Technologie magazynowania energii w wodorze o istotnym znaczeniu aplikacyjnym (Doświadczenia Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej)

Janusz KOTOWICZ
Daniel Węcel
Włodzimierz Ogulewicz
Michał Jurczyk
Łukasz Bartela
Klaudia Dubiel

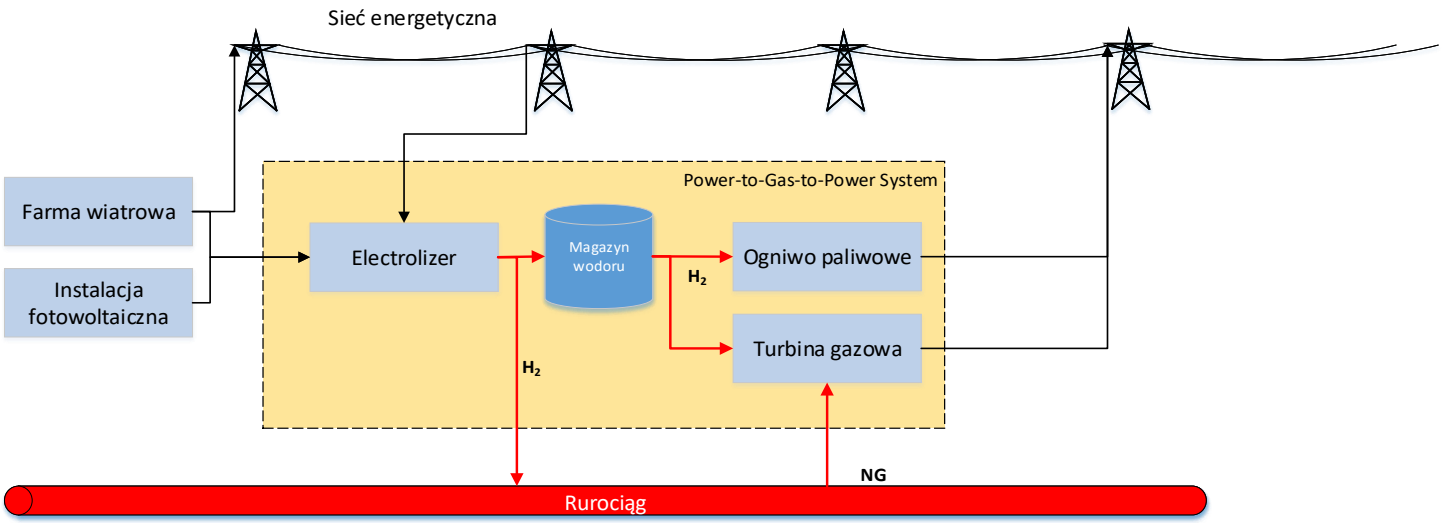
Komitet Problemów Energetyki PAN

Jabłonna, 14.09.2017

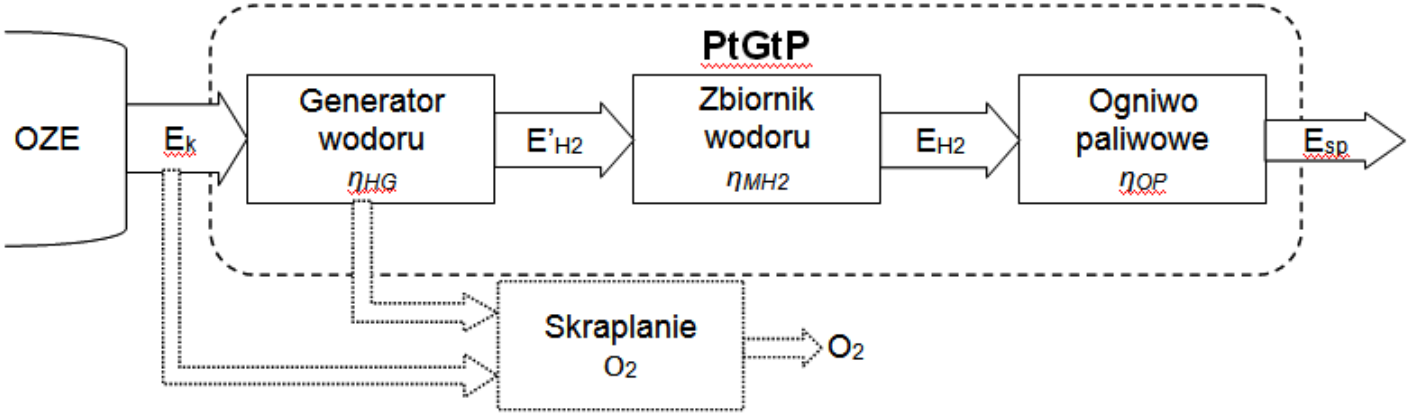
Zakres wystąpienia

1. Technologie Power to Gas.
2. Technologie Power to Gas to Power.
3. Eksperymentalne wyznaczanie charakterystyk generatora wodoru.
4. Eksperymentalne wyznaczanie charakterystyk ogniwa paliwowego.
5. Analizy techniczno - ekonomiczne.

