,34 kWh/cykl) oraz na turbinie niskoprężnej (0,29 kWh/cykl).



Rys. 22. Destrukcje egzergii na poszczególnych elementach układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu III przy ciśnieniu końcowym rozładowywania równym 20 bar; wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji egzergii)

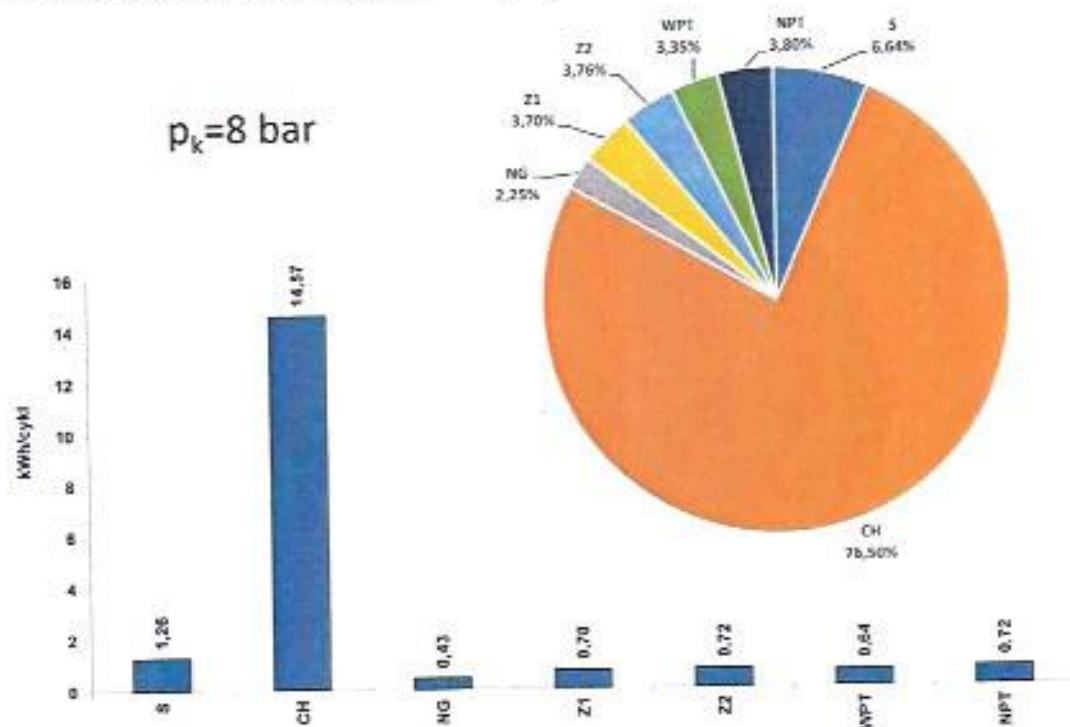
Udział destrukcji egzergii chłodnicy powietrza za sprężarką w całkowitej destrukcji egzergii wynosi 78,08%. Udziały procentowe destrukcji egzergii dla turbiny wysokoprężnej, sprężarki, zaworu 1, zaworu 2 oraz turbiny niskoprężnej wynoszą kolejno: 8,15%, 6,63%, 3,75%, 1,82% i 1,57%.

Część turbinowa – wariant IV

Wartości liczbowe oraz procentowe destrukcji egzergii na poszczególnych elementach układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu IV przy ciśnieniu końcowym rozładowywania równym 8 bar przedstawiono na Rys. 23.

Największą destrukcję egzergii odnotowano dla chłodnicy umiejscowionej za sprężarką – 14,57 kWh/cykl. Była to również największa destrukcja egzergii dla wszystkich analizowanych przypadków układu CAES do zastosowań mobilnych (głównie dlatego, że mamy tutaj do

czynienia z najgłębszym rozładowaniem zbiornika na sprężone powietrze). Pozostałe destrukcje egzergii w układzie można uszeregować w następujący sposób: destrukcja egzergii na sprężarce (1,26 kWh/cykl), na turbinie niskoprężnej (0,72 kWh/cykl), na zaworze 2 (0,72 kWh/cykl), na zaworze 1 (0,7 kWh/cykl), na turbinie wysokoprężnej (0,64 kWh/cykl) oraz na nagrzewnicy powietrznej (0,43 kWh/cykl).



Rys. 23. Destrakcje egzergii na poszczególnych elementach układu CAES do zastosowań mobilnych dla wariantu IV przy ciśnieniu końcowym rozładowywania równym 8 bar: wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji egzergii)

Udział destrukcji egzergii chłodnicy powietrza za sprężarką w całkowitej destrukcji egzergii wynosi 76,5%. Udziały procentowe destrukcji egzergii dla sprężarki, turbiny niskoprężnej, zaworu 2, zaworu 1, turbiny wysokoprężnej oraz nagrzewnicy powietrznej wynoszą kolejno: 6,64%, 3,8%, 3,76%, 3,7%, 3,35% i 2,25%.

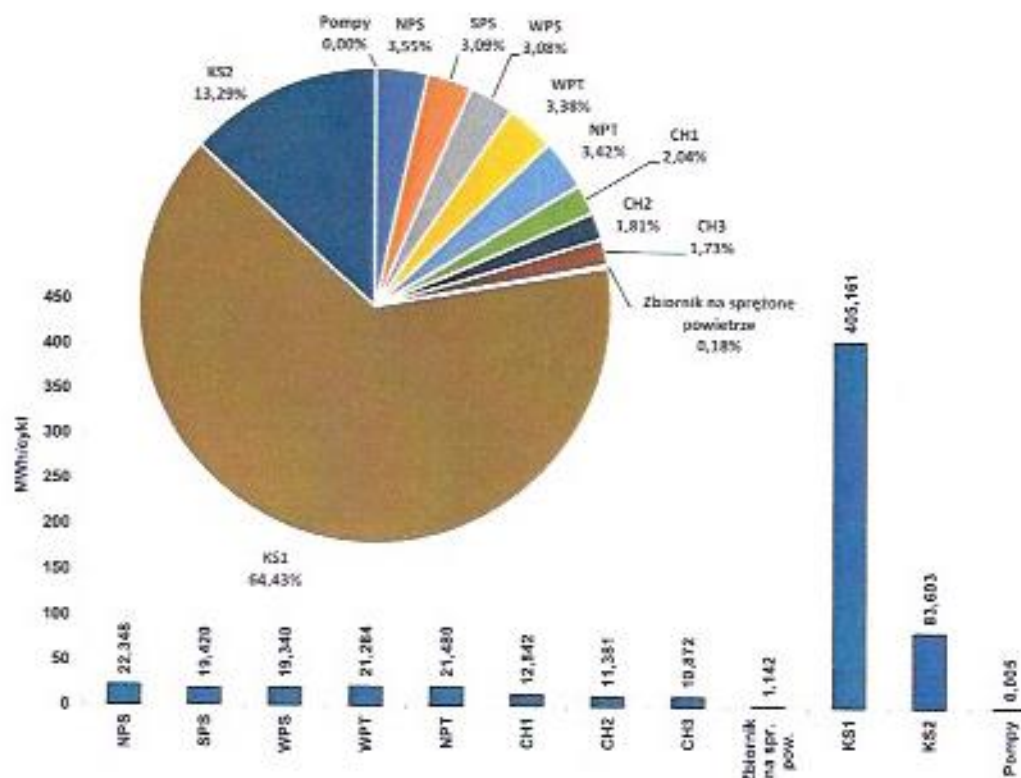
Przedstawione powyżej przypadki wskazują na to, że w celu poprawy osiągnięć układu CAES do zastosowań mobilnych należałoby skupić się na udoskonaleniu procesu sprężania tak, aby zmniejszyć destrukcję egzergii związaną z chłodzeniem.

Układy CAES o stałym ciśnieniu magazynowania

Diabatyczny układ UWCAES

Wartości liczbowe oraz procentowe destrukcji egzergii na poszczególnych elementach diabatycznego układu UWCAES zaprezentowano na Rys. 24.

Można zauważyć, że największa destrukcja egzergii występuje na pierwszej komorze spalania (405,161 MWh/cykl), co może być spowodowane niską temperaturą powietrza opuszczającego zbiornik podwodny. Druga komora spalania również charakteryzuje się znaczną destrukcją egzergii (83,603 MWh/cykl), aczkolwiek jest ona prawie 5 razy mniejsza niż w przypadku pierwszej komory spalania. Może być to spowodowane tym, że do drugiej komory spalania trafia czynnik roboczy o znacznie wyższej temperaturze. Pozostałe elementy układu odznaczają się znacznie mniejszymi destrukcjami egzergii.



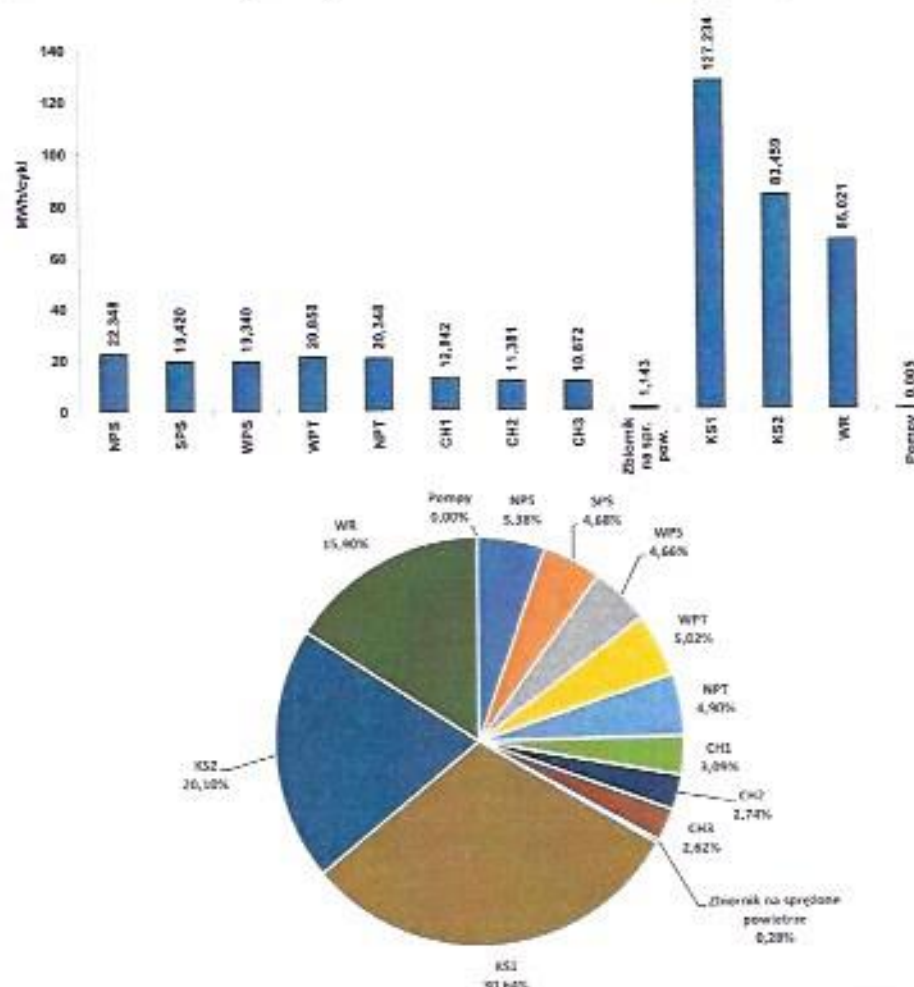
Rys. 24. Destrakcje egzergii na poszczególnych elementach układu d-UWCAES: wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji egzergii)

Komora spalania KS1 jest odpowiedzialna za ponad 64% destrukcji egzergii, natomiast udział destrukcji egzergii (w całkowitej destrukcji egzergii) dla drugiej komory spalania (KS2) wynosi ponad 13%.

Diabatyyczny układ UWCAES z rekuperacją

Na Rys. 25 pokazano wartości liczbowe oraz procentowe destrukcji egzergii na poszczególnych elementach diabatyicznego układu UWCAES z rekuperacją. Destrakcja egzergii na pierwszej komorze spalania jest znacznie mniejsza (127,234 MWh/cykl) w porównaniu do układu bez rekuperacji. Zaobserwować można tutaj jednak nowe źródło destrukcji egzergii – regeneracyjny wymiennik ciepła (WR) o destrukcji egzergii równej 66,021 MWh/cykl. Suma

destrukcji energii na WR i na KS1 dla układu d-UWCAES z rekuperacją jest około dwa razy mniejsza niż na KS1 dla adiabatycznego układu UWCAES bez rekuperacji.



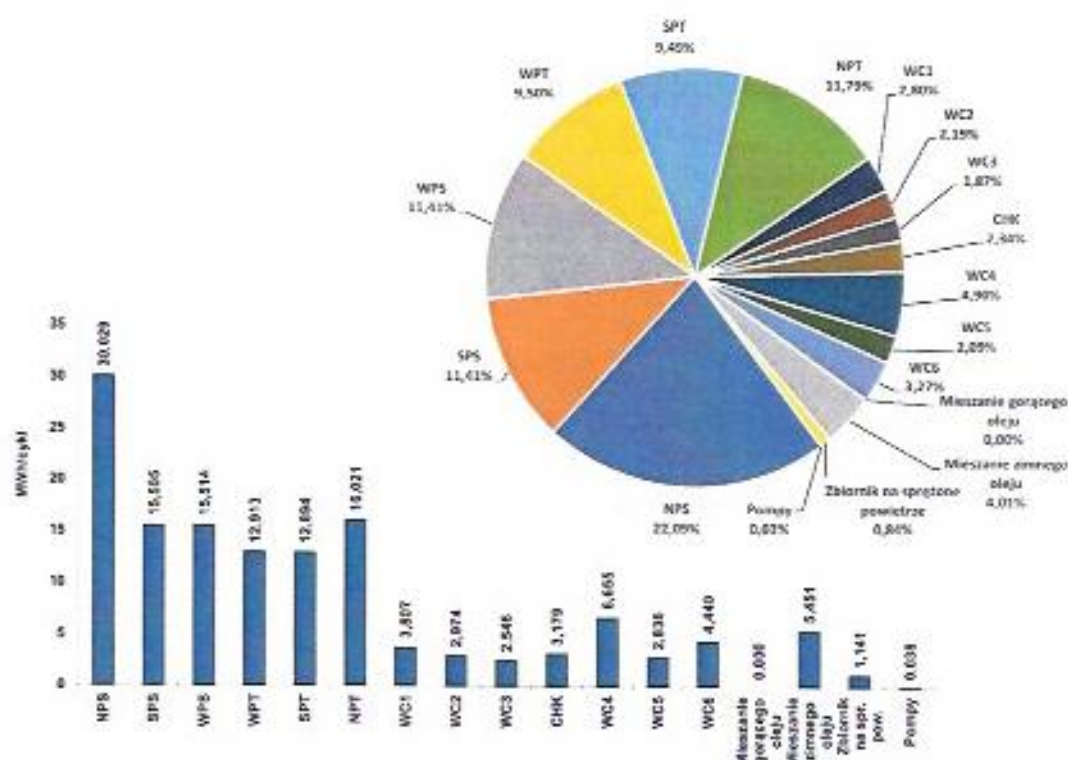
Rys. 25. Destrakcje energii na poszczególnych elementach układu d-UWCAES z rekuperacją: wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji energii)

Udział destrukcji energii na pierwszej komorze spalania w całkowitej destrukcji energii wynosi 30,64%. Pozostałymi elementami cechującymi się dużym udziałem destrukcji energii są druga komora spalania (20,1%) i wymiennik regeneracyjny (15,9%). Reszta elementów układu odznacza się znacznie mniejszymi udziałami destrukcji energii.

Adiabatyczny układ UWCAES

Wartości liczbowe oraz procentowe destrukcji energii na poszczególnych elementach adiabatycznego układu UWCAES przedstawiono na Rys. 26.

Ze wszystkich rozważanych podwodnych układów do magazynowania energii przy pomocy sprężonego powietrza w przypadku układu adiabatycznego destrukcje energii są najmniejsze.



Rys. 26. Destrakcje energii na poszczególnych elementach układu A UWCAES: wartości liczbowe oraz procentowe (w odniesieniu do całkowitej destrukcji energii)

Najsłabszym elementem w adiabatycznym układzie UWCAES jest niskociśnieniowa część sprężarki (30,029 MWh/cykl). Znaczące destrukcje energii zaobserwowano również dla pozostałych części sprężarki oraz dla turbiny.

Dla adiabatycznego układu UWCAES sprężarka i turbina odpowiadają sumarycznie za prawie 76% całkowitej destrukcji energii.

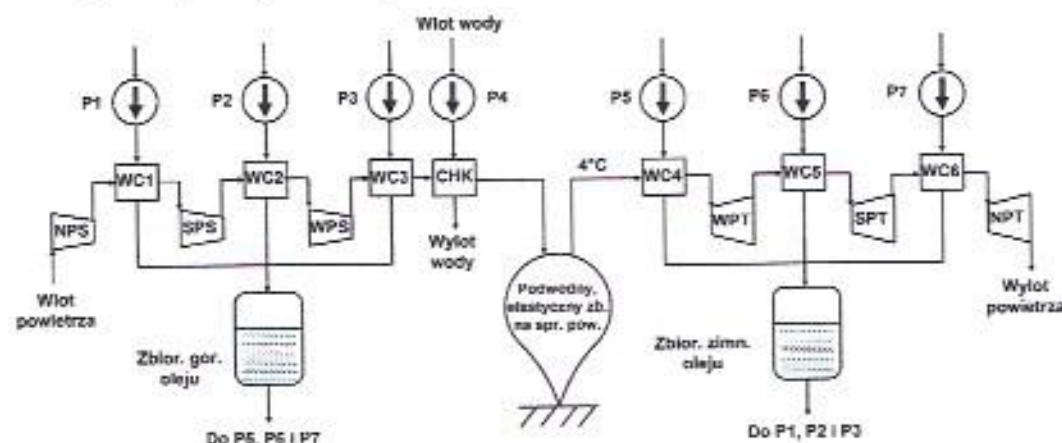
Zaawansowana analiza energetyczna

Schemat modelowanego układu UWCAES wraz z wybranymi parametrami został pokazany na Rys. 27.

W przypadku zaawansowanej analizy energetycznej w zaprezentowanym poniżej przykładzie obliczeniowym przyjęto zupełnie inne podejście do modelowania niż dla układów wykorzystujących sprężone powietrze, przedstawionych poprzednio.

Założono, że stosunek czasu ładowania do rozładowywania wynosi 2 (czas ładowania wynosi 8 godzin a czas rozładowywania – 4 godziny). Ciśnienie, przy którym przechowywane jest sprężone powietrze przyjęto na dość niskim poziomie – 15 bar, co odpowiada głębokości ulokowania balonów na sprężone powietrze 150 m pod poziomem wody. Taka głębokość może być osiągnięta np. po planowanym zalaniu wyeksploatowanej odkrywki po kopalni węgla brunatnego elektrowni Bełchatów.

Przepływ masowy powietrza podczas ładowania przyjęto na poziomie 100 kg/s, a podczas rozładowywania zgodnie z wcześniejszymi założeniami musiał być 2 razy większy i wynosił 200 kg/s. Woda zasilająca chłodnicę końcową (CHK) ma temperaturę 15°C, natomiast powietrze opuszczające tę chłodnicę ma nieco większą temperaturę niż woda wylotowa z CHK (w zależności od sprawności tego wymiennika ciepła – Tab. 4). Powietrze zmagazynowane pod wodą ma temperaturę 4°C (po kilku godzinach osiąga temperaturę otaczającej wody).



Rys. 27. Schemat adiabaticznego układu UWCAES

Inne parametry systemu dla warunków rzeczywistych, nieuniknionych i idealnych przedstawiono w Tab. 4.

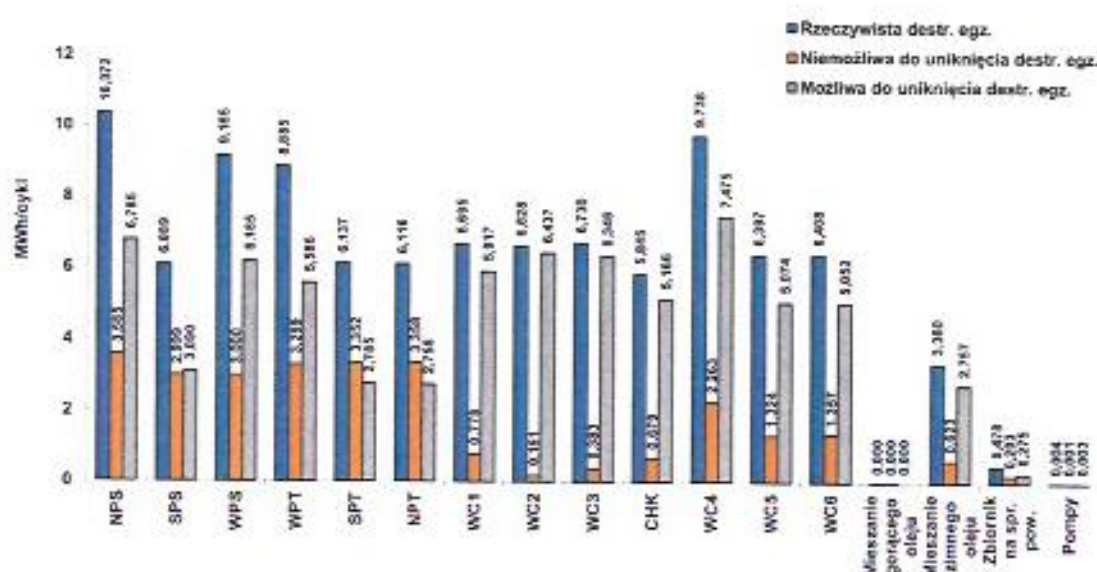
Tab. 4 Rzeczywiste, niemożliwe do uniknięcia i idealne warunki dla adiabaticznego systemu CAES [17]

Komponent	Parametr	War. rzeczywiste	War. nieuniknione	War. idealne
NPS	Sprawność	90%	95%	100%
SPS	Sprawność	90%	95%	100%
WPS	Sprawność	85%	95%	100%
WPT	Sprawność	85%	95%	100%
SPT	Sprawność	90%	95%	100%
NPT	Sprawność	90%	95%	100%
WC1	Efektywność	0,9	0,98	1
	Wskaźnik strat ciśnienia	7,47%	1%	0%
WC2	Efektywność	0,9	0,98	1
	Wskaźnik strat ciśnienia	7,47%	1%	0%
WC3	Efektywność	0,9	0,98	1
	Wskaźnik strat ciśnienia	7,47%	1%	0%
CHK	Efektywność	0,9	0,98	1

	Wskaźnik strat ciśnienia	7,47%	1%	0%
WC4	Efektywność	0,9	0,98	1
	Wskaźnik strat ciśnienia	7,47%	1%	0%
WC5	Efektywność	0,9	0,98	1
	Wskaźnik strat ciśnienia	7,47%	1%	0%
WC6	Efektywność	0,9	0,98	1
	Wskaźnik strat ciśnienia	7,47%	1%	0%
Pompy	Sprawność	85%	95%	100%

Analizę przeprowadzono w taki sposób, aby utrzymać stałe ciśnienie w zbiorniku powietrza (znajdującym się na tej samej głębokości) równe 15 bar, co spowodowało pewne konsekwencje. Oznacza to, że większe spadki ciśnienia na wymiennikach ciepła wymuszają większe wzrosty ciśnienia na poszczególnych częściach sprężarki, a także mniejsze spadki ciśnienia (i entalpii) na poszczególnych częściach turbiny.

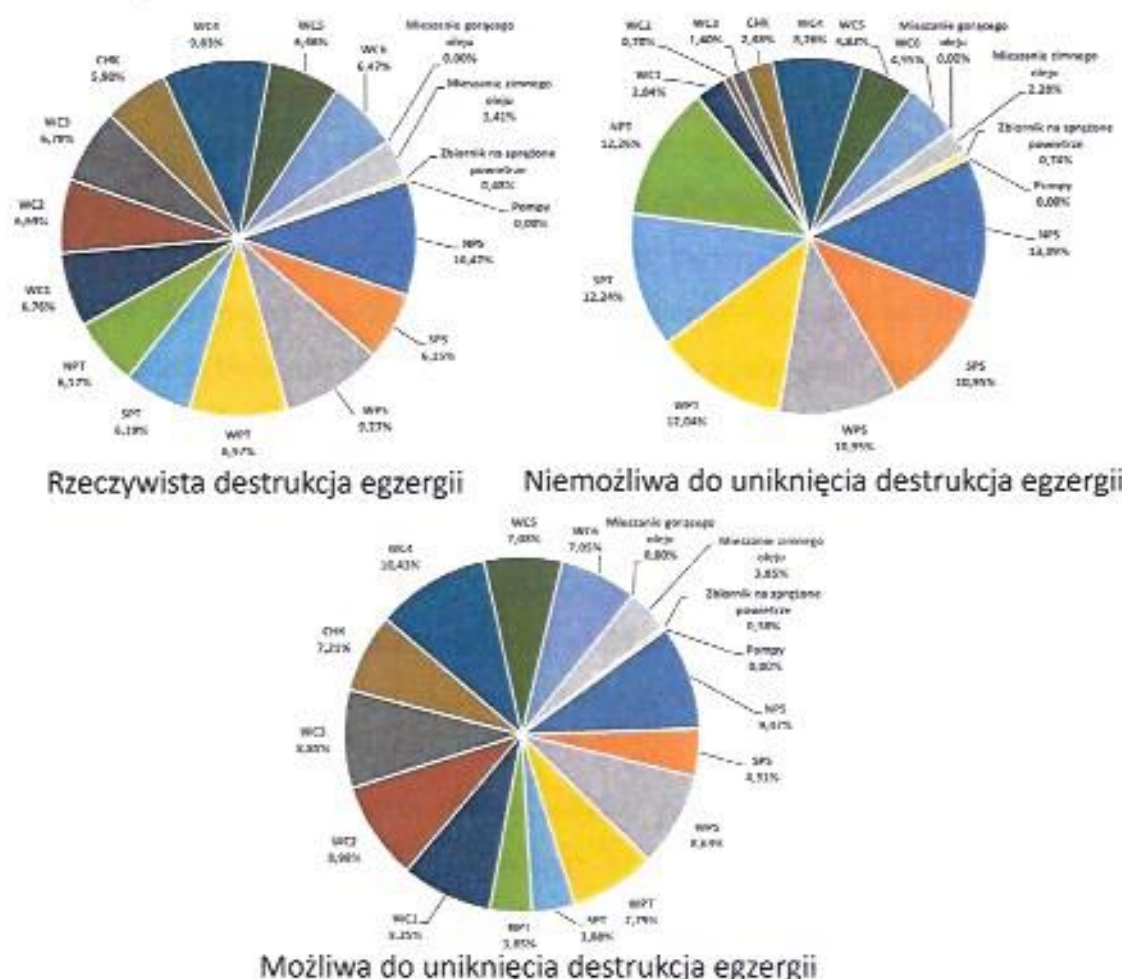
Porównanie rzeczywistej, nieuniknionej i możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii dla adiabatycznego układu UWCAES przedstawiono na Rys. 28.



Rys. 28. Porównanie rzeczywistej, nieuniknionej i możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii dla adiabatycznego układu UWCAES

Rysunek ten podkreśla bardzo duży potencjał ograniczania destrukcji egzergii poprzez ulepszanie poszczególnych elementów systemu, w szczególności: kompresorów, turbin i wymienników ciepła. Największą redukcję destrukcji egzergii można osiągnąć za pomocą usprawnienia wymienników ciepła.

Procentowe udziały rzeczywistej, niemożliwej do uniknięcia a także możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii poszczególnych komponentów adiabatycznego układu UWCAES (w całkowitej, rzeczywistej/niemożliwej do uniknięcia/możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii) pokazano na Rys. 29.



Rys. 29. Procentowe udziały rzeczywistej/niemożliwej do uniknięcia/możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii poszczególnych komponentów adiabatycznego układu UWCAES w całkowitej, rzeczywistej/niemożliwej do uniknięcia/możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii

Największe udziały rzeczywistej destrukcji egzergii w całkowitej, rzeczywistej destrukcji egzergii można zaobserwować na niskoprężnej części sprężarki (10,47%), wymienniku ciepła WC4 (9,83%), wysokoprężnej części sprężarki (9,27%) oraz wysokoprężnej części turbiny (8,97%).

W przypadku udziałów niemożliwej do uniknięcia destrukcji egzergii dominującą rolę odgrywa turbina (NPT – 12,26%, SPT – 12,24% i WPT – 12,04%) oraz sprężarka (NPS – 13,09%, SPS – 10,95% i WPS – 10,95%).

Z kolei z punktu widzenia udziałów możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii w całkowitej, możliwej do uniknięcia destrukcji egzergii największe znaczenie mają: wymiennik ciepła WC4

(10,43%), niskoprężna część sprężarki (9,47%), wymiennik ciepła WC2 (8,98%), WC3 (8,85%), wysokoprężna część sprężarki (8,63%), wymiennik ciepła WC1 (8,25%), wysokoprężna część turbiny (7,79%), chłodnica końcowa (7,21%), wymiennik ciepła WC5 (7,08%) oraz WC6 (7,05%).

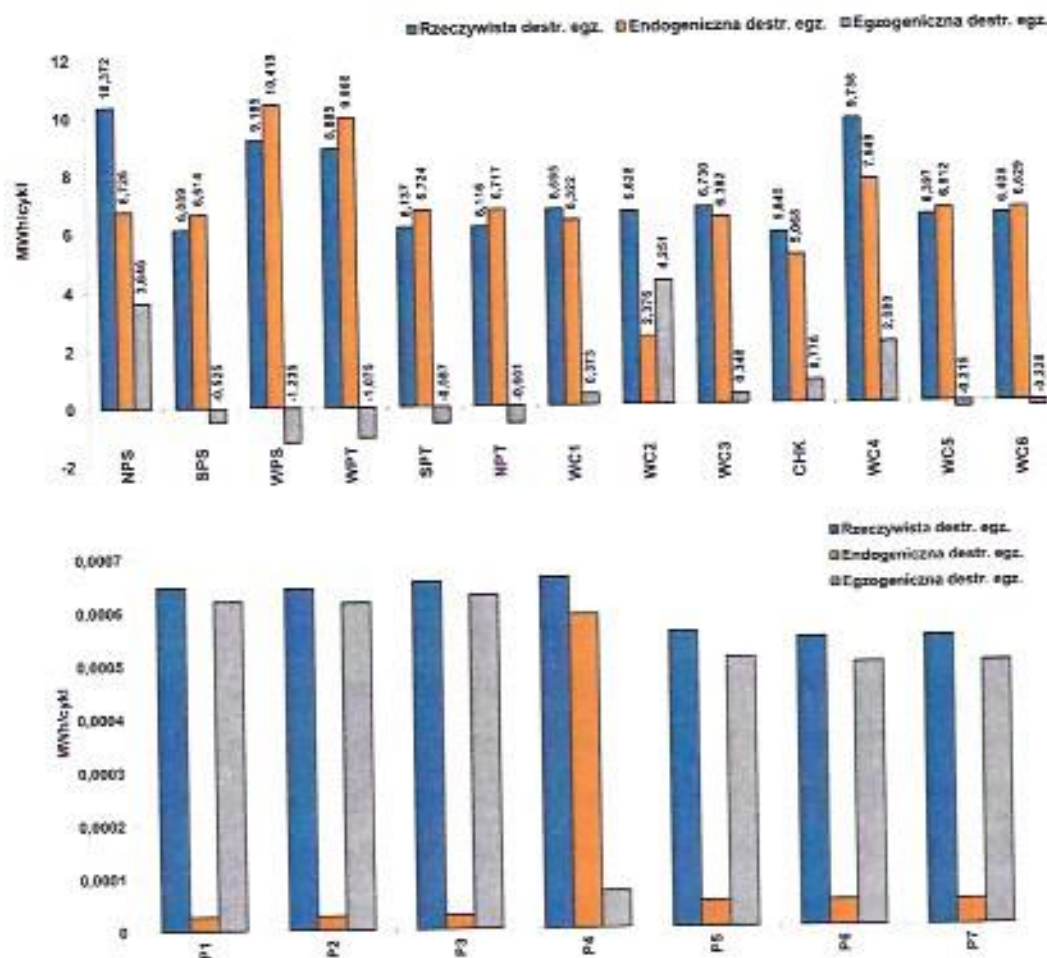
Warto również przeanalizować możliwość wyeliminowania destrukcji egzergii wynikającej ze strat mieszania oleju o różnych temperaturach za turbinową częścią układu UWCAES. Ta destrukcja egzergii ma miejsce, ponieważ powietrze tuż przed wymiennikiem ciepła WC4 pochodzi bezpośrednio z podwodnego magazynu i jest znacznie chłodniejsze niż powietrze za turbinami. Dlatego wymiennik ciepła WC4 pracuje w innych warunkach niż wymienniki WC5 i WC6, przez co olej z tego wymiennika jest chłodniejszy niż z wymienników WC5 i WC6.

Destrukcja egzergii wynikająca z mieszania zimnego oleju jest dość duża, ale próba jej wyeliminowania wpłynie negatywnie na destrukcję egzergii na wymienniku ciepła HEX4 poprzez zwiększenie różnic temperatur pomiędzy czynnikami przepływającymi przez ten wymiennik ciepła.

Na Rys. 30 przedstawiono porównanie rzeczywistej, endogenicznej i egzogenicznej destrukcji egzergii adiabatycznego układu UWCAES (z wyjątkiem mieszania oraz zbiornika na sprężone powietrze). Wykresy te pokazują pokazano wpływ innych komponentów układu na rozważany element.

Można zauważyć, że istnieją elementy systemu, na które inne elementy wpływają pozytywnie (zmniejszając ich destrukcję egzergii). Te elementy to: SPS, WPS, WPT, SPT, NPT, WC5 i WC6.

Warto również zaznaczyć, że pozostałe elementy układu UWCAES mają bardzo negatywny wpływ na niskoprężną część sprężarki NPS oraz wymiennik ciepła WC2. Zauważalny negatywny wpływ pozostałych elementów układu występuje również w przypadku wymiennika ciepła WC4.



Rys. 30. Porównanie rzeczywistej, endogennej i egzogennej destrukcji egzergii dla adiabatycznego układu UWCAES (nie pokazano destrukcji egzergii wynikającej z mieszania oraz destrukcji egzergii przypisanej do zbiornika sprężonego powietrza)

Można również zauważyć, że inne elementy układu mają bardzo negatywny wpływ na pompy oleju termalnego (najprawdopodobniej negatywny wpływ jest spowodowany niedoskonałościami wymienników ciepła – spadkami ciśnienia).

W przypadku endogennej i egzogennej destrukcji egzergii nie przedstawiono wykresów kołowych z uwagi na fakt występowania ujemnych destrukcji egzergii dla niektórych elementów układu.

5.3.4 Utylitaryzm wyników wykonanych badań

Koncepcja egzergii uzupełnia i poprawia analizę energetyczną, obliczając: prawdziwą wartość termodynamiczną nośnika energii; rzeczywistą nieefektywność termodynamiczną w systemie oraz zmienne, które jednoznacznie charakteryzują działanie systemu (lub jego jednego składnika) z termodynamicznego punktu widzenia.

Nieefektywności spowodowane nieodwracalnością w systemie reprezentują, ogólnie rzecz biorąc, zdecydowanie najbardziej istotne nieefektywności termodynamiczne i można je zidentyfikować za pomocą analizy egzergetycznej. Konwencjonalna analiza egzergetyczna

identyfikuje wielkość, lokalizację i przyczyny nieefektywności termodynamicznej. Zaawansowana analiza egzergetyczna ocenia interakcje między komponentami całego systemu i rzeczywisty potencjał poprawy komponentu systemu i całego systemu. Informacje dostarczone przez zaawansowaną analizę egzergetyczną są bardzo przydatne w zrozumieniu działania systemów konwersji energii i opracowaniu strategii ich poprawy.

5.4 PODSUMOWANIE NAJWAŻNIEJSZYCH CECH I OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

W ramach I osiągnięcia naukowego dokonano analizy energetycznej dla wszystkich typów układów CAES opisanych w poprzednich sekcjach. Opisano procesy konwersji energii (oraz straty energii) dla poszczególnych elementów rozważanych typów układów CAES. Obliczono również sprawności magazynowania energii dla wszystkich rozważanych typów układów do magazynowania energii przy użyciu sprężonego powietrza.

Największe straty energetyczne w przypadku stałoobjętościowego, diabatycznego układu CAES to: strata chłodzenia międzystopniowego sprężarki oraz strata wylotowa.

W przypadku stałoobjętościowego układu adiabatycznego straty te są znacznie mniejsze. Natomiast pojawiła się tutaj nowa strata - strata chłodzenia oleju z uwagi na to, że nie można było wykorzystać całej energii zmagazynowanej w oleju termalnym. Jest to wynikiem tego, że dławienie w trakcie procesu rozładowywania zmniejsza spadki entalpii na części turbinowej układu.

W przypadku analizy energetycznej układu CAES do zastosowań mobilnych można wyciągnąć następujące wnioski:

-w najprostszej konfiguracji sprawność silnika pneumatycznego do układu mobilnego jest bardzo niska ze względu na konieczność schłodzenia sprężonego powietrza zanim trafi ono do zbiornika. **Najlepszym sposobem na poprawę sprawności silnika pneumatycznego jest wykorzystanie ciepła otoczenia do ogrzania czynnika roboczego i cylindrów silnika,**

-innym sposobem poprawy osiągnięć silnika na sprężone powietrze jest przeprowadzenie procesu rozprężania w taki sposób, aby lepiej wykorzystać spadek entalpii dla różnych ciśnień w zbiorniku (poprzez unikanie dławienia, gdy zbiornik jest pełny i lepsze wykorzystanie niskiego ciśnienia pod koniec opróżniania zbiornika na sprężone powietrze),

-dobrym sposobem na poprawę sprawności jest również udoskonalenie procesu sprężania podczas ładowania zbiornika poprzez zastosowanie odpowiedniego chłodzenia. W sposób idealny proces ten przebiegałby izotermicznie (co w praktyce nie jest możliwe).

W wyniku analizy energetycznej układów stałociśnieniowych największą sprawność uzyskano dla układu adiabatycznego a najmniejszą dla układu diabatycznego bez rekuperacji. W

przypadku układów diabatycznych zastosowanie rekuperacji bardzo znacząco zmniejszyło stratę wylotową, dzięki czemu zaobserwowano duży wzrost sprawności układu.

W ramach I osiągnięcia naukowego przedstawiono również inny sposób oceny układów wykorzystujących sprężone powietrze do magazynowania energii. Podejściem tym była analiza egzergetyczna. Analiza ta ukierunkowana jest na poszukiwanie przyczyn niedoskonałości termodynamicznych poszczególnych maszyn i urządzeń wchodzących w skład układów CAES jak również układów tych w ujęciu całościowym. Rozważania te podzielono na konwencjonalną oraz zaawansowaną analizę egzergetyczną. Konwencjonalną analizę egzergetyczną przeprowadzono dla wszystkich rozważanych układów CAES, natomiast zaawansowaną analizę egzergetyczną (z uwagi na to, że jest znacznie bardziej skomplikowanym procesem) przeprowadzono dla jednego wybranego przypadku – dla układu do podwodnego magazynowania energii przy użyciu sprężonego powietrza.

Konwencjonalna analiza egzergetyczna układów CAES prowadzi do następujących wniosków:

- największym źródłem destrukcji egzergii dla diabatycznego, stałoobjętościowego układu CAES są komory spalania (zwłaszcza pierwsza). Znaczące destrukcje egzergii zaobserwowano również na chłodnicach międzystopniowych sprężarki,

- w przypadku adiabatycznego, stałoobjętościowego układu CAES destrukcje egzergii były znacznie mniejsze niż dla układu diabatycznego. Dla układu A-CAES największe destrukcje egzergii uzyskano na niskoprężnej i wysokoprężnej części sprężarki,

- analiza egzergetyczna układów CAES do zastosowań mobilnych prowadzi do wniosku, że w celu poprawy osiągnięć tych układów należałoby skupić się na udoskonaleniu procesu sprężania tak, aby zmniejszyć destrukcję egzergii związaną z chłodzeniem,

- w przypadku układów stałociśnieniowych największe destrukcje egzergii zaobserwowano dla diabatycznego UWCAES, a najmniejsze dla układu adiabatycznego. Najslabszym elementem w układzie d-UWCAES była pierwsza komora spalania. Destrukcja egzergii na tym elemencie jest ponad 3-krotnie mniejsza po dodaniu do układu regeneracyjnego wymiennika ciepła.

Na zakończenie, przedstawiono zaawansowaną analizę egzergetyczną adiabatycznego układu UWCAES. Wstępne wyniki wskazują na duży potencjał ograniczania destrukcji egzergii poprzez ulepszanie poszczególnych elementów systemu, w szczególności: sprężarek, turbin i wymienników ciepła. Największą redukcję destrukcji egzergii można osiągnąć za pomocą udoskonalenia wymienników ciepła. Istnieją również elementy systemu, na które inne elementy wpływają pozytywnie (zmniejszając ich destrukcję egzergii). Te elementy to: SPS,

WPS, WPT, SPT, NPT, WC5 i WC6. Inne elementy układu mają bardzo negatywny wpływ na pompy oleju termalnego (najprawdopodobniej negatywny wpływ jest spowodowany niedoskonałością wymienników ciepła – spadkami ciśnienia). Analizy te pokazują również, że destrukcje egzergii na pompach są o rzędy wielkości mniejsze niż na innych elementach układu. Sprawność energetyczna tego układu wynosi odpowiednio 64,13% i 87,94% w warunkach rzeczywistych i nieuniknionych. Co pokazuje, że systemy tego typu posiadają bardzo duże możliwości usprawnień.

Do najważniejszych cech osiągnięcia nr I zaliczam:

- 1. Zbudowanie 6 dynamicznych i 3 statycznych modeli matematycznych różnych układów do magazynowania energii z wykorzystaniem sprężonego powietrza.**
- 2. Przebadanie i przeanalizowanie wyników otrzymanych z użyciem tych modeli pod kątem energetycznym i egzergicznym.**
- 3. Zaproponowanie rozwiązań technicznych mających na celu zmniejszenie niedoskonałości termodynamicznych dla poszczególnych typów układów CAES.**

5.5 OPIS II OSIĄGNIĘCIA

Poniżej opisane zostało II osiągnięcie naukowe pt. „Badania numeryczne i eksperymentalne wybranych metod wytwarzania i wykorzystania wodoru”, którego wyniki opublikowano w formie cyklu powiązanych tematycznie artykułów [A1-A4]. **Mój indywidualny wkład w artykułach [A1-A4] został opisany w sekcji metodologia oraz w oświadczeniach autorskich O1-O4.**

5.5.1 Geneza, cel i zakres osiągnięcia

Oprócz układów do magazynowania energii (będących tematem pierwszego osiągnięcia) w nowoczesnym systemie energetycznym bardzo ważną rolę mogą odegrać również technologie wodorowe.

Technologie wodorowe obejmują takie zagadnienia jak wytwarzanie, transport, przechowywanie oraz wykorzystanie wodoru. W ramach omawianego osiągnięcia przedstawiono aspekty związane z wytwarzaniem i wykorzystaniem wodoru do produkcji energii elektrycznej.

Z punktu widzenia wykorzystania wodoru do produkcji energii elektrycznej najbardziej użyteczne są: ogniwa paliwowe, turbiny gazowe lub silniki tłokowe. W niemniejszym osiągnięciu przedstawiono pierwszą z wymienionych technologii.

Ogniwo paliwowe to urządzenie elektrochemiczne, które konwertuje energię chemiczną paliwa na energię elektryczną w sposób bezpośredni. Do głównych zalet ogniw paliwowych należy zaliczyć: potencjalnie wysoką sprawność generacji energii elektrycznej; niskie poziomy emisji zarówno gazów jak i hałasu oraz drgań; niezawodność; modułarność; dobre charakterystyki przy częściowych obciążeniach.

Obecnie rozwijanych jest wiele typów ogniw paliwowych różniących się między sobą pod wieloma względami, od temperatury pracy do tolerancji na zawartość zanieczyszczeń w paliwie i utleniaczu. Najbardziej popularnym typem jest ogniwo, w którym elektrolitem jest polimerowa membrana (ang. Polymer Exchange Membrane Fuel Cell–PEMFC). Jest to jednak także najdroższe z ogniw (wymagany platynowy katalizator) oraz o stosunkowo słabej tolerancji na zanieczyszczenia (takie jak np. tlenek węgla). W omawianym osiągnięciu naukowym przedstawiono zalety ogniw wysokotemperaturowych (SOFC – ang. solid oxide fuel cell, stałotlenkowe ogniwo paliwowe i MCFC – ang. Molten carbonate fuel cell, węglanowe ogniwo paliwowe) z uwagi na koszty ich produkcji i częstsze zastosowanie w energetyce.

Wysoka temperatura pracy tego urządzenia mogłaby być uważana za minus, jednakże dzięki temu ogniwo takie może być głównym źródłem ciepła dla innego urządzenia np. turbiny gazowej czy silnika Stirlinga, nie mówiąc już o rozwiązaniach kogeneracyjnych.

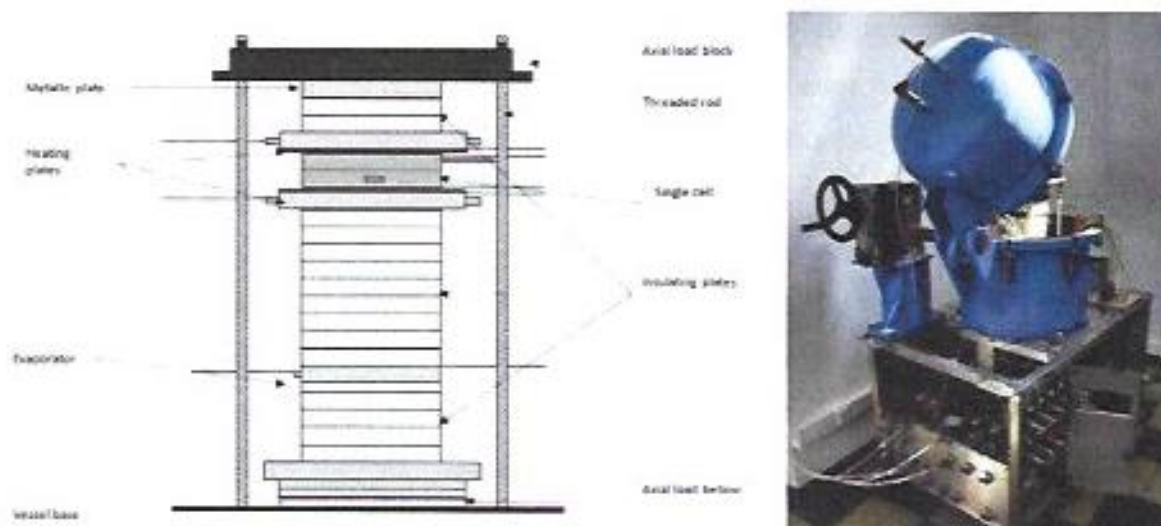
Wodór może być produkowany w wyniku elektrolizy wody jak również w wyniku reformingu parowego metanu. Ta druga metoda jest najbardziej rozpowszechnionym na świecie sposobem pozyskiwania wodoru i właśnie ona jest tematem jednego z artykułów wchodzących w skład cyklu publikacji stanowiących drugie osiągnięcie naukowe.