Instalacje Power to Gas to Power

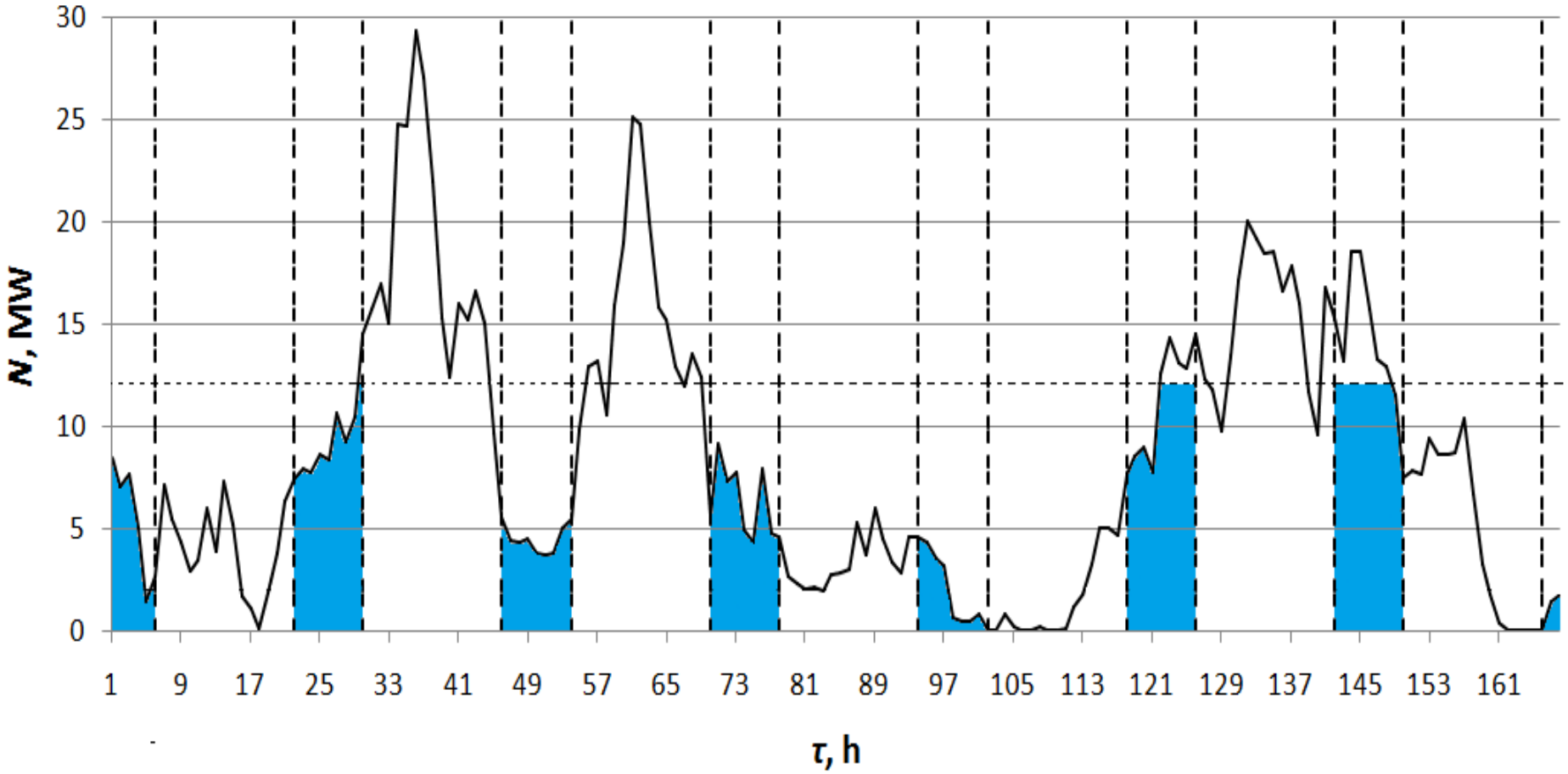


Schemat instalacji Power to Gas to Power

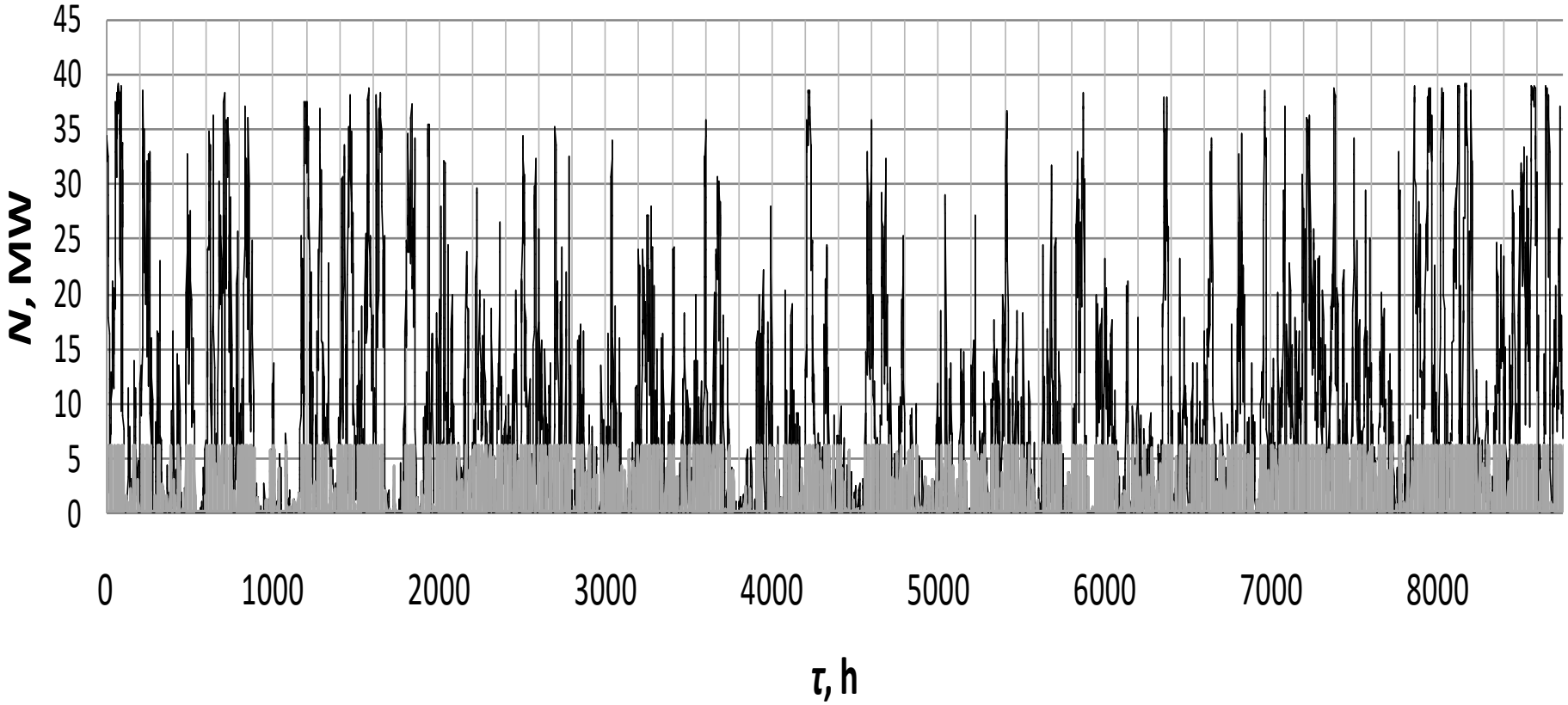


Schemat przepływu energii w instalacji Power to Gas to Power

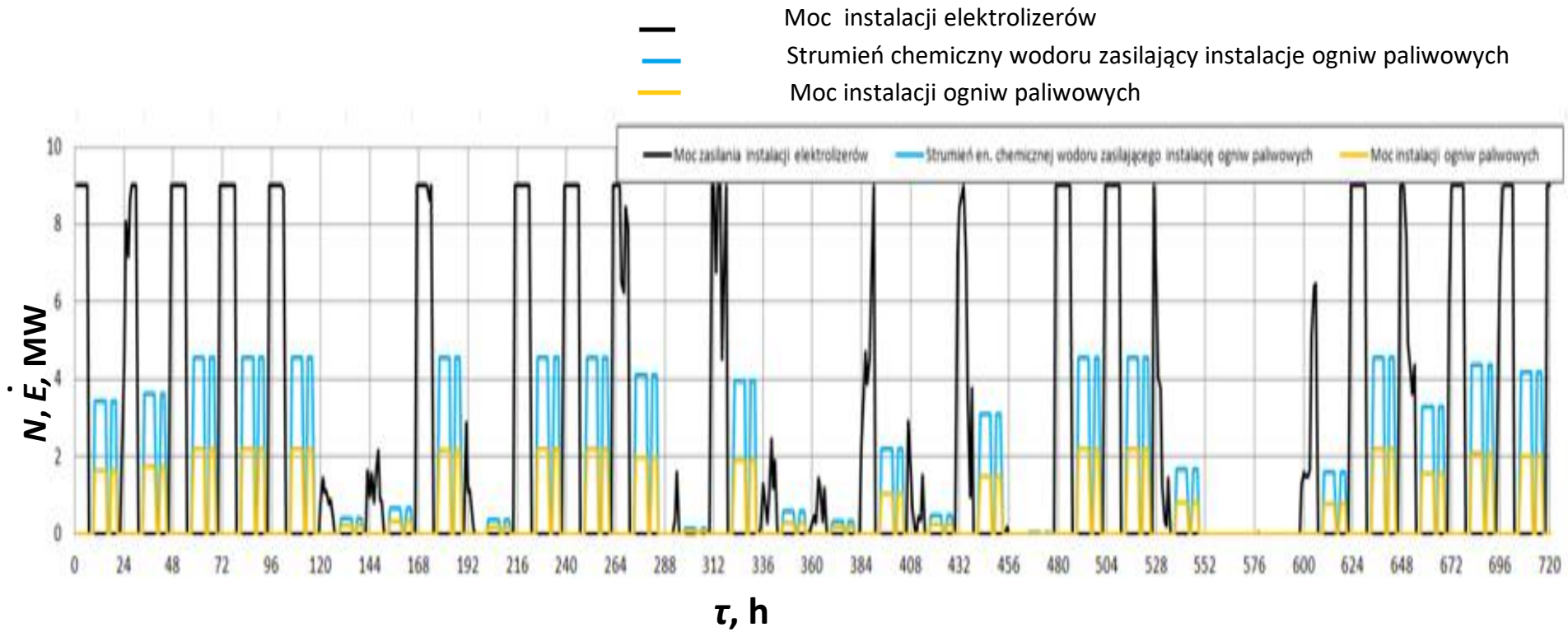
Praca OZE w cyklu tygodniowym



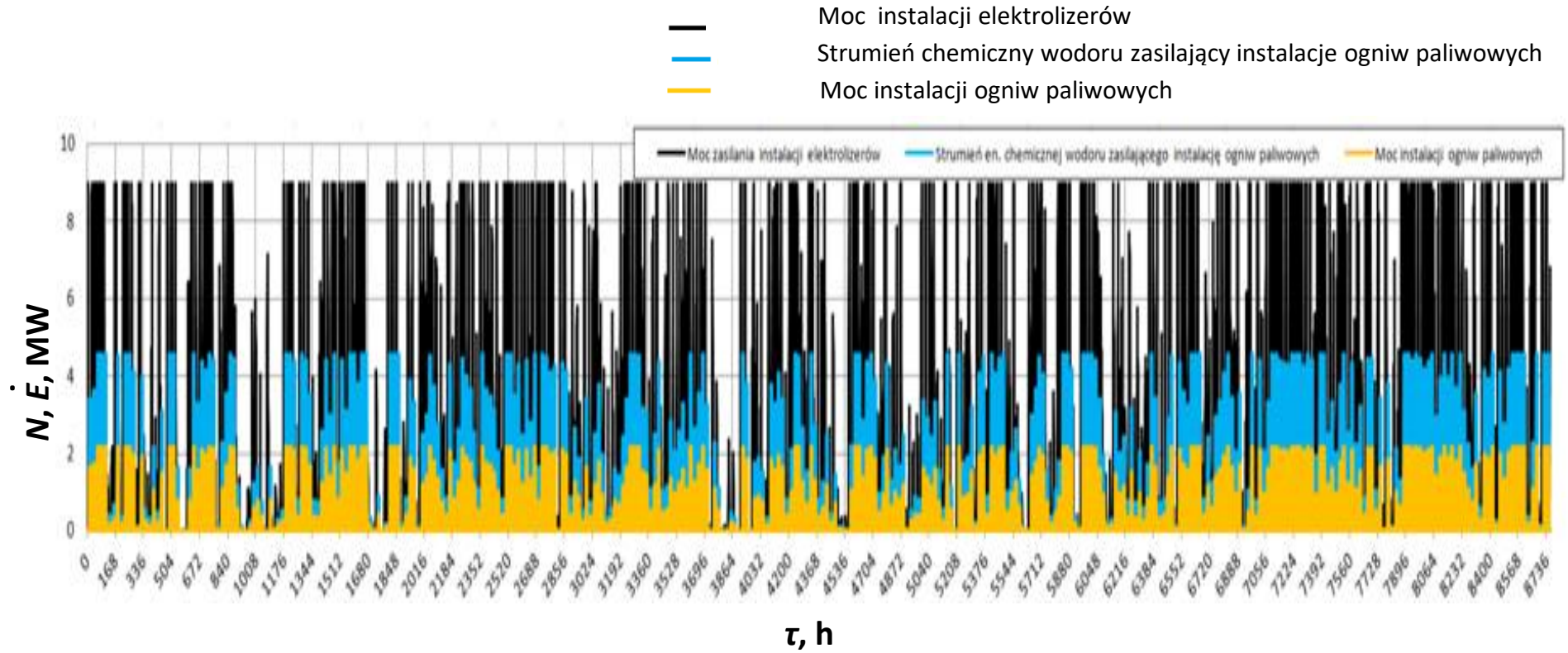
Praca OZE w cyklu rocznym



Charakterystyka pracy systemu Power to Gas w cyklu 30 dniowym



Charakterystyka pracy systemu Power to Gas w cyklu rocznym



Typy elektrolizerów (porównanie)

Typ elektrolizera	Alkaliczny	PEM
Stan technologii	Dojrzała	Dojrzała
Nośnik ładunku	OH^-	H^+
Materiał katody	Nikiel	Platyna
Materiał anody	Nikiel, Kobalt, Żelazo	Iryd, Ruten
Minimalna temperatura pracy	20°C	20°C
Maksymalna temperatura pracy	120°C	80 (90)°C
Elektrolit	Roztwór KOH lub NaOH	Stały polimer kwasu PFSA
Wydajność	1 – 500 Nm^3H_2/h	0,01 – 250 Nm^3H_2/h
Teoretyczny zakres ciśnień	0,1 – 20 MPa	0,1 – 35 MPa
Gęstość prądu	0,2 – 0,6 A/cm^2	0,6 – 3 A/cm^2
Napięcie komórki elektrolizera	1,8 – 2,4 V	1,7 – 2,4 V
Możliwość obciążenia cyklicznego	Średnie	Dobre
Trwałość elektrolizera	Poniżej 100 000 h	10 000 – 50 000 h
Energochłonność elektrolizera	4,2 – 5,9 kWh/ Nm^3H_2	4,1 – 5,6 kWh/ Nm^3H_2
Sprawność procesu elektrolizy	47 – 82%	62 – 90%
Konduktywność wody zasilającej	Poniżej 5 µS/cm	Poniżej 1 µS/cm
Czystość uzyskanego wodoru	99,9%	99,999%
Koszt	500 – 1000 Euro/kW	1000 – 3200 Euro/kW