5.5.2 Metodologia

Zastosowaną w osiągnięciu nr II metodologią było modelowanie matematyczne, symulacja cyfrowa a także badania eksperymentalne.

Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne z artykułów [A2] i [A4] przeprowadziłem osobiście na stanowisku laboratoryjnym Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. Stanowisko to pozwala na zautomatyzowany pomiar parametrów procesu. Istnieje możliwość ustawienia temperatury pracy ogniwa oraz przepływu różnych gazów zasilających ogniwo. Stanowisko laboratoryjne pokazane jest na Rys. 31.



Rys. 31. Stanowisko do badań eksperymentalnych znajdujące się w laboratorium ogniw paliwowych Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej: układ stosu (po lewej), widok ogólny (po prawej) [18]

Stanowisko doświadczalne składa się ze zintegrowanego urządzenia elektronicznego wyposażonego w elementy kontrolno-regulacyjne (termopary, termostaty, grzałki elektryczne, przepływomierze, pomiary prądu i napięcia oraz regulatory), a całość sterowana jest za pomocą oprogramowania stworzonego w środowisku LabView. Stanowisko doświadczalne jest podłączone do gazów zasilających ogniwo: wodoru, CO_2 , N_2 i sprężonego powietrza. W przypadku badań związanych z reformingiem parowym dodatkowymi elementami niezbędnymi do przeprowadzenia eksperymentów były: metan dostarczany z butli oraz woda dostarczana za pomocą pompy perystaltycznej. Przez kanał anodowy wypełniony katalizatorem doprowadzana była woda zmieszana z metanem, która podgrzewana była do wymaganej temperatury za pomocą grzałek elektrycznych, które jednocześnie utrzymywały temperaturę ogniwa paliwowego na wymaganym poziomie. Do kanału katodowego doprowadzano CO_2 i powietrze, które ogrzewano do wymaganej temperatury.

Modelowanie matematyczne

Model sztucznej sieci neuronowej

W artykule [A1] wykorzystałem model sztucznej sieci neuronowej do przewidywania zmian zapotrzebowania na energię elektryczną aby dzięki znajomości predykcji zapotrzebowania wyznaczyć strategię sterowania stosem ogniw paliwowych SOFC. Sposób działania tego modelu przedstawiono poniżej.

Po dostarczeniu danych na wejście neuronu każdą wartość mnoży się przez wagę odpowiadającą wejściu ($w_{k,i,j}$), po czym wszystkie te wielkości sumuje się ($s_{k,i}$) – równanie (32). Do tej sumy dodawane jest tzw. bias ($x_{k,0}$). Wynik tego jest przetwarzany przez funkcję

aktywacji neuronu (patrz równanie (33)). W ten sposób generowana jest odpowiedź ($y_{k,i}$) na zadany sygnał wejściowy neuronu. Wyjścia z warstwy poprzedniej są wejściami warstwy następnej, z jednym wyjątkiem – warstwy ostatniej, gdzie wyjścia poszczególnych neuronów są odpowiedzią całego modelu.

W obliczeniach omawianego modelu założono, że funkcją aktywacji neuronów jest tangens hiperboliczny dla wszystkich neuronów poza ostatnią warstwą, dla której funkcją aktywacji jest funkcja liniowa.

Podczas obliczeń informacje przekazywane są sukcesywnie od pierwszej do ostatniej warstwy sieci. Odpowiedzi neuronów w ostatniej warstwie modelu są parametrami wyjściowymi sztucznej sieci neuronowej.

Jako podstawowy algorytm uczenia przyjęto metodę wstecznej propagacji błędów, która jest uogólnionym sposobem uczenia sieci zaproponowanym przez Widrowa i Hoffa i jest stosowana dla sieci wielowarstwowych z nieliniowymi, ale różniczkowalnymi funkcjami aktywacji neuronów. Szczegółowy opis procedury można znaleźć w [19].

Poniżej znajdują się główne równania tej procedury.

$$s_{k,i} = \sum_{j=0}^{N_{k-1}} w_{k,i,j} \cdot x_{k,j} \quad (32)$$

$$y_{k,i} = f(s_{k,i}) \quad (33)$$

$$\varepsilon_{L,i} = d_{L,i} - y_{L,i} \quad (34)$$

$$\delta_{k,i} = \varepsilon_{k,i} \cdot \frac{\partial f(s_{k,i})}{\partial (s_{k,i})} \quad (35)$$

$$\varepsilon_{k,i} = \sum_{m=1}^{N_{k+1}} \delta_{k+1,m} \cdot w_{k+1,m,i} \quad \text{dla } k=1, 2, \dots, L-1 \quad (36)$$

$$w_{k,i,j}^{n+1} = w_{k,i,j}^n + 2 \cdot \eta \cdot \delta_{k,i} \cdot x_{k,j} + \alpha \cdot (w_{k,i,j}^n - w_{k,i,j}^{n-1}) \quad (37)$$

gdzie: η – sprawność uczenia; x – wejścia; w – wagi; s – suma iloczynów wejść i wag; ε – błędy; d – dane eksperymentalne; y – odpowiedzi sieci; α – parametr poprawiający proces uczenia tzw. „momentum”.

Proces uczenia sztucznej sieci neuronowej dąży do minimalizacji sumy kwadratów błędów [20]:

$$E(x, w) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M e_{p,m}^2 \quad (38)$$

gdzie: x – wektor wejść, w – wektor wag, p – indeks danych referencyjnych, P – liczba danych referencyjnych, m – indeks danych wyjściowych, M – liczba wyjść, $e_{p,m}$ – różnica (błąd uczenia) pomiędzy parametrem wyjściowym o indeksie m a parametrem referencyjnym o indeksie p .

Do zbudowania modelu sztucznej sieci neuronowej wykorzystano komercyjny program – Matlab. Aby przyspieszyć proces uczenia się, wykorzystano algorytm Levenberga-Marquardta [19,20].

Algorytm ten można opisać następująco:

$$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} J_k \cdot e_k \quad (39)$$

gdzie: k – numer kroku, J – macierz Jacobiego (równanie (40)), μ – współczynnik kombinacji (zawsze dodatni), I – macierz tożsamości, e – błąd.

Macierz Jacobiego dla sztucznych sieci neuronowych można opisać następującym wzorem [20]:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_{p,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{p,2}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{p,2}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{p,M}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{p,M}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{p,M}}{\partial w_N} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Zbyt rozbudowana sieć neuronowa może być narażona na zjawisko przetrenowania.

Oznacza to, że sieć zapamiętuje przykłady w trakcie uczenia się, ale nie może uogólniać wyników (nie radzi sobie z nowymi danymi). Dlatego sieć nie powinna być nadmiernie skomplikowana. Ponadto optymalne parametry regularyzacji zastosowano w sposób zautomatyzowany – wykorzystując regułę Bayesa.

Takie podejście nie wymaga dzielenia bazy danych na dwie części (do nauki i testowania). Regularyzacja bayesowska czyni model bardziej ogólnym – to główna zaleta wykorzystania tego algorytmu do uczenia sieci. Oznacza to, że model można zweryfikować przy użyciu tej samej partii danych. Wagi sieci przyjmuje się jako zmienne losowe o określonych rozkładach prawdopodobieństwa. Parametry regularyzacji są powiązane z nieznanymi zmianami związanymi z tymi rozkładami. Oszacowania tych parametrów można dokonać za pomocą technik statystycznych. Przy tych założeniach obliczanie funkcji gęstości wag można opisać za pomocą reguły Bayesa:

$$P(w|D, \alpha, \beta, M) = \frac{P(D|w, \beta, M)P(w|\alpha, M)}{P(D|\alpha, \beta, M)} \quad (41)$$

gdzie: D – zestaw danych, M – model użytej sztucznej sieci neuronowej, w – wektor wag sztucznej sieci neuronowej, $P(w|\alpha, M)$ – gęstość prawdopodobieństwa, która odzwierciedla wiedzę o wagach przed zebraniem jakichkolwiek danych, $P(D|w, \beta, M)$ – prawdopodobieństwo otrzymania danych dla wag w , $P(D|\alpha, \beta, M)$ – współczynnik normalizacyjny, który powoduje, że suma prawdopodobieństw jest równa 1.

Szczegółowy opis regularyzacji Bayesa w powiązaniu z algorytmem Levenberga-Marquarda opisano w [21].

Stosowanie metody uczenia z algorytmem Levenberg'a-Marquardt'a i regularyzacją Bayesa jest istotne, aby algorytm mógł działać aż do osiągnięcia zbieżności na kluczowych parametrach. Proces uczenia kończy się po wyświetleniu komunikatu „osiągnięto maksymalną liczbę MU”. Szczegółowy opis parametrów algorytmu uczenia można znaleźć w [19].

Model reformingu parowego

W celu otrzymania składu gazów zasilających ogniwo paliwowe pracujące z użyciem paliw węglowodorowych (a także alkoholi itp.) w artykułach [A3] i [A4] posłużyłem się kinetycznym modelem matematycznym procesu reformingu tychże paliw. Model ten opisano poniżej.

Szybkość reakcji zależy od wielu czynników, takich jak reakcja wiodąca, temperatura, obecność katalizatora itp. Obecnie do określenia przebiegu reakcji można zastosować różne techniki oparte na narzędziach numerycznych. Obliczenia te wymagają jednak indywidualnego podejścia, z jednej strony z uwagi na trudne zagadnienia, a z drugiej na algorytmy obliczeniowe umożliwiające automatyczne obliczenia [22].

Ogólnie reakcję chemiczną można zapisać w następującej formie:



gdzie: $a, b, \dots, k, l, \dots$ oznaczają liczbę moli poszczególnych substancji $A, B, \dots, K, L, \dots$ biorące udział w reakcjach chemicznych i nazywane są współczynnikami stechiometrycznymi. W ogólnej reakcji chemicznej opisanej równaniem (42), małe litery a, b, k i l reprezentują współczynniki stechiometryczne, podczas gdy produkty i substraty reakcji są reprezentowane odpowiednio przez K i L oraz A i B .

Szybkość reakcji chemicznej r w zamkniętym układzie o stałej objętości można zatem zapisać zgodnie z równaniem (43).

$$r = -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{k} \frac{d[K]}{dt} = \frac{1}{l} \frac{d[L]}{dt} \quad (43)$$

gdzie $[i]$ oznacza stężenie składnika i .

$$r = \frac{d[A]}{dt} \quad (44)$$

Stopień reakcji wraz z ciśnieniem cząstkowym reagentów i pewnymi, stałymi parametrami można skorelować. Równanie szybkości reakcji można znaleźć, łącząc współczynnik reakcji k z bilansem masowym rozważanego układu. Najprostszą postać równania na możliwość wystąpienia w reakcji składników A i B opisuje równanie. (45) [22].

$$r = k \cdot [A]^a \cdot [B]^b \cdot [X]^x \quad (45)$$

gdzie: k – współczynnik szybkości reakcji, $[]$ – stężenia reagentów, $[X]$ – wpływ katalizatora; a, b, c, x – współczynniki (rzędy reakcji) uwzględniające rodzaj katalizatora oraz rodzaj reakcji i mechanizm reakcji.

Rząd reakcji jest związany z algebraicznym sumowaniem wykładników w równaniu (45). Teoretycznie wartości te powinny odpowiadać współczynnikom stechiometrycznym reakcji. W rezultacie nie można określić kolejności reakcji na podstawie równania reakcji chemicznej. Rząd reakcji wpływa na szybkość reakcji. Okres półtrwania reakcji oznacza czas potrzebny do przereagowania połowy odczynników (na przykład okres półtrwania plutonu można określić za pomocą reakcji pierwszego rzędu). W przypadku reakcji zachodzących w układzie przepływowym stopień reakcji wynika z szybkości reakcji i jest powiązany z zachowaniem reagentów. Odpowiednie współczynniki równania (45) można znaleźć eksperymentalnie. Wpływ temperatury na szybkość reakcji k określa równanie Arrheniusa (46).

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (46)$$

gdzie E_a jest energią aktywacji, a A jest współczynnikiem przedwykładniczym. Wartości A i E_a są różne dla poszczególnych reakcji. Istnieją również bardziej złożone zależności opisujące wpływ temperatury. Wzory te nie są zgodne z równaniem podanym powyżej.

W kinetyce reakcji chemicznych szybkość reakcji k (współczynnik szybkości) określa szybkość reakcji. Wartość współczynnika szybkości reakcji zależy od parametrów takich jak temperatura, powierzchnia adsorbentu, siła jonowa i promieniowanie świetlne. W przypadku reakcji elementarnych równanie szybkości można wyznaczyć na podstawie m.in. teorii kolizji. Równanie szybkości reakcji wieloetapowej należy wyznaczyć doświadczalnie.

Aby wyznaczyć stężenie produktów reakcji w stanie nierównowagowym, należy wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- Charakter reakcji: Reakcje różnią się szybkością, liczbą reagentów, fazą, w której zachodzi reakcja (gazowa, ciekła lub stała), złożonością układu reakcyjnego.
- Stężenie: Współczynnik szybkości jest wyższy dla wyższych stężeń zgodnie z prawem szybkości i teorią zderzeń. Im wyższe stężenia odczynników, tym większe prawdopodobieństwo kolizji.
- Ciśnienie: Szybkość reakcji w fazie gazowej wzrasta wraz z ciśnieniem, co bezpośrednio koreluje ze stężeniem gazu.
- Rząd: Rząd reakcji określa wpływ stężenia (lub ciśnienia) odczynnika na współczynnik szybkości.
- Temperatura: Wzrost temperatury powoduje wyższy współczynnik szybkości.

Zwykle wzrost temperatury o 10°C powoduje podwojenie szybkości reakcji.

Współczynniki zwykle otrzymuje się w wyniku aproksymacji danych z eksperymentu i przy zastosowaniu kilku metod opartych na założeniach teoretycznych. W przypadku równania Arrheniusa potrzebne są dodatkowe dane do obliczenia szybkości reakcji. Zwykle wykorzystuje się to do określenia wpływu temperatury lub porównania przebiegu reakcji w bieżącej temperaturze.

W zakresie analizy błędów przewidywania modelu porównano z wartościami zmierzonymi. Metoda wyznaczenia błędu predykcji polega na obliczeniu średniego bezwzględnego błędu procentowego (MAPE) zgodnie z równaniem (47).

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (47)$$

gdzie: A_t – wartość zmierzona dla t -tego punktu danych, F_t – wartość przewidywana przez model dla t -tego punktu danych, n – całkowita liczba punktów danych.

Model matematyczny ogniwa paliwowego

W związku z tym, że nie jestem autorem modelu matematycznego ogniwa paliwowego MCFC z artykułu [A4], model ten nie został opisany w autoreferacie.

Z kolei model stosu ogniw paliwowych SOFC z artykułu [A1] miał bardzo uproszczoną postać. Był to wielomian opisujący sprawność stosu w funkcji jego obciążenia.

5.5.3 Syntetyczny opis otrzymanych wyników

Wspomagana SSN strategia sterowania SOFC

Z analizy z artykułu [A1] wynika, że sztuczna sieć neuronowa powinna składać się z trzech warstw: wejściowej, ukrytej i wyjściowej. Liczba neuronów w warstwie wejściowej i wyjściowej zależy od liczby parametrów wykorzystywanych jako wejście i wyjście sieci, natomiast liczba neuronów w warstwie ukrytej jest określana poprzez serię testów podczas procedury uczenia sieci.

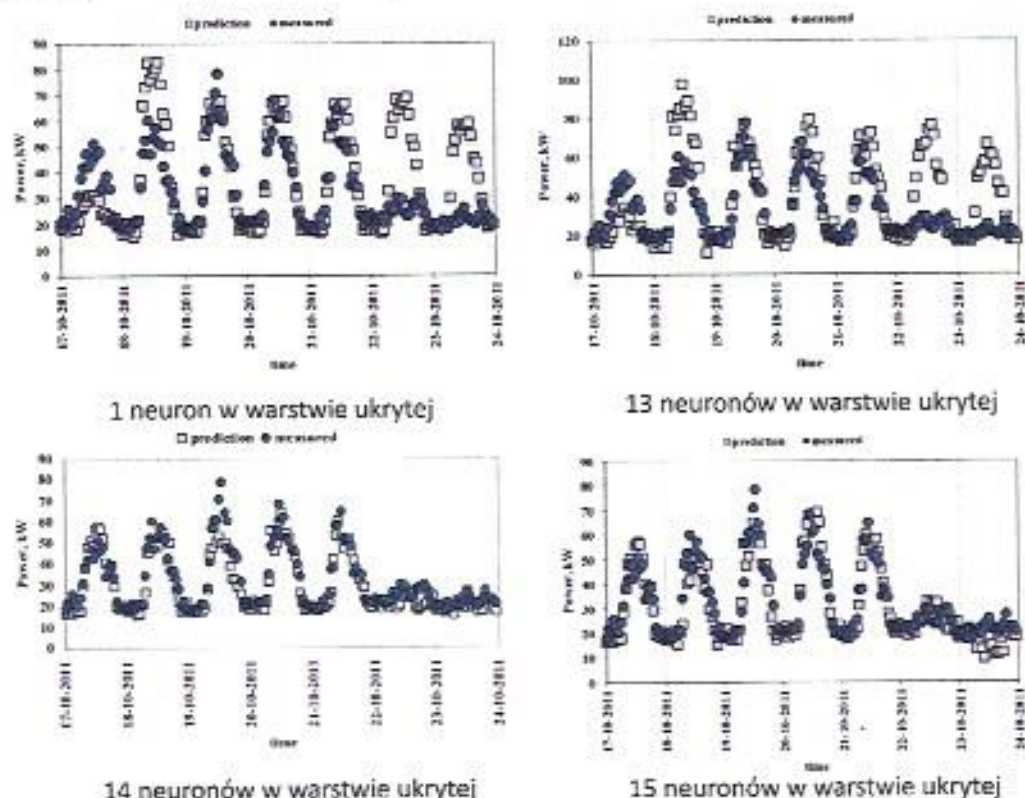
Sieć posiadała 25 wejść. Jednym z nich jest dzień tygodnia a resztę stanowi obciążenie w każdej godzinie z dnia poprzedniego. Warstwa wyjściowa składa się z 24 neuronów odzwierciedlających oczekiwane obciążenie na każdą godzinę następnego dnia. Funkcja aktywacji neuronów dla warstwy wejściowej i ukrytej była tangensem hiperbolicznym, a dla warstwy wyjściowej funkcją liniową.

Przebadano 25 konfiguracji sieci: od 1 do 25 neuronów w warstwie ukrytej. Stwierdzono, że najlepszą architekturę posiada sieć w konfiguracji 25-14-24 (warstwa wejściowa-warstwa ukryta-warstwa wyjściowa), ponieważ zapewnia wystarczające działanie przy najmniejszej liczbie neuronów.

Sztuczna sieć neuronowa została nauczona przy użyciu danych obejmujących zapotrzebowanie na energię elektryczną budynku Instytutu Ciepłowni Politechniki Warszawskiej za okres od 08.10.2011 do 15.10.2011 (czyli na danych historycznych). Obciążenie w dniu 17.10.2011 otrzymane zostało poprzez podanie na wejściach sieci informacji o zapotrzebowaniu w dniu 16.10.2011 oraz o dniu tygodnia (1-7). Uzyskane w ten sposób dane można wykorzystać do wygenerowania krzywej obciążenia na dzień 18.10.2011 i tak dalej. Dzięki temu wygenerowano zapotrzebowanie na energię elektryczną w okresie od 17.10.2011 do 23.10.2011.

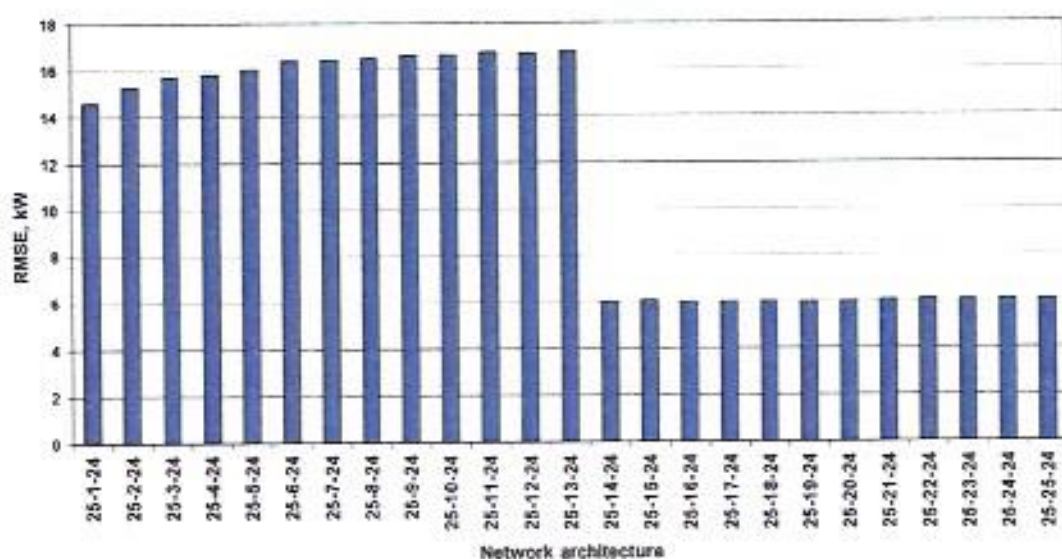
Przetestowano sieci zawierające od 1 do 25 neuronów w warstwie ukrytej. Porównanie predykcji zapotrzebowania na energię elektryczną z wykorzystaniem sztucznej sieci

neuronowej z danymi rzeczywistymi (dla okresu od 17.10.2011 r. do 23.10.2011 r.) dla kilku wybranych przykładów pokazano na Rys. 32.



Rys. 32. Porównanie predykcji zapotrzebowania na energię elektryczną z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej z danymi rzeczywistymi (dla okresu od 17.10.2011 r. do 23.10.2011 r.) dla sieci zawierających 1, 13, 14 i 15 neuronów w warstwie ukrytej

Wyniki dla różnej konfiguracji sztucznej sieci neuronowej (od 1 do 25 neuronów w warstwie ukrytej) porównano za pomocą błędu średniokwadratowego (RMSE) - Rys. 33.



Rys. 33. Porównanie błędów średniokwadratowych (RMSE) dla różnych konfiguracji sztucznej sieci neuronowej

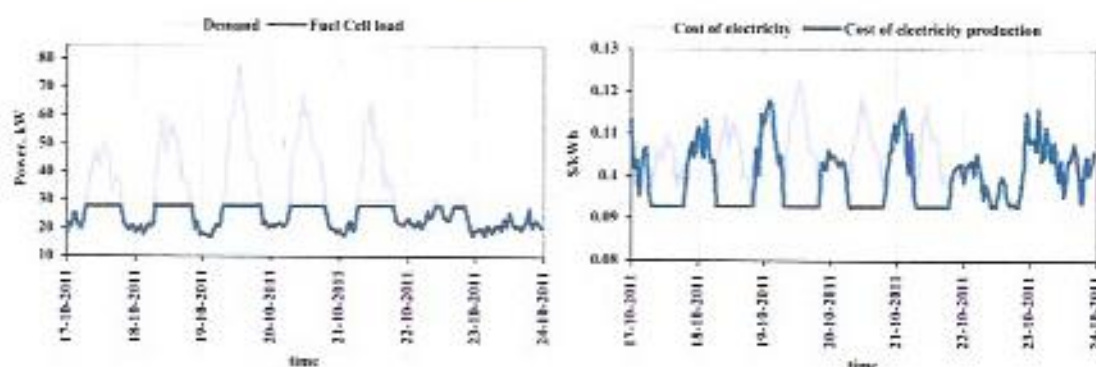
Najlepsza okazała się sieć o strukturze 25-14-24, ponieważ dawała rozsądne wyniki przy najmniejszej liczbie neuronów.