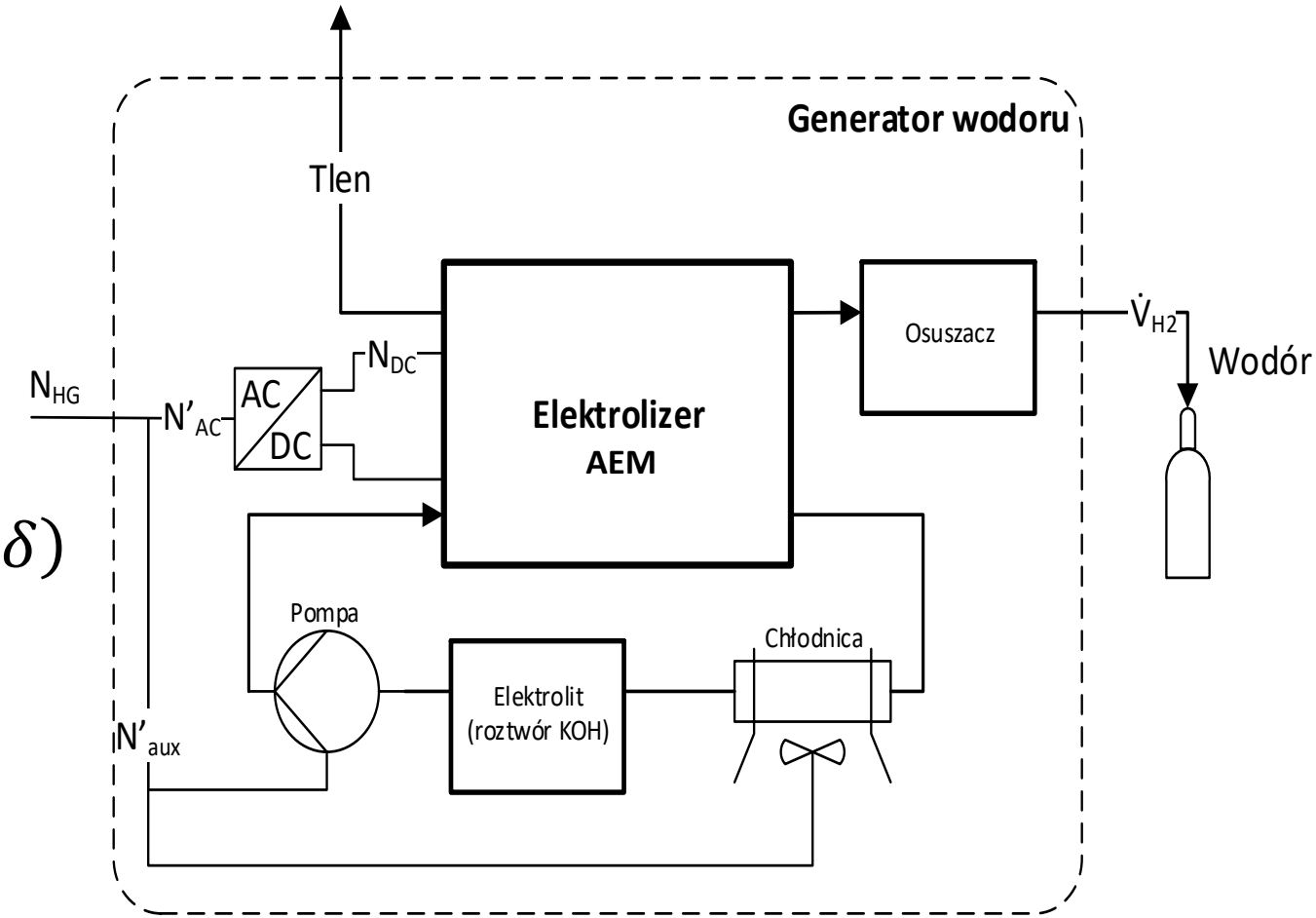
Generator wodoru (schemat sprawności)

$$\eta_{\mathrm{EC}} = \frac{\dot{V}_{\mathrm{H}_2} \cdot HHV}{N_{\mathrm{DC}}}$$

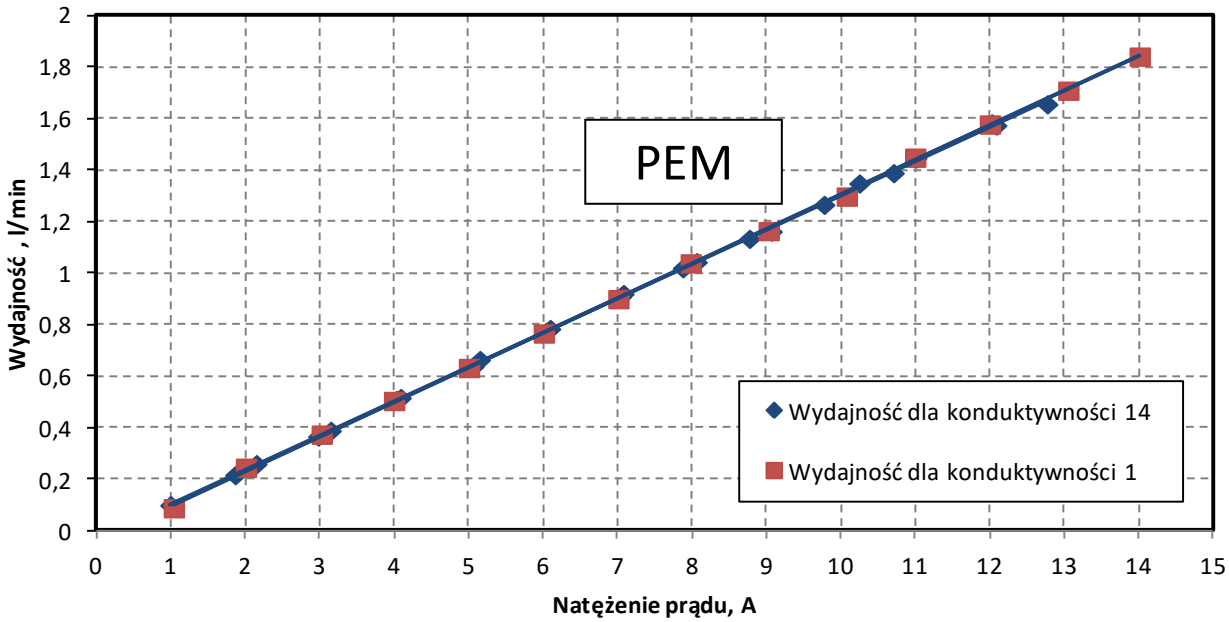
$$\eta_{\mathrm{HG}} = \frac{\dot{V}_{\mathrm{H}_2} \cdot HHV}{N_{\mathrm{HG}}}$$