Dla danych gencrowanych przez sztuczną sieć neuronową przeprowadzono symulację pracy stosu ogniów SOFC.

Optymalny sposób zaspokojenia potrzeb rozpatrywanego budynku przy wykorzystaniu stosu ogniów SOFC i sieci energetycznej pokazano na Rys. 34.

Zysk został tutaj zdefiniowany jako uniknięty koszt zakupu energii elektrycznej, pomniejszony o koszt jej wytworzenia we własnym źródle (w momencie, gdy jest to tańsze niż zakup energii z sieci elektroenergetycznej).

Z Rys. 34 wynika, że ogniwo paliwowe pracuje w sposób ciągły, a jego wielkość dobiera się tak, aby 60% obciążenia było równe minimalnemu zapotrzebowaniu. W przypadku niespodziewanego spadku obciążenia należy sprzedać nadprodukcję energii elektrycznej, aby uniknąć niepotrzebnego włączania i wyłączania ogniwa (co skraca jego żywotność).



Rys. 34. Zapotrzebowanie na moc elektryczną i optymalne obciążenie stosu ogniów paliwowych (po lewej); koszt energii elektrycznej i koszt jej produkcji za pomocą stosu ogniów SOFC (po prawej)

Koszt wytworzenia energii elektrycznej oraz jej koszt przy zastosowanej strategii sterowania przedstawiono na Rys. 34. Koszt wytworzenia energii elektrycznej osiąga wartości w przedziale od 0,09 \$/kWh do prawie 0,12 \$/kWh i jest zależny od rzeczywistej sprawności ogniwa.

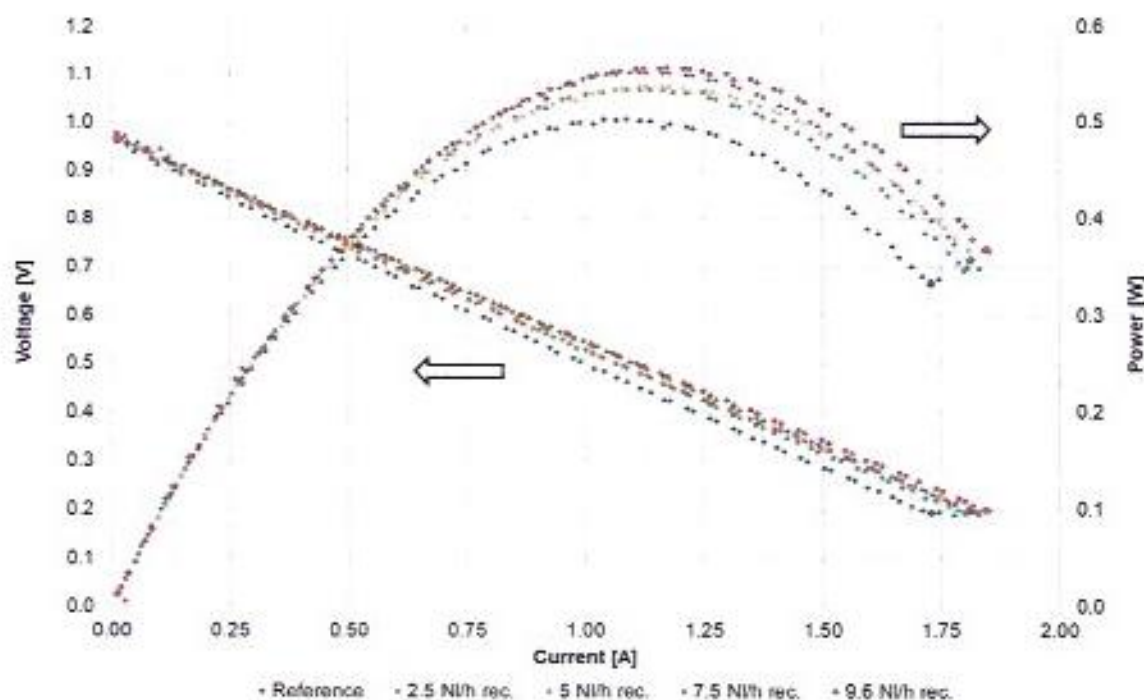
Natomiast koszt energii elektrycznej wynosił od 0,09 \$/kWh (ogniwo pracujące z maksymalną sprawnością bez energii elektrycznej z sieci) do wartości nieco powyżej 0,12 \$/kWh (energia elektryczna zakupiona z sieci + ogniwo pracujące z maksymalną sprawnością). W efekcie opisaną powyżej strategii średni koszt energii elektrycznej jest zawsze niższy od kosztu jej zakupu z sieci.

W rozpatrywanym tygodniu różnica w kosztach zmiennych wynikająca z zastosowania stosu ogniów SOFC wyniosła około 555 \$ tygodniowo. Po uwzględnieniu kosztów stałych (związanych z zakupem paliwa gazowego) przychody z proponowanego rozwiązania osiągnęły poziom 546 \$ tygodniowo.

Recyrkulacja SOFC

Reakcja elektrochemiczna w ogniwie SOFC generuje znaczną ilość wody poprzez połączenie cząsteczek wodoru z tlenem ekstrahowanym z powietrza dostarczanego do kanału katodowego. Strumień poddany recyklingowi zawiera parę wodną, która krąży w pętli poddanej recyklingowi. W analizie z artykułu [A2] zaproponowano i zbadano układ recyrkulacji anodowych gazów odlotowych z całkowitym usunięciem wody. W pracy zadano osiągi pojedynczego ogniwa SOFC pracującego przy różnych stopniach recyrkulacji z użyciem chłodziarki do usunięcia wody z recyrkulowanego strumienia. Kwantyfikację poprawy sprawności przeprowadzono na podstawie analizy wzrostu napięcia ogniwa pracującego przy danej gęstości prądu. Badanie eksperymentalne wykazało, że osiągi pojedynczego ogniwa SOFC można zwiększyć o 18–31%.

Do ogniwa po stronie anody doprowadzano 4 NI/h nawilżonego wodoru i 30 NI/h powietrza po stronie katody. Zastosowanie pompy perystaltycznej umożliwiło precyzyjne ustawienie przepływu recyrkulowanego za ogniwem SOFC. W analizie wzięto pod uwagę cztery różne poziomy recyrkulacji: (i) 2,5 NI/h (co odpowiada 38,46% recyrkulacji), (ii) 5,0 NI/h (55,56% recyrkulacji), (iii) 7,5 NI/h (65,22% recyrkulacji), oraz (iv) 9,6 NI/h (70,59% recyrkulacji). Wyniki przedstawiono na Rys. 35. Zaobserwowano, że recyrkulacja poprawia parametry elektrochemiczne ogniwa paliwowego ze stałym tlenkiem. Jak widać na Rys. 35 wraz ze wzrostem stopnia recyrkulacji następuje wzrost mocy elektrycznej, pobieranej z ogniwa.



Rys. 35. Wpływ recyrkulacji na osiągi pojedynczego ogniwa SOFC [A2]

Należy zauważyć, że zastosowanie recyrkulacji zwiększa całkowity stopień wykorzystania paliwa. W takim przypadku ogniwo może pracować z większą gęstością prądu przy danym przepływie paliwa. Możliwe jest zatem pobranie większej ilości energii elektrycznej z ogniwa, którego moc w przeciwnym razie byłaby ograniczona dostępnością paliwa. Taka strategia pozwala na redukcję ilości paliwa dostarczanego do ogniw paliwowych typu SOFC czy MCFC.

Reforming parowy metanu, biogazu i DME

Na podstawie danych literaturowych [23–25] można zidentyfikować siedem głównych reakcji chemicznych reformingu parowego metanu, biogazu i eteru dimetylowego (DME).



Reakcje opisane równaniami (48) i (49) odpowiadają reformingowi parowemu metanu i biogazu. Reforming parowy DME opisany jest przy pomocy równań (49) - (53). Zgodnie z [23] współczynniki równowagi reakcji dla równań (48) i (49) można wyrazić następująco:

$$k = 1.198 \cdot 10^{17} e^{\frac{-26830}{T}} \quad (54)$$

$$k = 1.767 \cdot 10^{-2} e^{\frac{440}{T}} \quad (55)$$

Współczynniki te można wykorzystać do modelowania reformingu metanu i biogazu po wykonaniu pewnych obliczeń, wiedząc, że równanie opisujące kinetykę jest następujące:

$$k = A e^{\frac{E}{RT}} \quad (56)$$

gdzie: A i E są współczynnikami, które można bezpośrednio użyć w programie

Aspen HYSYS, a B jest uniwersalną stałą gazową. Współczynniki te podsumowano w Tab. 5.

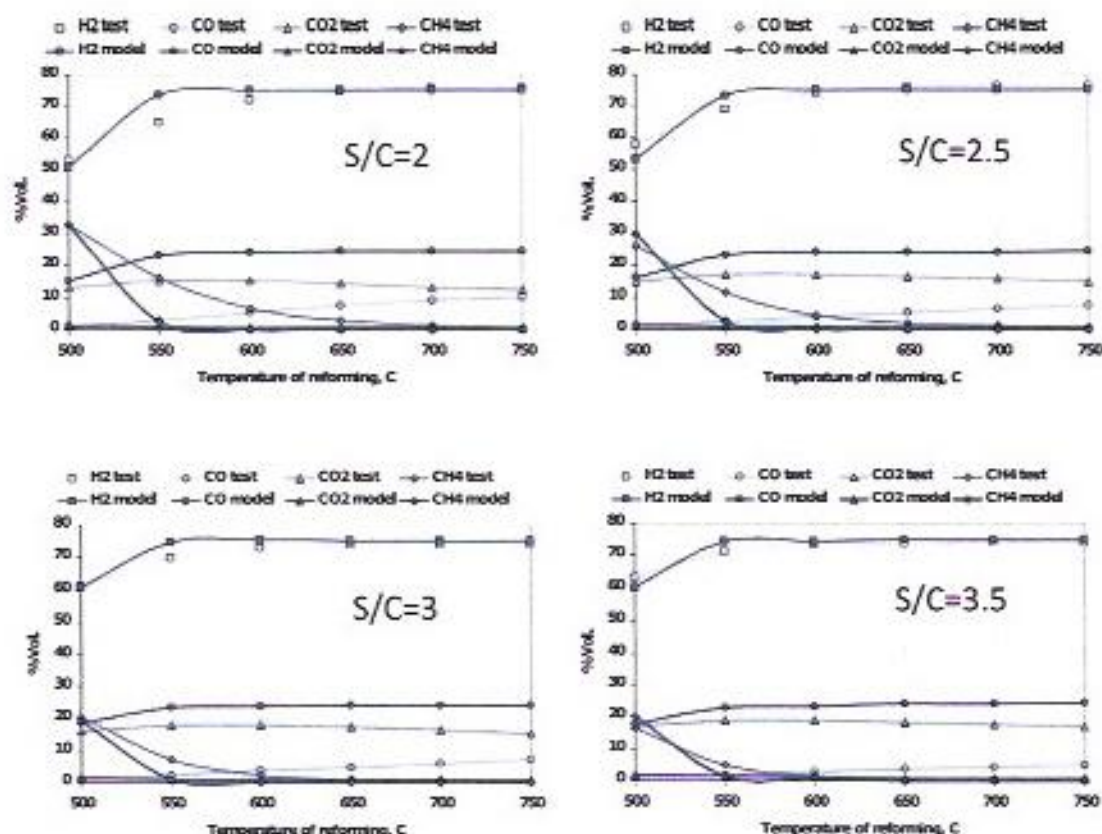
Tab. 5 Współczynniki do równania (56) obliczone na podstawie literatury [23]

Reakcja	A	E, kJ/kmol
(48)	$1,198 \cdot 10^{17}$	223 091
(49)	$1,767 \cdot 10^{-2}$	-36 586

Zastosowanym tutaj modelem czynnika roboczego był UNIQUAC (zastosowany w programie Aspen HYSYS).

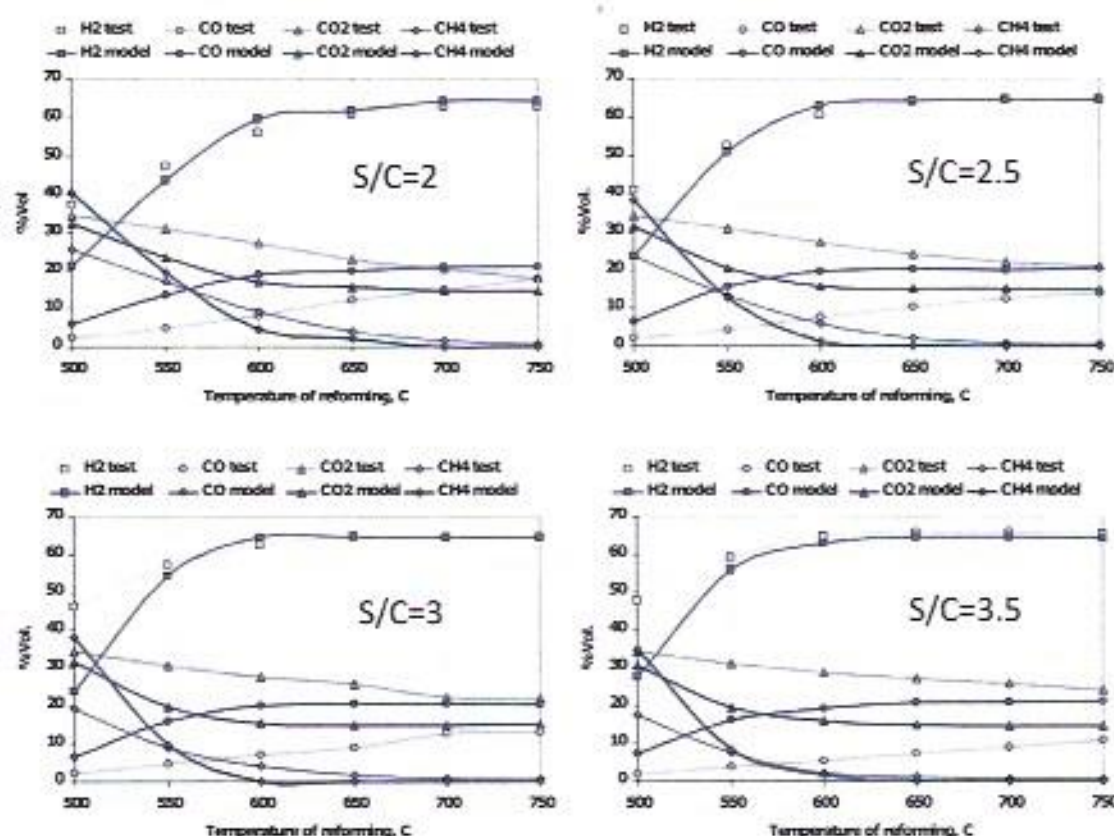
Wykonanie modelu składa się z dwóch etapów. W pierwszym kroku wykorzystano dane literaturowe do oceny funkcjonalności narzędzia numerycznego i porównania wartości teoretycznych z przewidywaniami modelu. W drugim etapie wykorzystano dane eksperymentalne [26–28] dotyczące konkretnego wymiennika ciepła z wkładem katalitycznym. W artykule [A3] przebadano cztery wartości stosunku pary wodnej do węgla (S/C): 2,0, 2,5, 3,0, 3,5.

Wyniki uzyskane z modelu reformingu parowego metanu w zakresie temperatur od 500 do 750°C przedstawiono na Rys. 36. Przewidywania modelu pokrywają się z danymi eksperymentalnymi w temperaturach przekraczających 650°C. Zwiększenie stosunku pary do węgla pomaga w osiągnięciu konwergencji w temperaturach pośrednich (550-650°C).



Rys. 36. Wyniki dla metanu. Porównanie wyników uzyskanych z modelu matematycznego opartego na współczynnikach kinetycznych z literatury z danymi eksperymentalnymi

Analiza wyników uzyskanych z modelu opartego na danych literaturowych dla biogazu (Rys. 37) wskazuje na rozbieżność w temperaturach pośrednich (500-600°C). Wyniki pokazane na Rys. 37 pokazują, że niezgodność danych eksperymentalnych z modelem opartym na danych z literatury obserwuje się aż do osiągnięcia temperatury 650°C. Można to wytłumaczyć faktem, że model opierał się wyłącznie na współczynnikach kinetycznych z literatury [23] i został przetestowany z wykorzystaniem danych z eksperymentów przeprowadzonych w Instytucie Energetyki [27]. Katalizator dla danych literaturowych z [23] jest inny niż ten z [26-28].



Rys. 37. Wyniki dla biogazu (60% obj. CH_4 i 40% obj. CO_2). Porównanie wyników uzyskanych z modelu opartego na współczynnikach kinetycznych z literatury z danymi eksperymentalnymi

W literaturze nie znaleziono natomiast wszystkich współczynników kinetyki reakcji dla reformingu DME aby użyć je do zbudowanego wcześniej modelu. Dla równań opisujących reakcje biorące udział w procesie reformingu DME znaleziono jedynie energie aktywacji, co nie wystarczyło aby wygenerować wyniki na danych literaturowych dla tego paliwa.

W następnym kroku przeprowadzono kalibrację modelu z użyciem danych eksperymentalnych. W trakcie kalibracji modelu założono wykorzystanie współczynników skalibrowanych dla metanu również do symulacji biogazu.

Ponieważ współczynniki dla eteru dimetylowego zostały wybrane oddzielnie, większość reakcji opisujących proces reformingu DME różni się od reformingu dwóch poprzednich paliw (z wyjątkiem konwersji tlenku węgla z parą wodną (49)). Skalibrowany model jest w stanie obliczyć reakcje reformingu dla wszystkich trzech rozpatrywanych paliw, ponadto wykorzystując reakcje opisane równaniami (51) i (53) uzupełnione reakcją konwersji tlenku węgla (49) można przeprowadzić proces reformingu metanolu (aczkolwiek nie było to celem tego badania).

W przypadku równań opisujących reforming DME energie aktywacji zaczerpnięto z literatury i przedstawiono w Tab. 6

Tab. 6 Energie aktywacji dla reakcji reformingu DMT (w przypadku reakcji konwersji tlenku węgla z parą wodną – Tab. 5)

Reakcja	E, kJ/kmol	Źródło
(50)	173 900	[24]
(51)	107 300	[24]
(52)	114 800	[24]
(53)	57 000	[25]

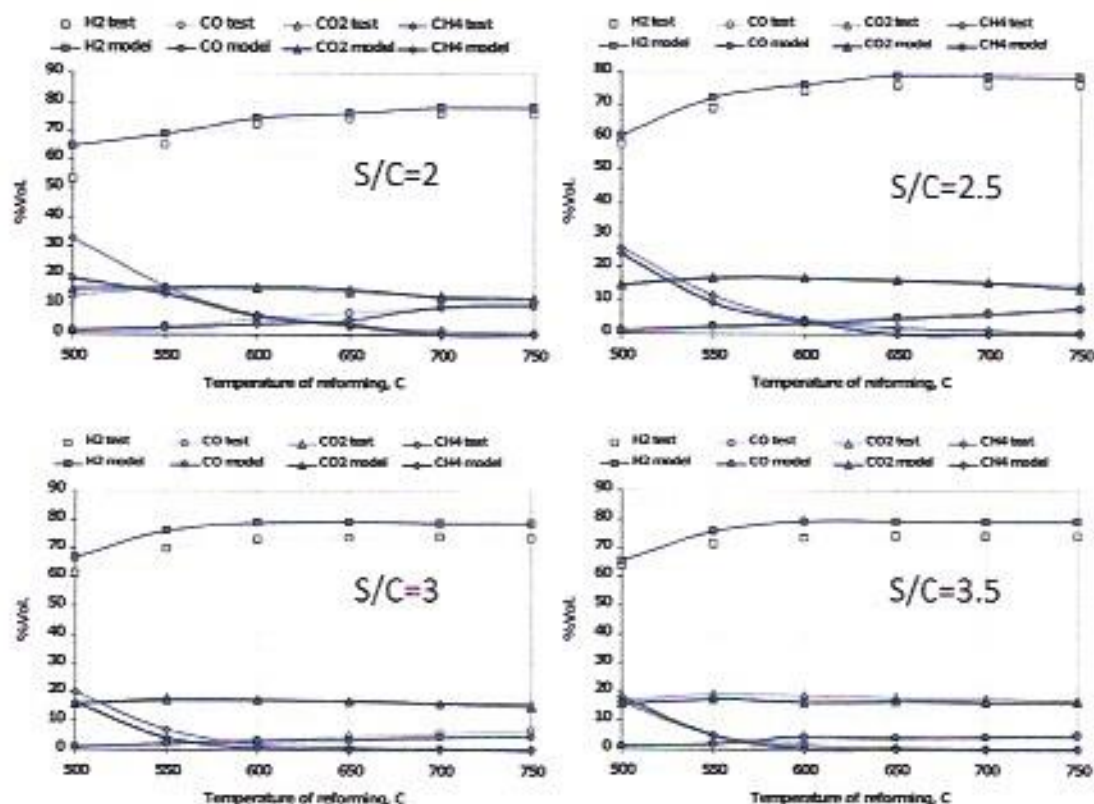
Współczynniki kinetyczne (do zastosowania w równaniu (56)) reakcji po kalibracji modelu matematycznego opisano w Tab. 7.

Tab. 7 Współczynniki kinetyki reakcji po kalibracji modelu matematycznego

Reakcja	A	E, kJ/kmol
(48)	$2,5 \cdot 10^{16}$	223 091
(49)	$1,767 \cdot 10^{-2}$	-36 586
(50)	$1,0 \cdot 10^{16}$	173 900
(51)	$1,0 \cdot 10^5$	107 300
(52)	$1,0 \cdot 10^{10}$	114 800
(53)	$2,0 \cdot 10^{17}$	57 000

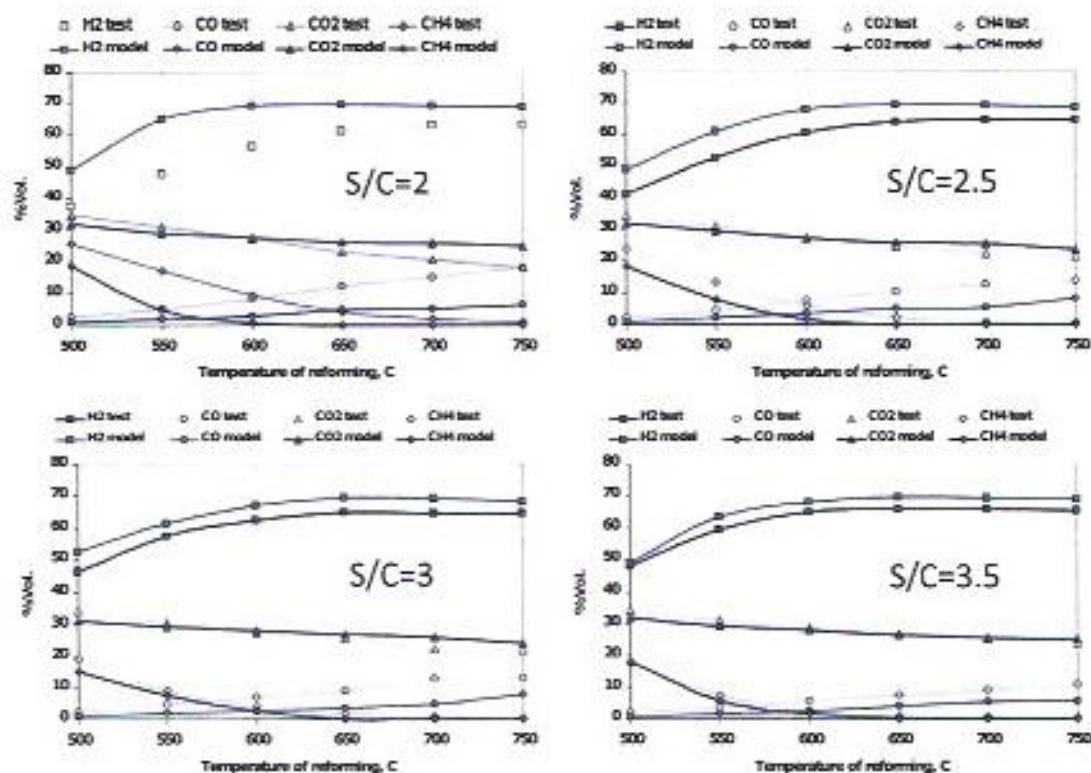
Dane zawarte w Tab. 7 wskazują, że podczas kalibracji modelu zmieniały się jedynie współczynniki A, natomiast energie aktywacji były takie same (jak podano w literaturze). Energie te zależą głównie od obecności katalizatora i jego rodzaju. Energia aktywacji jest niższa w przypadku bardziej efektywnych katalizatorów. Ponieważ wszystkie opisane powyżej energie aktywacji zostały wyznaczone na podstawie eksperymentów przeprowadzonych w obecności stabilnych i wysokiej jakości katalizatorów [23–25], założenie o pozostawieniu ich bez zmian jest uzasadnione.

Po zakończeniu kalibracji model wykorzystano do symulacji reformingu metanu. Uzyskane wyniki można zobaczyć na Rys. 38. Zgodność z danymi eksperymentalnymi była stosunkowo dobra (względny błąd przewidywania poniżej 5%). Nieznaczny wzrost błędu zaobserwowano dla wyższych stosunków S/C (względny błąd przewidywania w zakresie 7-9%).



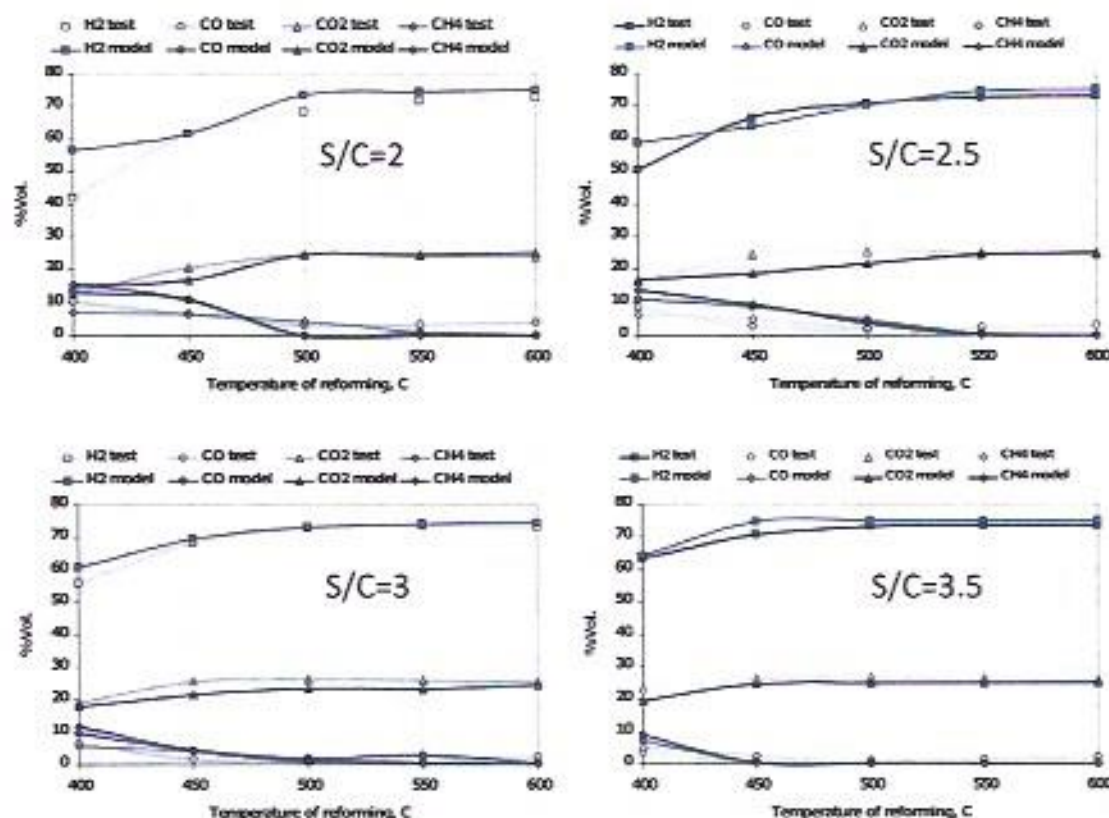
Rys. 38. Wyniki dla metanu. Porównanie wyników uzyskanych po kalibracji modelu z danymi eksperymentalnymi

W przypadku biogazu (Rys. 39) reformowanego przy niskim współczynniku S/C zaobserwowano dużą rozbieżność pomiędzy modelem a eksperymentami. Może to wynikać z faktu, że do obliczeń wykorzystano komercyjne oprogramowanie i potrzebne są tu bardziej szczegółowe badania chemiczne. Lepsze wyniki można było uzyskać tworząc trzy osobne modele (dla każdego paliwa), aczkolwiek celem badań było zbudowanie modelu uniwersalnego.



Rys. 39. Wyniki dla bingazu (60% obj. CH₄ i 40% obj. CO₂). Porównanie wyników uzyskanych po kalibracji modelu z danymi eksperymentalnymi

W przypadku eteru dimetylowego zgodność modelu z danymi eksperymentalnymi była bardzo dobra, ze względu na dużą zbieżność wyników w niższych temperaturach. Można to zobaczyć na Rys. 40.



Rys. 40. Wyniki dla eteru dimetylowego. Porównanie wyników uzyskanych po kalibracji modelu z danymi eksperymentalnymi

Model reformingu parowego metanu w kanale anodowym MCFC

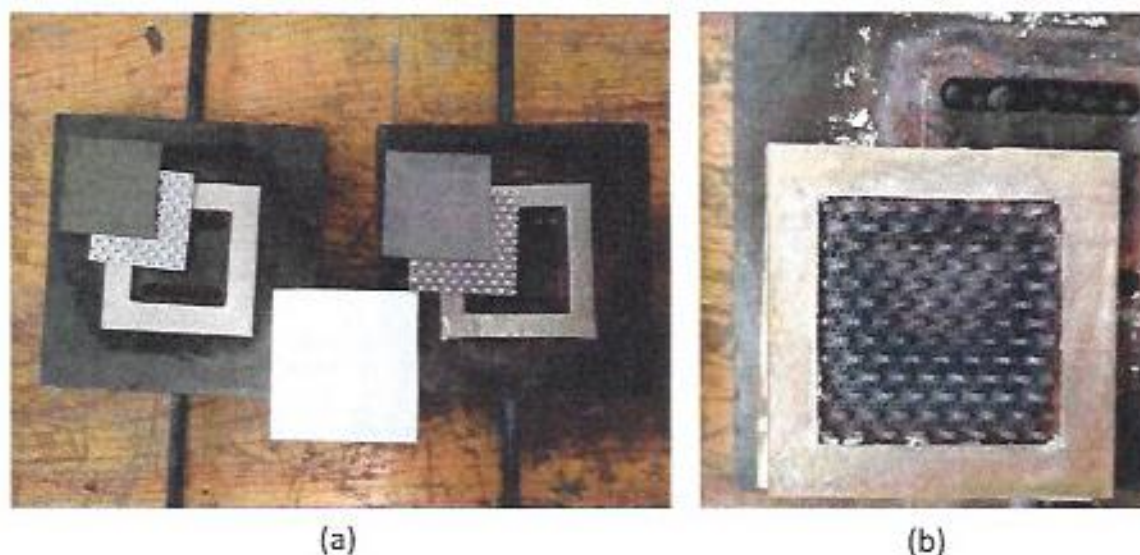
W artykule [A4] przedstawiono model matematyczny ogniwa paliwowego MCFC z katalizatorem do procesu reformingu umieszczonym w kanale anodowym ogniwa. Model ten został zwalidowany na danych eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku badawczym w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. Sposób montażu ogniwa paliwowego przedstawiony został poniżej.

Na Rys. 41a przedstawiono katodę, anodę, kolektory prądowe (anodowy i katodowy), matrycę (na dole rysunku), kolektory gazowe (katoda po prawej, anoda po lewej) oraz katalizator umieszczony w kanale anodowym kolektor gazowego. Na Rys. 41a pokazano także uszczelki wykonane z wermikulitu (elementy z wycięciem pośrodku).

Wymiary katody (i katodowego kolektora prądowego) wynosiły 4,5 x 4,5 cm, a anody (i anodowego kolektora prądowego) 5 x 5 cm, co oznacza, że powierzchnia czynna ogniwa wynosiła 20,25 cm² (4,5 x 4,5 cm).

Wymiary matrycy wynosiły 7x7 cm. Matrycę zaimpregnowano 5,2 g elektrolitu (62% mol Li₂CO₃ i 38%mol K₂CO₃).

Następnie w kanale anodowym umieszczono 2 g katalizatora. Wodę do strumienia anodowego doprowadzano kapilarą za pomocą pompy perystaltycznej.



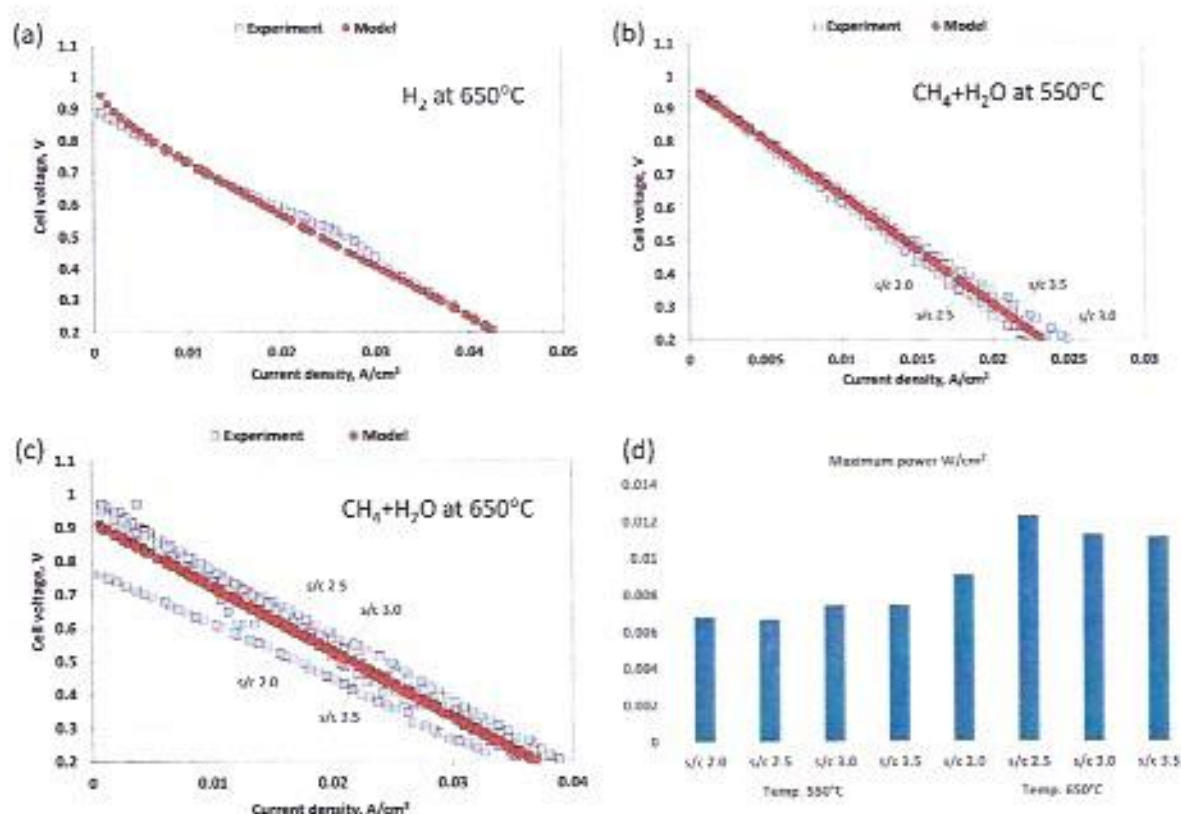
Rys. 41. Materiały do montażu ogniwa MCFC z katalizatorem w kanale anodowym (a); anodowy kolektor prądowy (na dole) i katalizator do reformingu (na górze) po pracy w ogniwie MCFC zasilanym mieszaniną metanu i pary wodnej (b)

Anodowy kolektor prądowy i katalizator do reformingu po pracy w ogniwie MCFC zasilanym mieszaniną metanu i pary wodnej pokazano na Rys. 41b.

Wyniki badań eksperymentalnych ogniwa paliwowego MCFC zasilanego czystym wodorem przedstawiono na Rys. 42a. Dodatkowo na Rys. 42a przedstawiono predykcję modelu matematycznego z artykułu [A4] w odniesieniu do danych eksperymentalnych. Można zauważyć dobrą zgodność predykcji modelu z danymi eksperymentalnymi.

Wyniki wykazały, że ogniwo paliwowe użyte do testów było stosunkowo słabe, ale to samo ogniwo paliwowe było użyte do testów podczas zasilania mieszaniną metanu i pary wodnej przy różnych stosunkach S/C i w różnych temperaturach. Umożliwiło to dokładne zbadanie i określenie wpływu samego procesu reformingu z użyciem katalizatora umieszczonego w kanale anodowym.

Rys. 42b i c przedstawia krzywe prądowo-napięciowe ogniwa MCFC zasilanego mieszaniną metanu i pary wodnej w temperaturach odpowiednio 550°C i 650°C. Obydwa eksperymenty (Rys. 42b i c) przeprowadzono dla różnych stosunków S/C, tj. 2, 2,5, 3 i 3,5. Dla tych eksperymentów uzyskano nieco większą rozbieżność pomiędzy wynikami symulacji a danymi doświadczalnymi niż w przypadku danych przedstawionych na Rys. 42a, jednak nadal można zakładać, że model pozwala przewidzieć pracę ogniwa paliwowego podczas pracy na metanie.



Rys. 42. Krzywe polaryzacji dla ogniwa MCFC zasilanego wodorem w temperaturze $650^\circ C$ (a); metanem i parą wodną w temperaturze $550^\circ C$ (b); metanem i parą wodną w temperaturze $650^\circ C$ (c); porównanie maksymalnych mocy uzyskanych przez ogniwo paliwowe podczas eksperymentu (d)

Badania wykazały, że osiągi ogniwa paliwowego MCFC w dużym stopniu zależą od temperatury pracy, natomiast związek pomiędzy osiągami ogniwa MCFC a stosunkiem S/C był mniej oczywisty. Widać to szczególnie na Rys. 42d, gdzie porównano maksymalne moce osiągane przez ogniwo przy różnych stosunkach S/C i w dwóch różnych temperaturach. Powodem tego był stosunkowo duży przepływ metanu w stosunku do powierzchni czynnej ogniwa paliwowego, tj. $20,25 \text{ cm}^2$, zasilanego metanem w ilości 3 Nl/h . Zaobserwowano tylko jeden wyjątek podczas testów ogniwa MCFC w temperaturze $650^\circ C$, przy $S/C = 2$, gdzie wyraźnie widać znacznie mniejszą moc niż dla większych stosunków S/C.

Gdy ogniwo paliwowe pracowało w temperaturze $550^\circ C$, najlepsze osiągi ogniwa paliwowego zaobserwowano przy współczynniku S/C równym 3,0. Należy jednak podkreślić, że różnica w działaniu nie była duża w porównaniu z wynikami eksperymentalnymi dla pozostałych stosunków S/C. Jest oczywiste, że w tej temperaturze proces reformingu parowego przebiega mniej wydajnie, co skutkuje niższą mocą ogniwa paliwowego. W przypadku doświadczeń przeprowadzonych w temperaturze $650^\circ C$ największą moc ogniwa paliwowego uzyskano przy stosunku S/C wynoszącym 2,5. Ogniwo paliwowe uzyskało lepsze wyniki (większe moce) we wszystkich eksperymentach przy wyższej temperaturze pracy (Rys. 42d).

5.5.4 Utylitaryzm wyników wykonanych badań Wspomagana SSN strategia sterowania SOFC

Stosowanie sztucznych sieci neuronowych do symulacji takich systemów ma kilka zalet. Przede wszystkim nie ma potrzeby szczegółowego badania elementów systemu, dzięki czemu praca nad modelem może zostać zminimalizowana. Zagadnienie to jest istotne w sytuacji, gdy nie jest znana całkowita struktura systemu (np. w energetyce rozproszonej), gdy w dowolnym momencie do struktury mogą dołączyć nowi klienci (prosumenci).

Układ sterowania oparty o SSN można łatwo dostosować do nowych warunków wykorzystując jedynie nowe dane eksperymentalne. Po drugie, w klasycznych modelach elementów układu nie zachodzą (zwykle) procesy degradacji, które są bardzo istotne w zastosowaniach ogniw paliwowych. Model oparty o SSN może dostosować się do nowej, specyficznej charakterystyki elementu on-line poprzez uczenie się algorytmów.

W złożonych systemach, w których zależność pomiędzy kluczowymi parametrami operacyjnymi jest silnie nieliniowa, zastosowanie modeli analitycznych lub statystycznych staje się trudne. Adaptacja podejścia modelowego opartego na SSN pozwala rozwiązać te problemy. Jak wykazano, SSN jako podejście do modelowania, które jest nieparametryczne, może dostosować się do złożonych problemów i znaleźć dobre zastosowanie w układach energetyki rozproszonej wykorzystujących ogniwa paliwowe (lub/i wiele innych źródeł energii).

Recykulacja SOFC

Ogniwa paliwowe ze stałym tlenkiem pracują w wysokiej temperaturze, zwykle w zakresie 650–850°C, zużywając od 50% do 75% paliwa. Pozostałe paliwo można spalić w komorze dopalającej umieszczonej za stołem ogniw paliwowych ze stałym tlenkiem (SOFC) lub częściowo poddać recykulacji.

Jednocześnie recykulacja pomaga zwiększyć całkowite wykorzystanie paliwa w systemie elektroenergetycznym. W rezultacie sprawność ogniwa może wzrosnąć nawet o 5-12 punktów procentowych.

Reforming parowy Metanu, biogazu i DME

Zastosowanie zaproponowanego w artykule [A3] podejścia modelowego umożliwia analizę pracy reformera parowego do paliw alternatywnych zintegrowanego z wymiennikiem ciepła. Sprzężenie bilansu energetycznego z kinetyką reakcji umożliwia symulację składu gazów opuszczających reformer w różnych warunkach pracy. Do czasu publikacji artykułu [A3] nie

zaproponowano żadnego modelu o tak dużej wszechstronności. Opracowane narzędzie numeryczne może znaleźć zastosowanie w symulacjach na poziomie systemu w nominalnych i zmienionych warunkach pracy.

Model reformingu parowego metanu w kanale anodowym MCFC

Przedstawiony w artykule [A4] model reformingu parowego opisuje osiągi ogniwa MCFC z dodatkowym katalizatorem w kanale anodowym podczas zasilania ogniwem mieszaniną metanu i pary wodnej. Zasilanie ogniw paliwowych innymi paliwami niż wodór jest bardziej użyteczne, ponieważ takie paliwa są znacznie łatwiej dostępne niż wodór. Paliwa te na skutek procesu reformingu parowego zachodzącego na katalizatorze w kanale anodowym oraz na samej anodzie zamieniają się w wodór, dwutlenek węgla i tlenek węgla. Zarówno wodór jak i tlenek węgla ulegają reakcji elektrochemicznej na anodzie ogniwa MCFC.

5.6 PODSUMOWANIE NAJWAŻNIEJSZYCH CECH II OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Wspomagana ANN strategia sterowania SOFC

W ramach II osiągnięcia naukowego (w artykule [A1]) przedstawiono sztuczną sieć neuronową wykorzystaną do prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną oraz opracowano strategię sterowania (wykorzystującą informacje o obciążeniu) dla ogniwa SOFC pracującego jako rozproszone źródło energii. **Z przeprowadzonych rozważań wynika, że najwłaściwszą strategią jest praca na maksymalny czas życia ogniwa (rozumiany jako utrzymanie wysokiej temperatury ogniwa).**

Badania te wykazały, że wady podejścia do modelowania opartego na sztucznych sieciach neuronowych, w szczególności brak interpretacji relacji pomiędzy danymi wejściowymi i wyjściowymi oraz niemożność poradzenia sobie z niepewnościami, nie wpływają negatywnie na wyniki.

Aby zapewnić rozsądny zysk, w danych warunkach, stos ogniw SOFC nie może być przewymiarowany. Dlatego też w sytuacji dużego zapotrzebowania na moc część jej musi być dostarczana z sieci elektroenergetycznej. W skrócie oznacza to, że ogniwa nigdy nie powinno się wylączyć, nawet gdy ceny energii w sieci są niskie lub gdy zapotrzebowanie spadnie poniżej minimum technicznego stosu ogniw SOFC (wtedy nadprodukcję energii ze stosu należy sprzedać).

Zysk z eksploatacji stosu ogniw SOFC zależy głównie od charakterystyki popytu i w tym przypadku osiągnął 546 \$ tygodniowo. W obliczeniach przedstawionych w artykule [A1] nie

uwzględniono wytwarzania ciepła w kogeneracji, co znacznie zwiększyłoby korzyści finansowe.

Recyrkulacja SOFC

W ramach II osiągnięcia naukowego (w artykule [A2]) przeanalizowano działanie układu do recyrkulacji anodowych gazów odlotowych z całkowitym usunięciem wody. Do określenia osiągnięć pojedynczego ogniwa paliwowego ze stałym tlenkiem podczas pracy z wykorzystaniem recyrkulacji anodowych gazów odlotowych wykorzystano eksperymentalny system z chłodziarką mającą na celu usunięcie wody ze strumienia recyrkulowanego. Przebadano stopnie recyrkulacji mieszczące się w przedziale od 38,5% do 70,5%. Ocenę wpływu recyrkulacji na osiągi ogniwa SOFC przeprowadzono poprzez analizę napięcia ogniwa pracującego przy danej gęstości prądu. **Poprawę wynikającą z zastosowania recyrkulacji z wykorzystaniem chłodziarki można było zaobserwować poprzez wzrost mocy ogniwa paliwowego.**

Analiza eksperymentalna wykazała, że moc pojedynczego ogniwa SOFC można zwiększyć o 18–31%. Badanie wykazało potencjał zastosowania technik opartych na agregatach chłodniczych w celu poprawy osiągnięć wysokotemperaturowych ogniwa paliwowego. Świadczy to o tym, że podłączenie maszyny chłodzącej może pomóc w kondycjonowaniu gazów odlotowych z ogniwa SOFC. Podobne podejście można zastosować w innych procesach, takich jak odzyskiwanie paliwa w stosach węglanowych ogniwa paliwowego. Teoretycznie istnieje również możliwość oddzielania dwutlenku węgla od gazów spalinowych poprzez zastosowanie technik kriogenicznych.