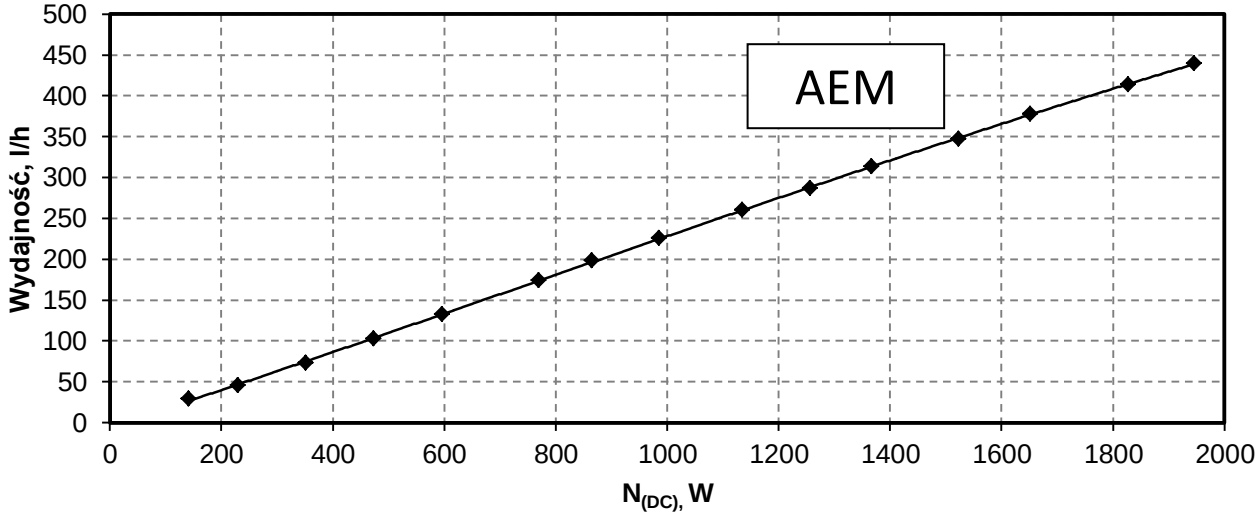
$$\eta_{\mathrm{HG}} = \eta_{\mathrm{EC}} \cdot (1 - \delta)$$

$$\delta = \frac{N'_{\mathrm{aux}} + \Delta N}{N_{\mathrm{HG}}}$$

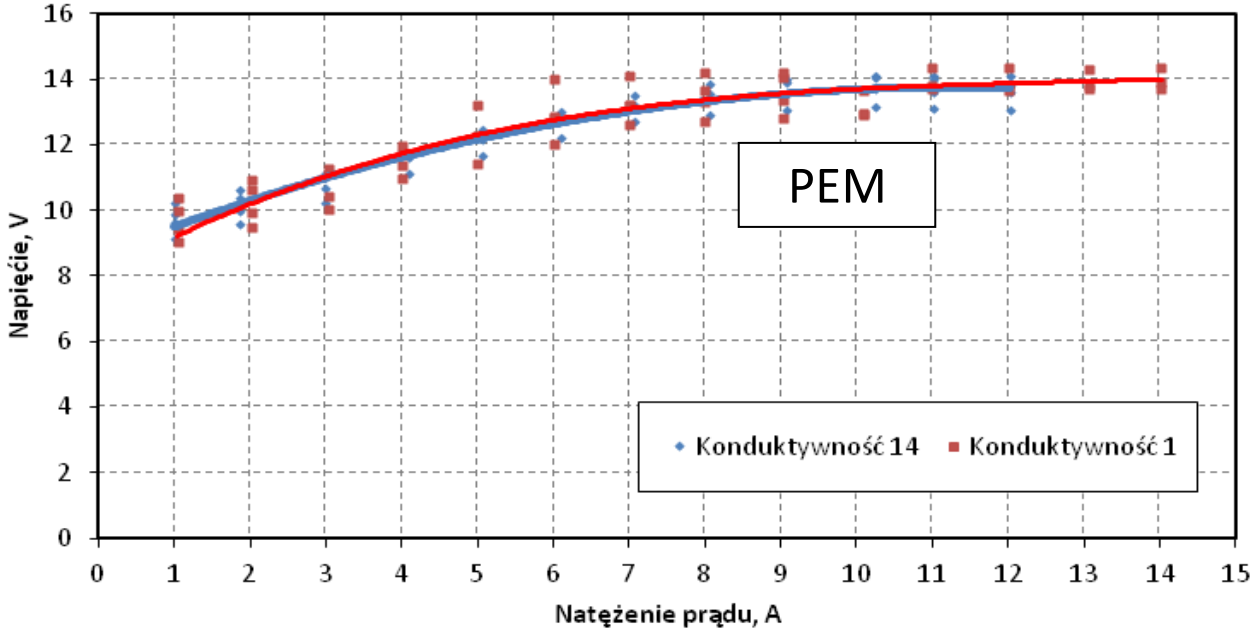


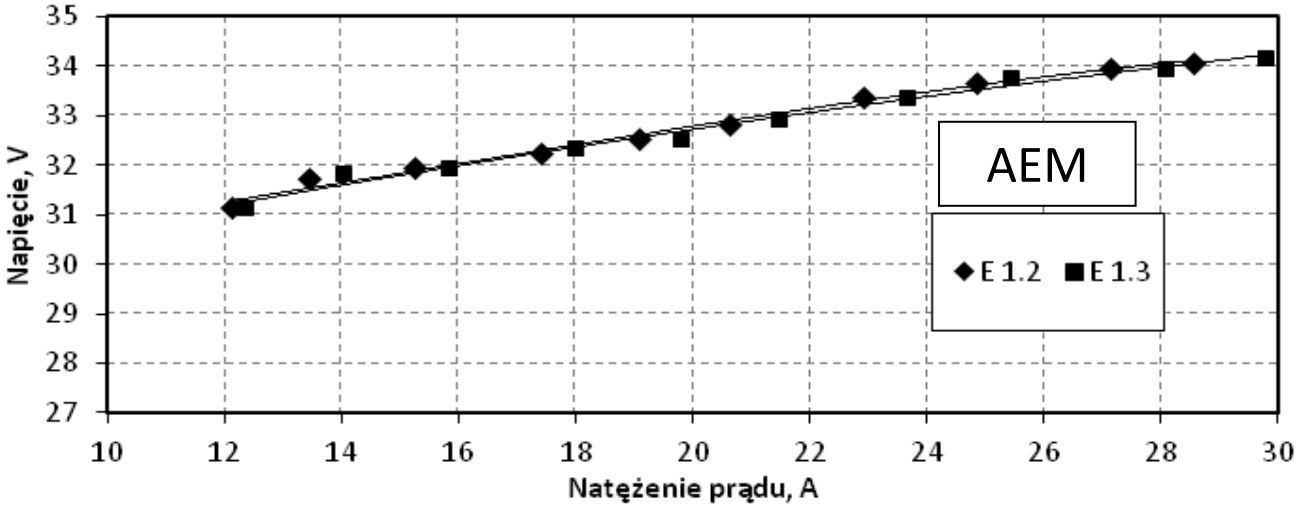
Charakterystyki wydajności