Recyrkulacja strumienia gazów anodowych z wykorzystaniem agregatu chłodniczego ma kilka zalet:

- Paliwo pozostające w anodowych gazach odlotowych można częściowo odzyskać, aby zwiększyć całkowite wykorzystanie paliwa w systemie opartym na ogniwach SOFC.
- Gdy włączona jest recyrkulacja, z ogniwa można pobierać prąd o większym natężeniu. Daje to potencjalne zastosowanie w systemach, które muszą pracować w sposób ciągły przy ograniczonym zapasie paliwa. Przykładem są źródła rozproszone, w których ilość gazu i/lub jego wartość opałowa (przy wykorzystaniu różnych źródeł gazu lub biogazu) może zmieniać się w ujęciu godzinowym i dobowym.
- Recyrkulacja oparta na agregatach chłodniczych jest skutecznym sposobem zwiększającym elektryczną i ogólną sprawność systemu wykorzystującego ogniwa SOFC (przy uwzględnieniu

faktu, że potrzebna jest dodatkowa moc do działania agregatu chłodniczego oraz pompy krystalicznej lub wentylatora recyrkulacyjnego).

Omawianą koncepcję recyrkulacji można skutecznie zrealizować w układach regeneracji zintegrowanych z systemem chłodzenia wykorzystującym naturalne źródła zimnego czynnika (np. chłodzenie wodne) do wykraplania wody z wylotowych gazów anodowych.

Reforming parowy metanu, biogazu i DME

W ramach II osiągnięcia naukowego (w artykule [A3]) do modelowania reakcji reformingu na początku wykorzystano dane literaturowe na temat współczynników kinetyki reakcji chemicznych. Wykazano, że model oparty na danych zaczerpniętych z literatury nie jest wystarczająco dokładny, aby opisać omawiane procesy. Jest to najbardziej zauważalne w szczególności w przypadku udziałów CO i CO₂, a także w przypadku wszystkich produktów procesu reformingu w niższych temperaturach. W literaturze nie znaleziono współczynników kinetycznych opisujących proces reformingu DME.

Zaczynając od współczynników kinetycznych zaczerpniętych z literatury, model reformera skalibrowano na podstawie danych eksperymentalnych dostarczonych przez Instytut Energetyki. Wyniki symulacji przeprowadzonej przy użyciu modelu po kalibracji wykazują dobrą zgodność przewidywań modelu z eksperymentami dla czterech uwzględnionych wartości stosunku pary wodnej do węgla ($S/C = 2,0, 2,5, 3,0$ i $3,5$). W przypadku biogazu lepszą zgodność osiągnięto się przy wyższych wartościach współczynnika S/C .

Zaobserwowano pozytywny wpływ temperatury na osiągi reformera parowego w zakresie konwersji surowego paliwa węglowodorowego. Zostało to zarówno zmierzone, jak i przewidziane przez model matematyczny. Wzrost temperatury skutkuje wyższą zawartością wodoru w strumieniach wylotowych dla wszystkich paliw uwzględnionych w analizie. Stosunek pary wodnej do węgla ma optymalną wartość ok. 2,0, jednak w celu uniknięcia powstawania i osadzania się węgla zaleca się utrzymywanie tego stosunku nieco powyżej wartości optymalnej. Z tego powodu zbadano współczynniki S/C równe 2,5 i 3,0. Dalszy wzrost współczynnika S/C nie poprawia znacząco osiągnięć reformera. Przeciwnie, powoduje to rozcieńczenie wodoru parą na wylocie.

Ponieważ procedury rozruchu/wyłączenia reformera przeprowadzono przy użyciu gorącego powietrza po obu stronach reformera, podczas tego procesu nie wystąpiły żadne reakcje w trybie dynamicznym. Bezwładność cieplną reformera można modelować wykorzystując omówiony w artykule [A3] model wymiennika ciepła.

Model reformingu parowego metanu w kanale anodowym MCFC

W ramach II osiągnięcia naukowego (w artykule [A4]) przedstawiono model matematyczny ogniwa MCFC i reformingu parowego metanu wewnątrz kanału anodowego ogniwa MCFC. W artykule połączono dwa modele: model o zredukowanym rzędzie w celu opisanie działania węglanowego ogniwa paliwowego oraz model kinetyczny procesu reformingu parowego metanu. Następnie model poddano walidacji i kalibracji w oparciu o dane z eksperymentów. Można było zauważyć, że materiały użyte do budowy ogniw charakteryzowały się dość niskimi osiągnięciami, jednak wszystkie pokazane badania dotyczyły tych samych materiałów, więc można zaobserwować wpływ samego procesu reformingu zachodzącego na katalizatorze (i częściowo na anodzie ogniwa) umieszczonym w kanale anodowym. Temperatura miała ogromny wpływ na osiągi ogniwa paliwowego. Wyniki eksperymentów wykazały, że moc ogniwa paliwowego była o około 30% gorsza, gdy temperatura została obniżona z 650°C do 550°C. Zauważalne było, że stosunek pary wodnej do węgla wynoszący 2,0 był zbyt niski dla paliwa metanowego, natomiast stosunek S/C wynoszący 2,5 i więcej zapewniał lepsze osiągi ogniwa paliwowego.

Do najważniejszych cech osiągnięcia nr II zaliczam:

1. Zbudowanie i przebadanie modelu matematycznego sztucznej sieci neuronowej do przewidywania zapotrzebowania na energię elektryczną, której zadaniem było wygenerowanie danych potrzebnych do zaplanowania strategii sterowania stosem ogniw SOFC.
2. Zbudowanie i przebadanie modelu matematycznego procesu reformingu parowego dla trzech różnych paliw (metanu, biogazu i eteru dimetylowego). Model ten następnie został wykorzystany do przewidywania składu gazów wylotowych z oddzielnego reformera parowego oraz do określenia składu gazów powstających na powierzchni katalizatora umieszczonego w kanale anodowym ogniwa MCFC.
3. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych potwierdzających korzyści płynące z zastosowania recyrkulacji gazów anodowych w ogniwie paliwowym SOFC.
4. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych dla ogniwa paliwowego MCFC zasilanego mieszaniną metanu i pary wodnej w obecności katalizatora w kanale anodowym ogniwa MCFC. Badania te posłużyły do walidacji drugiego wariantu modelu matematycznego opisanego w punkcie 2.

Literatura niewchodząca w skład omówionych powyżej dwóch osiągnięć naukowych

- [1] HYSYS 3.2 Operations Guide 2003.
- [2] Aspen Technology I. Aspen HYSYS ® Dynamic Modeling Guide. Aspen HYSYS v73 2011.
- [3] Szablowski Ł, Milewski J. Dynamic analysis of compressed air energy storage in the car. *J Power Technol* 2011;91:23–36.
- [4] Krawczyk P, Szablowski Ł, Karellas S, Kakaras E, Badyda K. Comparative thermodynamic analysis of compressed air and liquid air energy storage systems. *Energy* 2018;142:46–54. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.078>.
- [5] Salyga S, Szablowski Ł, Badyda K. Comparison of constant volume energy storage systems based on compressed air. *Int J Energy Res* 2021;45. <https://doi.org/10.1002/er.6320>.
- [6] Peng D-Y, Robinson DB. A new two-constant equation of state. *Ind Eng Chem Fundam* 1976;15:59–64.
- [7] Ataer O. Storage of Thermal Energy. *Encyclopedia of Life Support Systems EOLSS Publishers*; 2006.
- [8] Eastman Chemical Company. THERMINOL VP-1 heat transfer fluid brochure. *Eastman Prod Cat* 2019;8.
- [9] Badyda K, Milewski J. Compressed air storage systems as a peak looping power station in Polish conditions. *Proc. Int. Conf. Power Eng.* 2009.1, 2009.
- [10] Badyda K, Milewski J. Thermodynamic analysis of compressed air energy storage working conditions. *Arch Energ* 2012;42:53–68.
- [11] Badyda K, Milewski J. Energy storage using CAES systems. *Contemp. Probl. gas energy gas Ind., Gliwice: Wyd. ITC Politechniki Śląskiej*; 2009.
- [12] Morosuk T, Tsatsaronis G, Schult M. Conventional and advanced exergetic analyses: Theory and application. *Arab J Sci Eng* 2013;38. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0441-9>.
- [13] Morosuk T, Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy* 2008;33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.012>.
- [14] Morosuk T, Tsatsaronis G. Advanced exergy analysis for chemically reacting systems - Application to a simple open gas-turbine system. *Int J Thermodyn* 2009;12. <https://doi.org/10.5541/ijot.1034000245>.
- [15] MDI. Analyse comparative. 2009.
- [16] Dabala K, Rudenski A, Zochowski K. Silniki indukcyjne jednofazowe o podwyższonej sprawności i mocy znamionowej 7.5 oraz 10 hp. *Zesz Probl – Masz. Elektr* 2005;71:21–

- 26.
- [17] Wang Z, Xiong W, Ting DSK, Carrivau R, Wang Z. Conventional and advanced exergy analyses of an underwater compressed air energy storage system. *Appl Energy* 2016;180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.014>.
- [18] Milewski J, Węgrzanowski T, Fung KZ, Szczśniak A, Ćwieka K, Tsai SY, et al. Supporting ionic conductivity of $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$ molten carbonate electrolyte by using yttria stabilized zirconia matrix. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.073>.
- [19] Demuth H, Beale M, Hagan M. Neural network toolbox™ 6. User's Guid 2008.
- [20] Yu H, Wilamowski BM. Levenberg-marquardt training. *Intell. Syst.*, 2016. <https://doi.org/10.1201/9781315218427-12>.
- [21] Dan Foresee F, Hagan MT. Gauss-Newton approximation to bayesian learning. *IEEE Int. Conf. Neural Networks - Conf. Proc.*, vol. 3, 1997. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1997.614194>.
- [22] Young DC. Computational chemistry: a practical guide for applying techniques to real world problems. New York: Wiley; 2001.
- [23] Hou K, Hughes R. The kinetics of methane steam reforming over a Ni/ α - Al_2O_3 catalyst. *Chem Eng J* 2001;82. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00367-3).
- [24] Creaser D, Nilsson M, Pettersson LJ, Dawody J. Kinetic modeling of autothermal reforming of dimethyl ether. *Ind Eng Chem Res* 2010;49. <https://doi.org/10.1021/ic100834v>.
- [25] Lee JK, Ko JB, Kim DH. Methanol steam reforming over Cu/ZnO/ Al_2O_3 catalyst: Kinetics and effectiveness factor. *Appl Catal A Gen* 2004;278. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.09.022>.
- [26] Zieleniak A. Experimental characterization of the Catacel HEP operated on methane, Technical Report No.: CPC-1-2015. Warsaw, Poland: 2015.
- [27] Zieleniak A. Experimental characterization of the Catacel HEP operated on biogas, Technical Report No.: CPC-2-2015. Warsaw, Poland: 2015.
- [28] Zieleniak A. Experimental characterization of the Catacel HEP operated on DME, Technical Report No.: CPC-3-2015. Warsaw, Poland: 2015.

6 INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ ALBO ARTYSTYCZNĄ REALIZOWANĄ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ LUB INSTYTUCJI KULTURY, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ

Moja aktywność naukowa realizowana w innych uczelniach niż Politechnika Warszawska zrealizowana została w trakcie 5 zagranicznych staży naukowych, z których 4 miało miejsce po uzyskaniu stopnia doktora i jeden przed.

6.1 STAŻE NAUKOWE PO DOKTORACIE

- 1) 3-miesięczny staż w National Technical University of Athens (Grecja), który rozpoczął się 1 września 2015 a zakończył 30 listopada 2015 r. (**poświadczenie P1**). W trakcie trwania stażu przeprowadzono szereg prac związanych z modelowaniem i analizą energetyczną układów do magazynowania energii CAES i LAES, czego efektem są publikacje:

-Szablowski, L., Krawczyk, P., Badyda, K., Karellas, S., Kakaras, E., & Bujalski, W. (2017). Energy and exergy analysis of adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*, 138, 12-18.

-Krawczyk, P., Szablowski, L., Karellas, S., Kakaras, E., & Badyda, K. (2018). Comparative thermodynamic analysis of compressed air and liquid air energy storage systems. *Energy*, 142, 46-54.

-Krawczyk, P., Szablowski, L., Badyda, K., Karellas, S., & Kakaras, E. (2016). Impact of selected parameters on performance of the Adiabatic Liquid Air Energy Storage system. *Journal of Power Technologies*, 96(4), 238-244

Pierwsze dwie z tych publikacji uzyskały bardzo dużą liczę cytowań (wg stanu na dzień 20.09.2023 r.): pierwsza – 124 wg. Google Scholar, 101 wg Scopus, 90 wg WoS a druga – 131 wg. Google Scholar, 100 wg Scopus, 91 wg WoS.

- 2) 2-tygodniowy staż w National Cheng Kung University (Tajwan), który rozpoczął się 23 października 2017 r. a zakończył się 3 listopada 2017 r. (**poświadczenie P2**). W trakcie trwania stażu prowadzono badania nad elektrolitami o podwójnym przewodnictwie jonowym dla wysokotemperaturowych ogniw paliwowych, czego efektem są następujące publikacje:

-Baron, R., Wejrzanowski, T., Szablowski, Ł., Szczęśniak, A., Milewski, J., & Fung, K. Z. (2018). Dual ionic conductive membrane for molten carbonate fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(16), 8100-8104.

-Milewski, J., Wejrzanowski, T., Fung, K. Z., Szablowski, Ł., Baron, R., Tang, J. Y., ... & Ni, C. T. (2018). Temperature influence on six layers samaria doped ceria matrix impregnated by lithium/potassium electrolyte for Molten Carbonate Fuel Cells. *international journal of hydrogen energy*, 43(1), 474-482.

-Baron, R., Wejrzanowski, T., Milewski, J., Szablowski, Ł., Szczęśniak, A., & Fung, K. Z. (2018). Manufacturing of γ -LiAlO₂ matrix for molten carbonate fuel cell by high-energy milling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(13), 6696-6700.

-Milewski, J., Wejrzanowski, T., Fung, K. Z., Liu, B. H. C., Szablowski, Ł., Baron, R., ... & Tang, J. Y. (2018, April). Improving a Molten Carbonate Fuel Cell Matrix Strength By Fiber Reinforcing. In *Meeting Abstracts* (No. 1, pp. 33-33). The Electrochemical Society

- 3) 2-tygodniowy staż w Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS (Niemcy), który rozpoczął się 16 września 2019 r. a zakończył 27 września 2019 r. (**poświadczenie P3**). W trakcie trwania stażu wspólnie z naukowcami z Instytutu Fraunhofera napisałem wniosek grantowy ERC (ERC Starting Grant) o tytule „Additive Manufacturing of high temperature Fuel Cells”. Wniosek został pomyślnie złożony, aczkolwiek nie otrzymał finansowania.
- 4) 2-tygodniowy staż w University of Aveiro (Portugalia), który rozpoczął się 13 maja 2019 r. a zakończył 24 maja 2019 r. (**poświadczenie P4**). W trakcie trwania stażu przeprowadzono badania kilku materiałów wchodzących w skład membran (oraz niektórych ogniw paliwowych) do separacji CO₂.

6.2 STAŻE NAUKOWE PRZED DOKTOREMEM:

- 1) 6-ciomiesięczny staż w San Diego State University (USA), który rozpoczął się 1 września 2013 r. a zakończył się 28 lutego 2014 r. (**poświadczenie P5**). W trakcie trwania stażu brałem udział w projektowaniu instalacji do ciśnieniowej pirolizy biomasy w ramach projektu finansowanego przez United States Department of Energy. Efektem stażu było również wdrożenie w postaci wybudowanej instalacji do ciśnieniowej pirolizy biomasy o wydajności 7200 lB/h. Jednym z efektów była również publikacja konferencyjna "Ł. Szablowski, A. Beyenc. Pyrolysis of multi-phase media with thermal energy recovery, *Proceedings of ECOS 2014 - the 27th international*

conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, June 15-19, 2014, Turku, Finland".

7 INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKĘ.

7.1 PROWADZONE PRZEDMIOTY DYDAKTYCZNE I PRACE DYPLOMOWE

Przedmioty prowadzone w języku polskim:

Turbiny energetyczne, Turbiny gazowe i układy gazowo-parowe, Algorytmy i programy bilansów cieplnych, Układy hybrydowe w energetyce, Urządzenia pomocnicze, Informatyka I

Przedmioty prowadzone w języku angielskim:

Algorithms and programs of heat balances, Theory of turbomachinery, Turbines, Gas turbines and combined cycles, Mathematical modeling and computer simulation of distributed energy systems

Promotorstwo prac dyplomowych

W latach 2014 – 2023 byłem promotorem prac dyplomowych 43 studentów (sumarycznie prac magisterskich i inżynierskich) na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

Promotorstwo doktorantów

Od roku 2023 jestem promotorem pomocniczym pracy doktorskiej Pana Stanisława Sałygi na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

7.2 UDZIAŁ W REDAKCJACH CZASOPISM NAUKOWYCH

-Redaktor pomocniczy w Journal of Energy Resources Technology (100 pkt wg MEiN, IF 3) wydawanym przez ASME (do sprawdzenia na stronie internetowej czasopisma).

-Redaktor w Journal of Power Technologies (IF 0,6) wydawanym przez Instytut Techniki Ciepłej.

7.3 REDAKCJA WYDAŃ SPECJALNYCH CZASOPISM NAUKOWYCH

-Applied Sciences



applied sciences

an Open Access Journal by MDPI

IMPACT
FACTOR
2.217

Cogeneration Systems: Measurements, Data Analysis, Modelling and Control

Guest Editors

Dr. Adrian Chmielewski, Dr. Łukasz Szablowski, Prof. Dr. Andrzej Ordys

Deadline

30 November 2020

Special Issue

mdpi.com/si/47749

Invitation to submit

-Energies



energies

an Open Access Journal by MDPI

IMPACT
FACTOR
3.2

CITESCORE
5.5

Sustainable Development of Alternative Fuels Infrastructure: Fuel Cells, Hydrogen Production, Conversion and Storage

Guest Editors

Dr. Adrian Chmielewski, Dr. Łukasz Szablowski, Dr. Piotr Piórkowski, Dr. Jakub Możaryn, Prof. Dr. Ramon Costa-Castelló

Deadline

29 February 2024

Special Issue

mdpi.com/si/181044

Invitation to submit

7.4 NAGRODY REKTORA PW

Cztery nagrody Rektora Politechniki Warszawskiej: 2015 – zespołowa III stopnia za osiągnięcia organizacyjne, 2016 – zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe, 2019 – indywidualna I stopnia za osiągnięcia naukowe, 2021 – indywidualna I stopnia za osiągnięcia naukowe (poświadczenia P6-P9).

7.5 NAGRODA NERNSTA

2020 - Nagroda naukowa im prof Walthera Hermana NERNSTA za osiągnięcie praktyczne związane z procesami elektrochemicznymi, Instytut Energetyki, Polska (**poświadczenie P10**)

7.6 STYPENDIUM MNiSW

2020 – 2023 Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa wyższego dla wybitnych młodych naukowców (**poświadczenie P11**)

7.7 PUBLIKACJE DLA ORGANIZACJI EKOLOGICZNYCH (WWF)

Chmielewski, A., Kupecki, J., Szablowski, Ł., Fijałkowski, K. J., Zawieska, J., Bogdziński, K., Kulik, O., Adamczewski, T. Currently available and future methods of energy storage. WWF Poland 2020, ISBN: 978-83-60757-56-7.

7.8 PUBLIKACJE DLA INNYCH ORGANIZACJI (POLSKI INSTYTUT EKONOMICZNY)

Chmielewski, A., Szablowski, Ł., Bilansowanie OZE w systemie elektroenergetycznym, WORKING PAPER 8/2019, Polski Instytut Ekonomiczny 2019, ISBN: 978-83-66306-62-2

8 OPRÓCZ KWESTII WYMIENIONYCH W PKT. 1-6, WNIOSKODAWCA MOŻE PODAĆ INNE INFORMACJE, WAŻNE Z JEGO PUNKTU WIDZENIA, DOTYCZĄCE JEGO KARIERY ZAWODOWEJ

8.1 KIEROWANIE PROJEKTAMI

2021 – 2024 Badania procesów parowego rozkładu metanu do wodoru w obecności zjawisk elektrochemicznych, Narodowe Centrum Nauki, Projekt SONATA nr 2020/39/D/ST8/02021.

2020 – 2022 Zastosowanie zaawansowanej analizy egzergetycznej do modelowania i oceny układów do magazynowania energii wykorzystujących sprężone powietrze, grant wewnętrzny w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

2019 – 2020 Wykonanie analizy egzergetycznej bloku klasy 500 MW, zlecenie komercyjne dla ENEA Wytwarzanie Sp. z o.o. (Elektrownia Kozienice).

2019 Wykorzystanie wytwarzania addytywnego do produkcji elementów wysokotemperaturowych elektrochemicznych źródeł energii, Grant Rectorski, Politechnika Warszawska (na przygotowanie wniosku grantowego ERC).

2019 Opracowanie modelu dynamicznego i badania eksperymentalne procesu reformingu parowego zachodzącego bezpośrednio na anodzie ogniwa paliwowego MCFC, Grant Dziekański Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej (badania wstępne do grantu SONATA NCN).

2014 – 2016 Praca rozproszonych źródeł energii – strategię sterowania oparte o sztuczne sieci neuronowe, Narodowe Centrum Nauki, Projekt PRELUDIUM Nr 2013/09/N/ST8/02055

8.2 ZGŁOSZENIA PATENTOWE

-P-422085, Rafał Bernat, Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, Łukasz Szablowski, Uszczelnienie wysokotemperaturowych ogniw paliwowych, 30.06.2017

-P.427754, Karol Ćwicka, Tomasz Wejrzanowski, Robert Baron, Jarosław Milewski, Łukasz Szablowski, Arkadiusz Szczęśniak, Sposób wytwarzania katody węglanowego ogniwa paliwowego o wysokiej porowatości otwartej, 14.11.2018

-P.441399, Dybiński O., Martsinchyk A., Milewski J., Szczęśniak A., Szablowski Ł. Sposób regeneracji elektrolitu w węglanowym ogniwie paliwowym, 01.06.2022

-P.443556, Szablowski Ł., Dybiński O. Adyabatyczny układ do magazynowania energii, 24.01.2023

8.3 WDROŻENIA

-Analiza możliwości adaptacji skraplacza bloku gazowo-parowego dawnej EC Starachowice do roli wymiennika ciepłowniczego dla potrzeb EC w Siedlcach, Siedlce, 2012 (**poświadczenie P12**).

-Instalacja do ciśnieniowej pirolizy biomasy o wydajności 7200 lB/h, Stany Zjednoczone Ameryki, San Diego, 2014 (**poświadczenie P13**).

8.4 RECENZJE

Recenzent w czasopismach: Energy, International Journal of Energy Research, Journal of Energy Resources Technology, Architecture Civil Engineering Environment, Applied Sciences, Entropy.

Łukasz
Szablowski

Elektronicznie podpisany
przez Łukasz Szablowski
Data: 2023.09.21 14:39:47
+02'00'

.....
(podpis wnioskodawcy)



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

**Wykaz osiągnięć naukowych, stanowiących znaczny wkład w
rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych**

dr inż. Łukasz Szablowski

Warszawa 2023

1 SPIS TREŚCI

2	WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, o których mowa w art. 219 ust. 1. pkt 2 Ustawy	4
2.1	Monografia naukowa, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy; lub	4
2.2	Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy; lub	4
2.3	Wykaz zrealizowanych oryginalnych osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych, technologicznych lub artystycznych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy.	5
3	WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ	5
3.1	Wykaz opublikowanych monografii naukowych (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.1).	5
3.2	Wykaz opublikowanych rozdziałów w monografiach naukowych	6
	Wykaz członkostwa w redakcjach naukowych monografii	6
3.3	Wykaz opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.2)	6
3.4	Wykaz osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych, technologicznych (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.3)	11
3.5	Wykaz publicznych realizacji dzieł artystycznych (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.3)	12
3.6	Wykaz wystąpień na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych	12
3.7	Wykaz udziału w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji	16
3.8	Wykaz uczestnictwa w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych	16
3.9	Wykaz członkostwa w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach	17
3.10	Wykaz staży w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych	17
3.11	Wykaz członkostwa w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	19
3.12	Wykaz recenzowanych prac naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych	21
3.13	Wykaz uczestnictwa w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych	21
3.14	Wykaz udziału w zespołach badawczych, realizujących projekty inne niż określone w pkt. II.9	21
3.15	Wykaz uczestnictwa w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny	22
4	INFORMACJA O WSPÓŁPRACY Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM	22
4.1	Wykaz dorobku technologicznego	22

4.2	Współpraca z sektorem gospodarczym.....	22
4.3	Wykaz uzyskanych praw własności przemysłowej, w tym uzyskanych patentów krajowych lub międzynarodowych.	23
4.4	Wykaz wdrożonych technologii.....	23
4.5	wykaz wykonanych ekspertyz lub innych opracowań wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców.	24
4.6	Wykaz udziału w zespołach eksperckich lub konkursowych.....	24
4.7	Wykaz projektów artystycznych realizowanych ze środowiskami pozaartystycznymi.	24
5	DANE NAUKOMETRYCZNE (stan na dzień 20.09.2023)	24
5.1	Informacja o sumarycznym współczynniku Impact Factor	24
5.2	Informacja o liczbie cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.....	25
5.3	Informacja o posiadanym Indeksie Hirscha.....	25
5.4	Informacja o liczbie punktów MNiSW/MEiN (wg Repozytorium PW)	25

2 WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY

Wszystkie opisane w tym punkcie osiągnięcia zostały zrealizowane po uzyskaniu stopnia doktora.

2.1 MONOGRAFIA NAUKOWA, ZGODNIE Z ART. 219 UST. 1. PKT 2A USTAWY; LUB

Tytuł osiągnięcia nr I:

„Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego układów do magazynowania energii przy pomocy sprężonego powietrza”

Wyniki tego osiągnięcia opublikowane zostały w formie monografii [M1]: Łukasz Szablowski, Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego oraz oceny pod kątem energetycznym i egzenergetycznym układów magazynujących energię przy pomocy sprężonego powietrza, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2023 (MEiN 80 pkt).

2.2 CYKL POWIĄZANYCH TEMATYCZNIE ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH, ZGODNIE Z ART. 219 UST. 1. PKT 2B USTAWY; LUB

Tytuł osiągnięcia nr II:

„Badania numeryczne i eksperymentalne wybranych metod wytwarzania i wykorzystania wodoru.”

Wyniki tego osiągnięcia opublikowane zostały w formie cyklu powiązanych tematycznie artykułów [A1-A4]. Wkład poszczególnych współautorów artykułów [A1-A4] przedstawiono w oświadczeniach autorskich **O1-O4**. Omówienie wkładu autora znalazło się również w autoreferacie (załącznik 3) w sekcji metodologia.

[A1]: **Szablowski, Ł.**, Milewski, J., Badyda, K., Kupecki, J. ANN-supported control strategy for a solid oxide fuel cell working on demand for a public utility building. International Journal of Hydrogen Energy 2018, 43(6), 3555-3565

IF (z 2018 r.): 4,084, MNiSW 35 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[A2]: Kupecki, J., Motylinski, K., **Szablowski, Ł.**, Zurawska, A., Naumovich, Y., Szczesniak, A., Milewski, J. Quantification of the Improvement of Performance of Solid Oxide Fuel Cell

Using Chiller-Based Fuel Recirculation. *Journal of Energy Resources Technology* 2020, 142(2), 022002.

IF (z 2020 r.): 2,903, MEiN 100 pkt

[A3]: **Szablowski, L.**, Kupecki, J., Milewski, J., Motylinski, K. Kinetic model of a plate fin heat exchanger with catalytic coating as a steam reformer of methane, biogas, and dimethyl ether. *International Journal of Energy Research* 2019, 43(7), 2930-2939.

IF (z 2019 r.): 3,741, MEiN 100 pkt

[A4]: **Szablowski, L.**, Dybinski, O., Szczesniak, A., Milewski, J. Mathematical model of steam reforming in the anode channel of a molten carbonate fuel cell. *Energies* 2022, 15(2), 608.

IF (z 2022 r.): 3,2, MEiN 140 pkt

2.3 WYKAZ ZREALIZOWANYCH ORYGINALNYCH OSIĄGNIĘĆ PROJEKTOWYCH, KONSTRUKCYJNYCH, TECHNOLOGICZNYCH LUB ARTYSTYCZNYCH, ZGODNIE Z ART. 219 UST. 1. PKT 2c USTAWY.

Nie dotyczy

3 WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ

3.1 WYKAZ OPUBLIKOWANYCH MONOGRAFII NAUKOWYCH (Z ZAZNACZENIEM POZYCJI NIEWYMIENIONYCH W PKT I.1).

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

Brak.

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

1) Chmielewski, A., Kupecki, J., **Szablowski, Ł.**, Fijałkowski, K. J., Zawieska, J., Bogdziński, K., Kulik, O., Adamczewski, T. Currently available and future methods of energy storage. *WWF Poland* 2020, ISBN: 978-83-60757-56-7.

2) Chmielewski, A., **Szablowski, Ł.**, Bilansowanie OZE w systemie elektroenergetycznym. *WORKING PAPER 8/2019*, Polski Instytut Ekonomiczny 2019, ISBN: 978-83-66306-62-2.

3.2 WYKAZ OPUBLIKOWANYCH ROZDZIAŁÓW W MONOGRAFIACH NAUKOWYCH

Nie dotyczy.

WYKAZ CZŁONKOSTWA W REDAKCJACH NAUKOWYCH MONOGRAFII

Nie dotyczy.

3.3 WYKAZ OPUBLIKOWANYCH ARTYKUŁÓW W CZASOPISMACH NAUKOWYCH (Z ZAZNACZENIEM POZYCJI NIEWYMIENIONYCH W PKT I.2)

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

[1] **Łukasz Szablowski**, Jarosław Milewski, Jerzy Kuta, Krzysztof Badyda, Control strategy of a natural gas fuelled piston engine working in distributed generation system [Strategia sterowania silnika tłokowego zasilanego gazem ziemnym pracującego w systemie energetyki rozproszonej], Rynek Energii 2011, 3(94), 33-40.

IF (z 2011r.): 0,63, MNiSW: 10 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[2] **Łukasz Szablowski**, Jarosław Milewski, Jerzy Kuta, Wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej do przewidywania zapotrzebowania na moc elektryczną, Rynek Energii 2013, 1(104), 26-31.

MNiSW: 9 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[3] **Łukasz Szablowski**, Jarosław Milewski, Krzysztof Badyda, Silnik tłokowy na gaz ziemny, jako sposób na pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło dla budynku użyteczności publicznej, Instal 2014, 2, 44-49.

MNiSW: 6 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[4] Jarosław Milewski, Marcin Wołowicz, Rafał Bernat, **Łukasz Szablowski**, Janusz Lewandowski, Variant analysis of the structure and parameters of soft hybrid systems, Applied Mechanics and Materials 2013, 437, 306-312

MNiSW: 7 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[5] Jarosław Milewski, Marcin Wołowicz, **Łukasz Szablowski**, Krzysztof Badyda, Polimerowe ogniwo paliwowe-nowe podejście do modelowania, Rynek Energii 2012, 1(98), 136--144.

MNiSW: 10 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

[6] **Łukasz Szablowski**, Piotr Krawczyk, Krzysztof Badyda, Sotirios Karellas, Emmanuel Kakaras, Wojciech Bujalski, Energy and exergy analysis of adiabatic compressed air energy storage system. Energy 2017, 138, 12-18.

IF (z 2017r.): 4,968, MNiSW: 45 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[7] Piotr Krawczyk, **Łukasz Szablowski**, Sotirios Karellas, Emmanuel Kakaras, Krzysztof Badyda, Comparative thermodynamic analysis of compressed air and liquid air energy storage systems. Energy 2018, 142, 46-54.

IF (z 2018r.): 5,537, MNiSW: 45 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[8] **Łukasz Szablowski**, Tatiana Morosuk, Advanced Exergy Analysis of Adiabatic Underwater Compressed Air Energy Storage System, Entropy 2023, 25(1), 77

IF (z 2022r.): 2,7, MEiN: 100 pkt

[9] Kamil Kubiński, **Łukasz Szablowski**, Dynamic model of solar heating plant with seasonal thermal energy storage, Renewable Energy 2020, 145, 2025-2033.

IF (z 2020r.): 8.001, MEiN: 140 pkt

[10] Stanisław Sałyga, **Łukasz Szablowski**, Krzysztof Badyda, Comparison of constant volume energy storage systems based on compressed air, International Journal of Energy Research 2021, 45(5), 8030-8040.

IF (z 2021 r.): 4,672, MEiN 100 pkt

[11] **Łukasz Szablowski**, Piotr Krawczyk, Marcin Wołowicz, Exergy Analysis of Adiabatic Liquid Air Energy Storage (A-LAES) System Based on Linde-Hampson Cycle, Energies 2021, 14(4), 945.

IF (z 2021 r.): 3,252, MEiN: 140 pkt

- [12] Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, A proton conducting solid oxide fuel cell-implementation of the reduced order model in available software and verification based on experimental data, *Journal of Power Sources* 2021, 502, 229948, IF (z 2021r.): 9,794, MEiN 140 pkt
- [13] Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, A discussion on mathematical models of proton conducting solid oxide fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 2019, 44(21), 10925-10932, IF (z 2019r.): 4,939, MEiN 140 pkt
- [14] Arkadiusz Szczęśniak, Jarosław Milewski, Olaf Dybiński, Kamil Futyma, Jakub Skibiński, Aliaksandr Martsinchyk, **Łukasz Szablowski**, Determination of Thermocline Heat Transfer Coefficient by using CFD simulation, *Energies* 2023, 16(7), 3150, IF (z 2022 r.): 3,2, MEiN: 140 pkt
- [15] Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, Kamil Futyma, Piotr Lis, Olaf Dybiński, **Łukasz Szablowski**, Marcin Wołowicz "Comparative analysis of supercritical CO₂ cycles." *Journal of Power Technologies* 102.2 (2022): 79-97, IF (z 2022r.): 0,6, MEiN: 40 pkt
- [16] Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, Kamil Futyma, Piotr Lis, Olaf Dybiński, Marcin Wołowicz "Elements of supercritical CO₂ cycles – mathematical modeling and validation on available experimental data." *Journal of Power Technologies* 102.1 (2022): 1, IF (z 2022r.): 0,6, MEiN: 40 pkt
- [17] Bogdan Vasylyv, Jarosław Milewski, Viktoriya Podhurska, Tomasz Wejrzanowski, Volodymyr Kulyk, Jakub Skibiński, Volodymyr Vira, **Łukasz Szablowski**, Arkadiusz Szczęśniak, Olaf Dybiński. "Study of the degradation of a fine-grained YSZ–NiO anode material during reduction in hydrogen and reoxidation in air". *Appl. Nanosci.* 12 (4), 965–975 (2022), IF (z 2022r.): 3,869, MEiN: 100 pkt

[18] Jarosław Milewski, Karol Cwieka, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, Tomasz Wejrzanowski, Jakub Skibinski, Olaf Dybiński, Aleksandra Lysik, Arkadiusz Sienko, Paweł Stanger. "Recycling electronic scrap to make molten carbonate fuel cell cathodes." *International Journal of Hydrogen Energy* 48(31), 11831-11843 (2023).

IF (z 2022r.): 7,2, MEiN: 140 pkt

[19] Jarosław Milewski, Piotr Lis, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, Olaf Dybiński, Kamil Futyma. "Prospects for the use of supercritical CO₂ cycles." *Journal of Power Technologies* 101.4 (2021).

MEiN: 40 pkt

[20] Jarosław Milewski, Tomasz Wejrzanowski, Kuan-Zong Fung, Arkadiusz Szczęśniak, Karol Cwieka, Shu-Yi Tsai, Olaf Dybiński, Jakub Skibiński, Jhih-Yu Tang, **Łukasz Szablowski**. "Supporting ionic conductivity of Li₂CO₃/K₂CO₃ molten carbonate electrolyte by using yttria stabilized zirconia matrix." *International Journal of Hydrogen Energy* 46(28), 14977-14987 (2021).

IF: 7.139, MEiN: 140 pkt

[21] Arkadiusz Szczęśniak, Jarosław Milewski, **Łukasz Szablowski**, Kamil Futyma. Numerical analysis of a Molten Carbonate Fuel Cell stack in emergency scenarios." *Journal of Energy Resources Technology* 142.9 (2020): 090904.

IF (z 2020r.): 2,903, MEiN 100 pkt

[22] Arkadiusz Szczęśniak, Jarosław Milewski, Łukasz Szablowski, Wojciech Bujalski, Olaf Dybiński. "Dynamic model of a molten carbonate fuel cell 1 kW stack." *Energy* 200 (2020): 117442.

IF (z 2020r.): 7,147, MEiN: 200 pkt

[23] Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, Olaf Dybiński, Andrzej Miller „Artificial neural network model of molten carbonate fuel cells: Validation on experimental data." *International Journal of Energy Research* 43.13 (2019): 6740-6761.

IF (z 2019): 3,741, MEiN: 100 pkt

[24] Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, Rafał Bernat, Key Parameters of Proton-conducting Solid Oxide Fuel Cells from the Perspective of Coherence with Models, *Fuel Cells* 2020, 20(3), 323-331.

IF (z 2020r.): 2.25, MEiN 70 pkt

[25] Robert Baron, Tomasz Wejrzanowski, **Łukasz Szablowski**, Arkadiusz Szczęśniak, Jarosław Milewski, Kuan-Zong Fung, Dual ionic conductive membrane for molten carbonate fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 2018, 43(16), 8100-8104.

IF (z 2018 r.): 4,084, MNiSW: 35 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[26] Robert Baron, Tomasz Wejrzanowski, Jarosław Milewski, **Łukasz Szablowski**, Arkadiusz Szczęśniak, Kuan-Zong Fung, Manufacturing of γ -LiAlO₂ matrix for molten carbonate fuel cell by high-energy milling, *International Journal of Hydrogen Energy* 2018, 43(13), 6696-6700.

IF (z 2018 r.): 4,084, MNiSW: 35 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[27] Jarosław Milewski, Tomasz Wejrzanowski, Kuan-Zong Fung, **Łukasz Szablowski**, Robert Baron, Jhih-Yu Tang, Arkadiusz Szczęśniak, Chung-Ta Ni, Temperature influence on six layers samaria doped ceria matrix impregnated by lithium/potassium electrolyte for Molten Carbonate Fuel Cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 2018, 43(1), 474-482.

IF (z 2018 r.): 4,084, MNiSW: 35 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[28] Jarosław Milewski, Arkadiusz Sięńko, Tomasz Wejrzanowski, Armen Jaworski, **Łukasz Szablowski**, Karol Ćwieka, Artur Olszewski, Arkadiusz Szczęśniak, Jakub Skibiński, Olaf Dybiński „The investigation of cathode layer of Molten Carbonate Fuel Cell manufactured by using printing techniques.” *Journal of Power Technologies* 99,2 (2019): 82.

MEiN: 40 pkt

[29] **Łukasz Szablowski**, Paweł Bralewski, Impact of development of infrastructure for charging electric vehicles on power demand in the national power system, *Civil and Environmental Engineering Reports* 2019, 29(1), 66-91.

MEiN: 20 pkt

[30] Mateusz Mostowy, **Łukasz Szablowski**, Comparison of the Brayton-Brayton Cycle with the Brayton-Diesel Cycle, *Journal of Power Technologies* 2018, 98(1), 97–105.

MNiSW: 12 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[31] Piotr Krawczyk, **Łukasz Szablowski**, Krzysztof Badyda, Sotirios Karellas, Emmanuel Kakaras, Impact of selected parameters on performance of the Adiabatic Liquid Air Energy Storage system. *Journal of Power Technologies* 2016, 96(4), 238-244.

MNiSW: 12 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[32] Jarosław Milewski, **Łukasz Szablowski**, Krzysztof Badyda, Magazynowanie energii za pośrednictwem sprężonego powietrza, *Rynek Energii* 2017, 130(3), 45-59.

MNiSW: 11 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[33] Krzysztof Badyda, Przemysław Kołodziejak, **Łukasz Szablowski**, Analiza możliwości adaptacji skraplacza do roli wymiennika ciepłowniczego, *Rynek Energii* 2017, 132(5), 3-14.

MNiSW: 11 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[34] Jarosław Milewski, Krzysztof Badyda, **Łukasz Szablowski**, Compressed Air Energy Storage Systems, *Journal of Power Technologies* 2016, 96(4), 245-260.

MNiSW: 12 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[35] Jarosław Milewski, Marcin Wołowicz, **Łukasz Szablowski**, Andrzej Miller, Procedury uczenia sztucznych sieci neuronowych modelu węglanowego ogniwa paliwowego, *Rynek Energii* 2015, 117(2), 99-106.

MNiSW: 11 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

[36] **Łukasz Szablowski**, Jarosław Milewski, Krzysztof Badyda, Cooperation of energy sources in distributed generation, *Rynek Energii* 2014, 6(115), 120-131.

MNiSW: 9 pkt (punktacja sprzed 2019 roku)

3.4 WYKAZ OSIĄGNIĘĆ PROJEKTOWYCH, KONSTRUKCYJNYCH, TECHNOLOGICZNYCH (Z ZAZNACZENIEM POZYCJI NIEWYMIENIONYCH W PKT I.3)

Nie dotyczy

3.5 WYKAZ PUBLICZNYCH REALIZACJI DZIEŁ ARTYSTYCZNYCH (Z ZAZNACZENIEM POZYCJI NIEWYMIENIONYCH W PKT I.3)

Nie dotyczy.

3.6 WYKAZ WYSTĄPIEŃ NA KRAJOWYCH LUB MIĘDZYNARODOWYCH KONFERENCJACH NAUKOWYCH

Na wszystkich wymienionych konferencjach (niezależnie od przedstawionej kolejności autorów) wyniki prezentowałem osobiście.

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

Wystąpienia na zaproszenie:

Brak

Wystąpienia zwykłe:

1) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, J. Kuta, K. Badyda, Strategia sterowania silnika tłokowego zasilanego gazem ziemnym pracującego w systemie energetyki rozproszonej, Rynek Energii, Kazimierz Dolny, czerwiec 2011.

2) J. Milewski, **Ł. Szablowski**, J. Kuta. Optimal control strategy of NG piston engine as a DG unit obtained by an utilization of Artificial Neural Network, Proceedings of the 2012 Mechanical Engineering Annual Conference on Sustainable Research and Innovation, Vol 4, 3rd-4th May 2012, Nairobi, Kenya, pp. 52-58

3) J. Milewski, **Ł. Szablowski**, J. Kuta. ANN-based Control Strategy for IC Engine to operate in DG, Proceeding of 5th International Mechanical Engineering Forum 2012, 20th-22nd June 2012, Praga, Republika Czeska, pp. 683-699

4) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, J. Kuta. Optimal control strategy of μ -turbine as a DGi unit obtained by an utilization of Artificial Neural Network, Proceedings of 3rd International Conference Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE2012, 18-20 September 2012, Gliwice, Polska, pp. 259-260

5) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, J. Kuta, Wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej do przewidywania zapotrzebowania na moc elektryczną, Zarządzanie Energią i Teleinformatyka 2013, Nałęczów 20-22 lutego 2013.

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

Wystąpienia na zaproszenie:

6) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, T. Wejrzanowski, K.-Z. Fung, R. Baron, J.-Y. Tang, A. Szczesniak, C.-T. Ni, Temperature influence on two layers Yttria-Stabilized Zirconia matrix impregnated by lithium/potassium electrolyte for Molten Carbonate Fuel Cells, 6th International Symposium on Advanced Ceramics and Technology for Sustainable Energy Applications toward a Low Carbon Society (ACTSEA 2017), 31 października - 3 listopada 2017, Kaohsiung, Tajwan

Wystąpienia zwykłe:

7) **Ł. Szablowski**, A. Beyene, Pyrolysis of multi-phase media with thermal energy recovery, Proceedings of ECOS 2014 - the 27th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, June 15-19, 2014, Turku, Finlandia.

8) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, K. Badyda. Współpraca źródeł energii w systemie rozproszonym, Rynek Ciepła 2014, Nałęczów 6-8 października 2014, pp. 25-48.

9) **Ł. Szablowski**, K. Badyda, J. Milewski, Analiza możliwości podwodnego magazynowania energii za pośrednictwem sprężonego powietrza, Rynek Gazu, Nałęczów, 22-24 czerwca 2015.

10) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, K. Badyda. Utilisation of a set of distributed generation sources controlled by artificial neural network to meet electricity demand of public utility buildings, Proceedings of ECOS 2015 - The 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, June 30-July 3, 2015, Pau, Francja.

- 11) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, K. Badyda. ANN-supported control strategy for a solid oxide fuel cell working on demand of public utility building. Proceedings of EFC2015, European Fuel Cell Technology & Applications Conference - Piero Lunghi Conference, December 16-18, 2015, Neapol, Włochy
- 12) J. Milewski, **Ł. Szablowski**, J. Kuta. Artificial neural network supported control strategy of μ -turbine working as a distributed generation unit. VI konferencja naukowo-techniczna Energetyka Gazowa, Zawiercie, 20-22 kwietnia 2016
- 13) **Ł. Szablowski**, P. Krawczyk, K. Badyda. Analiza energetyczna układu do magazynowania energii w oparciu o sprężone powietrze. VI konferencja naukowo-techniczna Energetyka Gazowa, Zawiercie, 20-22 kwietnia 2016.
- 14) S. Sałyga, **Ł. Szablowski**, K. Badyda, Energy analysis of underwater energy storage system based on compressed air, 12th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPRESSOR & TURBINE FLOW SYSTEMS - THEORY & APPLICATION AREAS (SYMKOM 2016 IMP2), Gdańsk, 18-19 października 2016
- 15) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, K. Badyda, Magazynowanie energii za pośrednictwem sprężonego powietrza, Zarządzanie Energią i Teleinformatyka 2017, Nałęczów, 20-22 lutego 2017.
- 16) P. Kołodziejak, K. Badyda, **Ł. Szablowski**, ANALIZA MOŻLIWOŚCI ADAPTACJI SKRAPLACZA BLOKU GAZOWO-PAROWEGO DAWNEJ EC STARACHOWICE DO ROLI WYMIENNIKA CIEPŁOWNICZEGO DLA POTRZEB EC W SIEDLCACH, Rynek Gazu/Rynek Ciepła 2017, Nałęczów, 26-28 czerwca 2017
- 17) **Ł. Szablowski**, J. Milewski, A. Szczęśniak, J. Kuta, ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEM ORIENTED TO AUTOMOTIVE APPLICATIONS, 5th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2018, 18-21 September 2018, Gliwice, Polska

- 18) P. Bralewski, **Ł. Szablowski**, IMPACT OF DEVELOPMENT OF INFRASTRUCTURE FOR CHARGING ELECTRIC VEHICLES ON POWER DEMAND IN THE NATIONAL POWER SYSTEM, 5th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2018, 18-21 September 2018, Gliwice, Polska
- 19) K. Kubiński, **Ł. Szablowski**, DYNAMIC MODEL OF SOLAR HEATING PLANT WITH SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE, 5th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2018, 18-21 September 2018, Gliwice, Polska
- 20) **Ł. Szablowski**, A. Szczęśniak, J. Milewski, K. Badyda, Energy and exergy analysis of underwater compressed air energy storage system, 32ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, czerwiec 23-28, 2019, Wrocław, Polska
- 21) **Ł. Szablowski**, A. Szczesniak, O. Dybinski, J. Milewski, MATHEMATICAL MODEL OF STEAM REFORMING IN ANODE CHANNEL OF MOLTEN CARBONATE FUEL CELL, European Fuel Cell Technology & Applications Conference - Piero Lunghi Conference EFC2019, 9-11 grudnia, 2019, Neapol, Włochy (poster)
- 22) M. Wójcik, **Ł. Szablowski**, O. Dybiński, A discussion on mathematical models of steam reforming process for the needs of fuel cells, 7th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2022, 20-23 września 2022, Polska
- 23) **Ł. Szablowski**, O. Dybiński, M. Wójcik, A. Martsinchyk, J. Milewski, The use of recycled catalyst for molten carbonate fuel cell fueled by methane, The 17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems SDEWES 2022, 6-10 listopada 2022, Pafos, Cypr
- 24) **Ł. Szablowski**, A. Szczęśniak, A. Martsinchyk, O. Dybiński, M. Wójcik, J. Milewski, The influence of temperature on internal steam methane reforming in molten carbonate fuel cell, ECOS 2023 - THE 36TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS 25-30 JUNE, 2023, LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, SPAIN (poster)

3.7 WYKAZ UDZIAŁU W KOMITETACH ORGANIZACYJNYCH I NAUKOWYCH KONFERENCJI KRAJOWYCH LUB MIĘDZYNARODOWYCH, Z PODANIEM PEŁNIONEJ FUNKCJI.

Nie dotyczy.

3.8 WYKAZ UCZESTNICTWA W PRACACH ZESPOŁÓW BADAWCZYCH REALIZUJĄCYCH PROJEKTY FINANSOWANE W DRODZE KONKURSÓW KRAJOWYCH LUB ZAGRANICZNYCH

Przed uzyskaniem stopnia doktora (zrealizowane):

1) 2010 – 2012 Opracowanie strategii sterowania źródłami pracującymi w systemie energetyki rozproszonej, grant NCN nr N N513 330938, charakter udziału – główny wykonawca.

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

Zrealizowane:

2) 2014 – 2016 Praca rozproszonych źródeł energii – strategię sterowania oparte o sztuczne sieci neuronowe, charakter udziału: **kierownik**, Narodowe Centrum Nauki, Projekt PRELUDIUM Nr 2013/09/N/ST8/02055 (rozpoczęty tuż przed obroną rozprawy doktorskiej).

3) 2015 – 2018 Wysokosprawne węglanowe ogniwa paliwowe, grant NCBiR nr PBS3/B4/14/2015, charakter udziału: wykonawca.

4) 2016 – 2019 Innovative matrix materials for molten carbonate fuel cells, grant NCBiR, charakter udziału: wykonawca.

5) 2016 – 2019 Udoskonalone wytwarzanie ogniw paliwowych mające na celu wydłużenie czasu eksploatacji, poprawę parametrów pracy, w szczególności mocy przypadającej na jednostkę objętości/masy ogniwa, oraz obniżenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych poprzez zastosowanie alternatywnych układów katalitycznych w technologii poligraficznej, jednostka finansująca: NCBR, nr grantu: POIR.01.02.00-00-0045/16, charakter udziału: podwykonawca.

6) 2017 – 2020 Opracowanie przemysłowej konstrukcji węglanowych ogniw paliwowych oraz ceramicznych elektrolizerów dających możliwość integracji z instalacjami energetycznymi power-to-gas, jednostka finansująca: NCBiR, nr grantu: POIR.01.02.00-00-0281/16-00, charakter udziału: podwykonawca.

7) 2017 – 2020 Nowy model protonowego ceramicznego ogniwa paliwowego (SOFC) oparty o parametry zredukowane, charakter udziału: wykonawca, grant OPUS NCN nr 2016/23/B/ST8/03056.

8) 2017 – 2020 Novel molten carbonate/ceramic composite materials for sustainable energy technologies with CO₂ capture and utilization, charakter udziału: wykonawca, nr projektu 4241, akronim: MOCO3, grant FCT / EU M-ERA.NET 2016.

W trakcie realizacji:

9) 2021 – 2024 Badania procesów parowego rozkładu metanu do wodoru w obecności zjawisk elektrochemicznych, charakter udziału: **kierownik**, Narodowe Centrum Nauki, Projekt SONATA nr 2020/39/D/ST8/02021.

3.9 WYKAZ CZŁONKOSTWA W MIĘDZYNARODOWYCH LUB KRAJOWYCH ORGANIZACJACH I TOWARZYSTWACH NAUKOWYCH WRAZ Z INFORMACJĄ O PEŁNIONYCH FUNKCJACH.

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

Brak.

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

Od 2022 członek ASME - The American Society of Mechanical Engineers (**poświadczenie P14**)

3.10 WYKAZ STAŻY W INSTYTUCJACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH, W TYM ZAGRANICZNYCH

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

a) 6-ciomiesięczny staż naukowy w San Diego State University (USA), który rozpoczął się 1 września 2013 r. a zakończył się 28 lutego 2014 r. (**poświadczenie P5**). W trakcie trwania stażu brałem udział w projektowaniu instalacji do ciśnieniowej pirolizy biomasy w ramach projektu finansowanego przez United States Department of Energy. Efektem stażu było również wdrożenie w postaci wybudowanej instalacji do ciśnieniowej pirolizy biomasy o wydajności 7200 lb/h. Jednym z efektów była również publikacja konferencyjna "L. Szablowski, A. Beyene. Pyrolysis of multi-phase media with thermal energy recovery, Proceedings of ECOS 2014 - the 27th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, June 15-19, 2014, Turku, Finland".

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

b) 3-miesięczny staż podoktorski w National Technical University of Athens (Grecja), który rozpoczął się 1 września 2015 a zakończył 30 listopada 2015 r. (**poświadczenie P1**). W trakcie trwania stażu przeprowadzono szereg prac związanych z modelowaniem i analizą egzergetyczną układów do magazynowania energii CAES i LAES, czego efektem są publikacje:

-Szablowski, L., Krawczyk, P., Badyda, K., Karellas, S., Kakaras, E., & Bujalski, W. (2017). Energy and exergy analysis of adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*, 138, 12-18.

-Krawczyk, P., Szablowski, L., Karellas, S., Kakaras, E., & Badyda, K. (2018). Comparative thermodynamic analysis of compressed air and liquid air energy storage systems. *Energy*, 142, 46-54.

-Krawczyk, P., Szablowski, L., Badyda, K., Karellas, S., & Kakaras, E. (2016). Impact of selected parameters on performance of the Adiabatic Liquid Air Energy Storage system. *Journal of Power Technologies*, 96(4), 238-244

Pierwsze dwie z tych publikacji uzyskały bardzo dużą liczę cytowań (wg stanu na dzień 20.09.2023 r.): pierwsza – 124 wg. Google Scholar, 101 wg Scopus, 90 wg WoS a druga – 131 wg. Google Scholar, 100 wg Scopus, 91 wg WoS.

c) 2-tygodniowy staż podoktorski w National Cheng Kung University (Tajwan), który rozpoczął się 23 października 2017 r. a zakończył się 3 listopada 2017 r. (**poświadczenie P2**). W trakcie trwania stażu prowadzono badania nad elektrolitami o podwójnym przewodnictwie jonowym dla wysokotemperaturowych ogniw paliwowych, czego efektem są następujące publikacje:

- Baron, R., Wejrzanowski, T., Szablowski, Ł., Szczęśniak, A., Milewski, J., & Fung, K. Z. (2018). Dual ionic conductive membrane for molten carbonate fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(16), 8100-8104.
- Milewski, J., Wejrzanowski, T., Fung, K. Z., Szablowski, Ł., Baron, R., Tang, J. Y., ... & Ni, C. T. (2018). Temperature influence on six layers samaria doped ceria matrix impregnated by lithium/potassium electrolyte for Molten Carbonate Fuel Cells. *international journal of hydrogen energy*, 43(1), 474-482.
- Baron, R., Wejrzanowski, T., Milewski, J., Szablowski, Ł., Szczęśniak, A., & Fung, K. Z. (2018). Manufacturing of γ -LiAlO₂ matrix for molten carbonate fuel cell by high-energy milling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(13), 6696-6700.
- Milewski, J., Wejrzanowski, T., Fung, K. Z., Liu, B. H. C., Szablowski, Ł., Baron, R., ... & Tang, J. Y. (2018, April). Improving a Molten Carbonate Fuel Cell Matrix Strength By Fiber Reinforcing. In *Meeting Abstracts* (No. 1, pp. 33-33). The Electrochemical Society

d) 2-tygodniowy staż podoktorski w Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS (Niemcy), który rozpoczął się 16 września 2019 r. a zakończył 27 września 2019 r. (**poświadczenie P3**). W trakcie trwania stażu wspólnie z naukowcami z Instytutu Fraunhofera napisałem wniosek grantowy ERC (ERC Starting Grant) o tytule „Additive Manufacturing of high temperature Fuel Cells”. Wniosek został pomyślnie złożony, aczkolwiek nie otrzymał finansowania.

e) 2-tygodniowy staż podoktorski w University of Aveiro (Portugalia), który rozpoczął się 13 maja 2019 r. a zakończył 24 maja 2019 r. (**poświadczenie P4**). W trakcie trwania stażu przeprowadzono badania kilku materiałów wchodzących w skład membran (oraz niektórych ogniw paliwowych) do separacji CO₂.

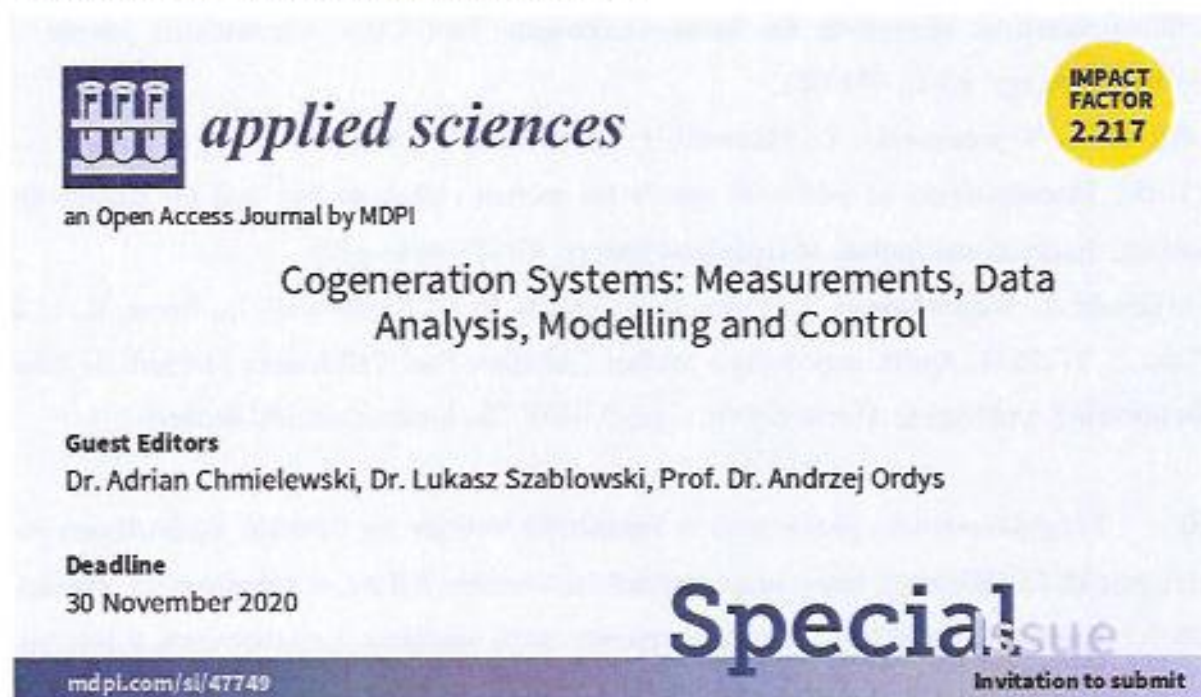
3.11 WYKAZ CZŁONKOSTWA W KOMITETACH REDAKCYJNYCH I RADACH NAUKOWYCH CZASOPISM

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

-Redaktor w *Journal of Power Technologies* wydawanym przez Instytut Techniki Ciepłej

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

- Redaktor pomocniczy w Journal of Energy Resources Technology (100 pkt wg MEiN, IF 3) wydawanym przez ASME (do sprawdzenia na stronie internetowej czasopisma)
- Redaktor w Journal of Power Technologies (IF 0,6) wydawanym przez Instytut Techniki Ciepłej
- Redaktor wydania specjalnego Applied Sciences



applied sciences
an Open Access Journal by MDPI

IMPACT FACTOR 2.217

Cogeneration Systems: Measurements, Data Analysis, Modelling and Control

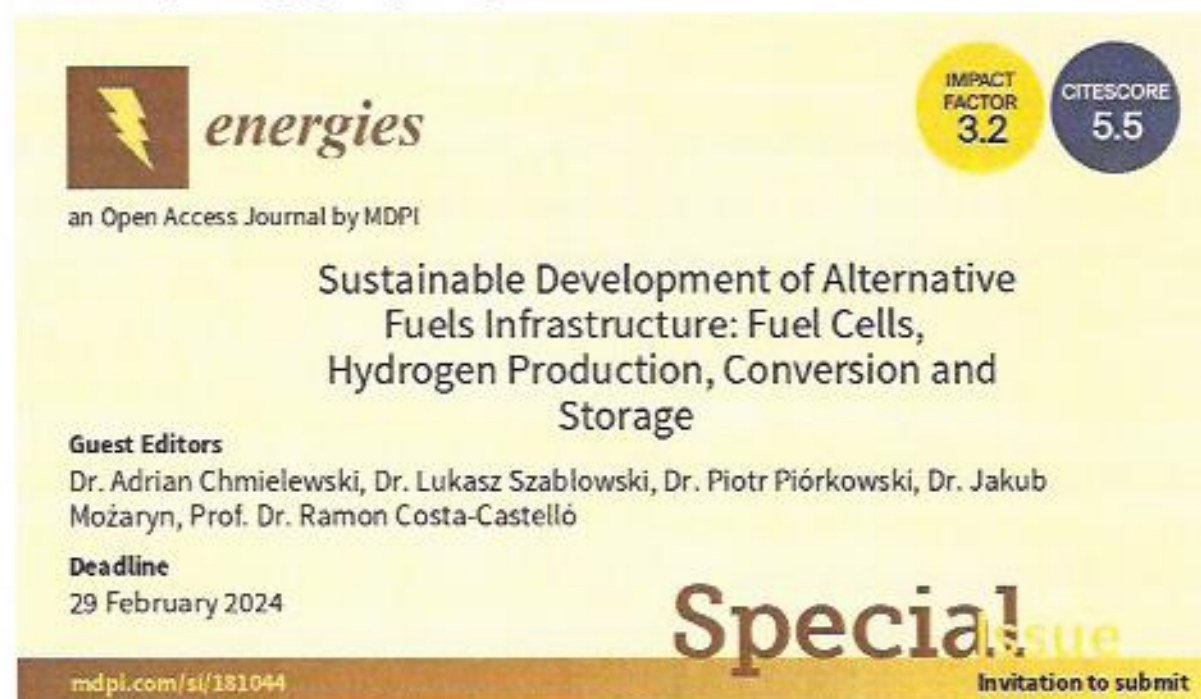
Guest Editors
Dr. Adrian Chmielewski, Dr. Łukasz Szablowski, Prof. Dr. Andrzej Ordys

Deadline
30 November 2020

Special Issue

mdpi.com/si/47749 **Invitation to submit**

- Redaktor wydania specjalnego Energies



energies
an Open Access Journal by MDPI

IMPACT FACTOR 3.2 **CITESCORE 5.5**

Sustainable Development of Alternative Fuels Infrastructure: Fuel Cells, Hydrogen Production, Conversion and Storage

Guest Editors
Dr. Adrian Chmielewski, Dr. Łukasz Szablowski, Dr. Piotr Piórkowski, Dr. Jakub Możaryn, Prof. Dr. Ramon Costa-Castelló

Deadline
29 February 2024

Special Issue

mdpi.com/si/181044 **Invitation to submit**

3.12 WYKAZ RECENZOWANYCH PRAC NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH, W SZCZEGÓLNOŚCI PUBLIKOWANYCH W CZASOPISMACH MIĘDZYNARODOWYCH

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

Brak

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

Energy (ISSN: 0360-5442) – 2 recenzje w latach 2018-2023.

International Journal of Energy Research (ISSN: 0363-907X) – 6 recenzji w latach 2018-2022.

Journal of Energy Resources Technology (ISSN: 0195-0738) – 3 recenzje w 2023r.

Architecture Civil Engineering Environment (ISSN: 1899-0142) – 1 recenzja w 2022r.

Applied Sciences (ISSN: 2076-3417) – 1 recenzja w 2021r.

Entropy (ISSN: 1099-4300) – 1 recenzja w 2023r.

3.13 WYKAZ UCZESTNICTWA W PROGRAMACH EUROPEJSKICH LUB INNYCH PROGRAMACH MIĘDZYNARODOWYCH

Nie dotyczy.

3.14 WYKAZ UDZIAŁU W ZESPOŁACH BADAWCZYCH, REALIZUJĄCYCH PROJEKTY INNE NIŻ OKREŚLONE W PKT. II.9

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

Brak.

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:**Zrealizowane:**

1) 2020 – 2022 Zastosowanie zaawansowanej analizy egzergetycznej do modelowania i oceny układów do magazynowania energii wykorzystujących sprężone powietrze, charakter udziału: **kierownik**, grant wewnętrzny w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

2) 2019 Wykorzystanie wytwarzania addytywnego do produkcji elementów wysokotemperaturowych elektrochemicznych źródeł energii, charakter udziału: **kierownik**, Grant Rektorski, Politechnika Warszawska (na przygotowanie wniosku grantowego ERC).

3) 2019 Opracowanie modelu dynamicznego i badania eksperymentalne procesu reformingu parowego zachodzącego bezpośrednio na anodzie ogniwa paliwowego MCFC, charakter udziału: **kierownik**, Grant Dziekański Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej (badania wstępne do grantu SONATA NCN).

W trakcie realizacji:

4) 2022 – 2024 Grant wspierający przygotowanie i opublikowanie artykułu przeglądowego w prestiżowym międzynarodowym czasopiśmie pt. „Omówienie modeli matematycznych procesu reformingu parowego na potrzeby ogniw paliwowych”, charakter udziału: **kierownik**, grant wewnętrzny w ramach programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

3.15 WYKAZ UCZESTNICTWA W ZESPOŁACH OCENIAJĄCYCH WNIOSKI O FINANSOWANIE BADAŃ, WNIOSKI O PRYZNANIE NAGRÓD NAUKOWYCH, WNIOSKI W INNYCH KONKURSACH MAJĄCYCH CHARAKTER NAUKOWY LUB DYDAKTYCZNY

Nie dotyczy

4 INFORMACJA O WSPÓŁPRACY Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

4.1 WYKAZ DOROBKU TECHNOLOGICZNEGO.

Nie dotyczy.

4.2 WSPÓŁPRACA Z SEKTOREM GOSPODARCZYM.

Nie dotyczy.

4.3 WYKAZ UZYSKANYCH PRAW WŁASNOŚCI PRZEMYSŁOWEJ, W TYM UZYSKANYCH PATENTÓW KRAJOWYCH LUB MIĘDZYNARODOWYCH.

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

Brak

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

- Zgłoszenie patentowe P-422085, Rafał Bernat, Jarosław Milewski, Arkadiusz Szczęśniak, **Łukasz Szablowski**, Uszczelnienie wysokotemperaturowych ogniów paliwowych, 30.06.2017
- Zgłoszenie patentowe P.427754, Karol Ćwicka, Tomasz Wejrzanowski, Robert Baron, Jarosław Milewski, **Łukasz Szablowski**, Arkadiusz Szczęśniak, Sposób wytwarzania katody węglanowego ogniwa paliwowego o wysokiej porowatości otwartej, 14.11.2018
- Zgłoszenie patentowe P.441399, Dybiński O., Martsinchyk A., Milewski J., Szczęśniak A., **Szablowski Ł.** Sposób regeneracji elektrolitu w węglanowym ogniwie paliwowym, 01.06.2022
- Zgłoszenie patentowe P.443556, **Szablowski Ł.**, Dybiński O. Adiatyczny układ do magazynowania energii, 24.01.2023

4.4 WYKAZ WDROŻONYCH TECHNOLOGII

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

- 1) Analiza możliwości adaptacji skraplacza bloku gazowo-parowego dawnej EC Starachowice do roli wymiennika ciepłowniczego dla potrzeb EC w Siedlcach, Siedlce, 2012 (**poświadczenie P12**).
- 2) Instalacja do ciśnieniowej pirolizy biomasy o wydajności 7200 lB/h, Stany Zjednoczone Ameryki, San Diego, 2014 (**poświadczenie P13**).

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

Brak.

4.5 WYKAZ WYKONANYCH EKSPERTYZ LUB INNYCH OPRACOWAŃ WYKONANYCH NA ZAMÓWIENIE INSTYTUCJI PUBLICZNYCH LUB PRZEDSIĘBIORCÓW.

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

1) Analiza możliwości adaptacji skraplacza bloku gazowo-parowego dawniej EC Starachowice do roli wymiennika ciepłowniczego dla potrzeb EC w Siedlcach, charakter udziału: wykonawca, Siedlce, 2012

Pomiędzy uzyskaniem stopnia doktora a uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego:

2) Wykonanie analizy egzergetycznej bloku klasy 500 MW, charakter udziału: **kierownik**, zlecenie komercyjne dla ENEA Wytwarzanie Sp. z o.o. (Elektrownia Kozienice), 2019 – 2020.

4.6 WYKAZ UDZIAŁU W ZESPOŁACH EKSPERTCKICH LUB KONKURSOWYCH.

Nie dotyczy.

4.7 WYKAZ PROJEKTÓW ARTYSTYCZNYCH REALIZOWANYCH ZE ŚRODOWISKAMI POZAARTYSTYCZNYMI.

Nie dotyczy.

5 DANE NAUKOMETRYCZNE (STAN NA DZIEŃ 20.09.2023)

5.1 INFORMACJA O SUMARYCZNYM WSPÓŁCZYNNIKU IMPACT FACTOR

Sumaryczny Impact Factor (wg Repozytorium PW): 115,75

5.2 INFORMACJA O LICZBIE CYTOWAŃ PUBLIKACJI WNIOSKODAWCY, Z ODDZIELNYM UWZGLĘDNIENIEM AUTOCYTOWAŃ.

	wg. Google Scholar	wg. Scopus	wg. Web of Science
Całkowita liczba cytowań	792	525	475
Liczba cytowań bez autocytowań:	n/a	390	420
Liczba publikacji w bazie:	78	54	39

5.3 INFORMACJA O POSIADANYM INDEKSIE HIRSCHA.

	wg. Google Scholar	wg. Scopus	wg. Web of Science
Indeks Hirscha	15	12	12

5.4 INFORMACJA O LICZBIE PUNKTÓW MNiSW/MEiN (WG REPOZYTORIUM PW)

Całkowita liczba publikacji	75
Sumaryczna punktacja MNiSW/MEiN:	3097

Łukasz
Szablowski

Elektronicznie
podpisany przez
Łukasz Szablowski
Data: 2023.09.21
14:41:15 +02'00'

.....
(podpis wnioskodawcy)