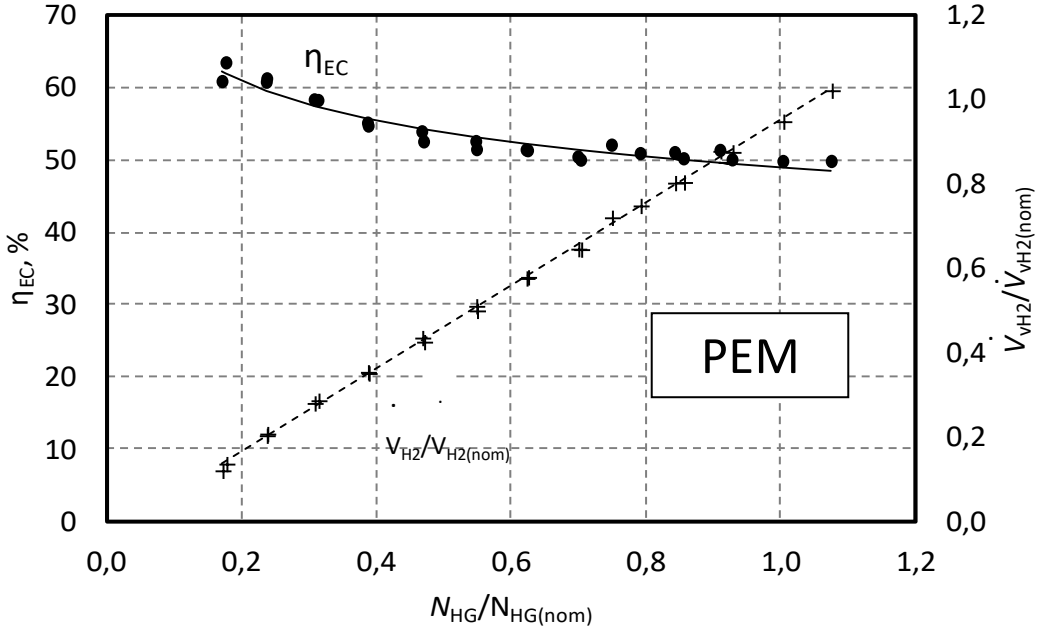


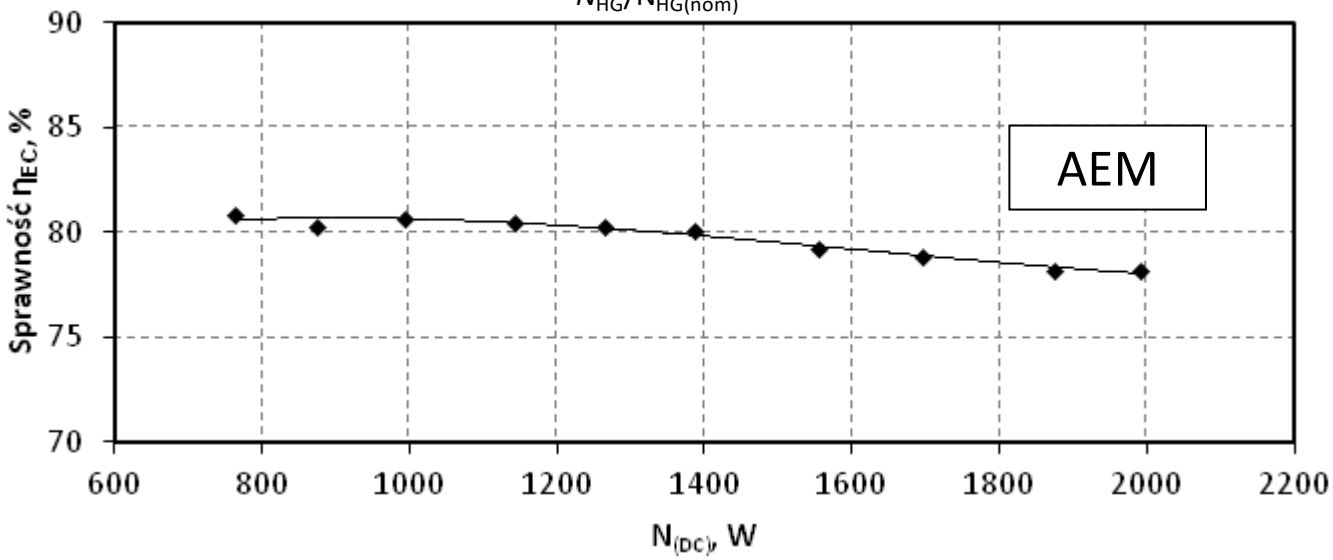
Charakterystyki prądowo-napięciowe



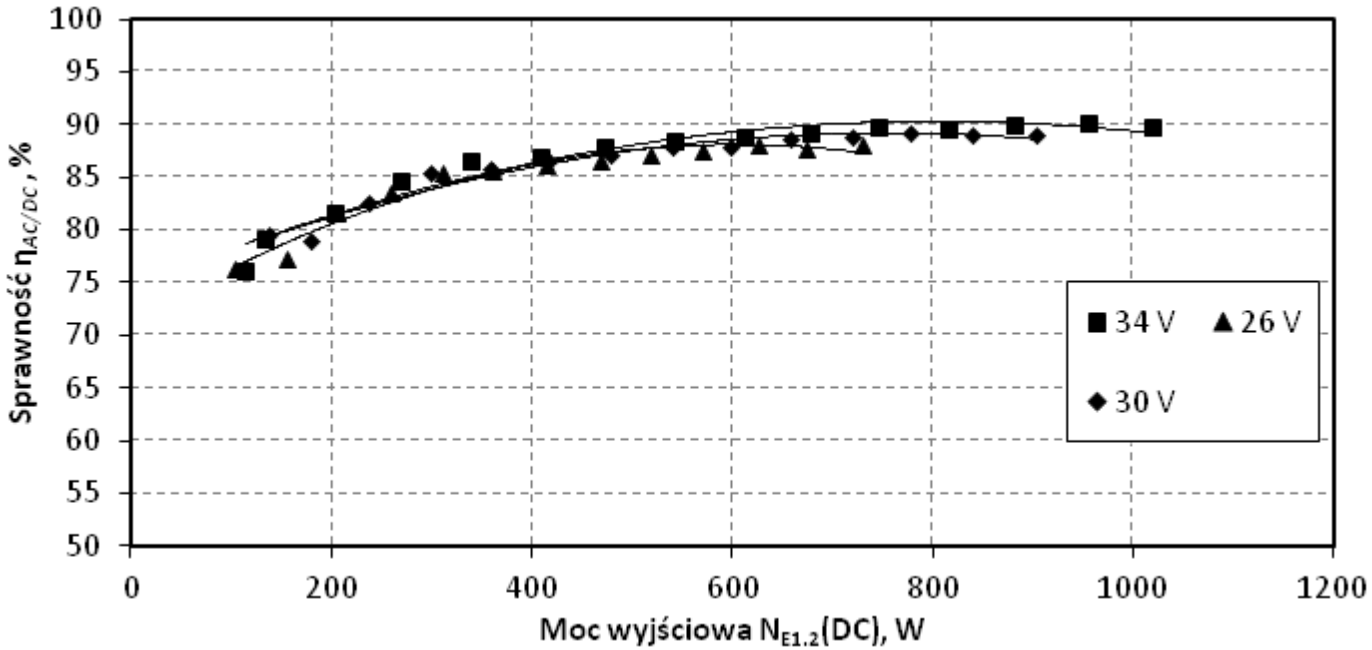


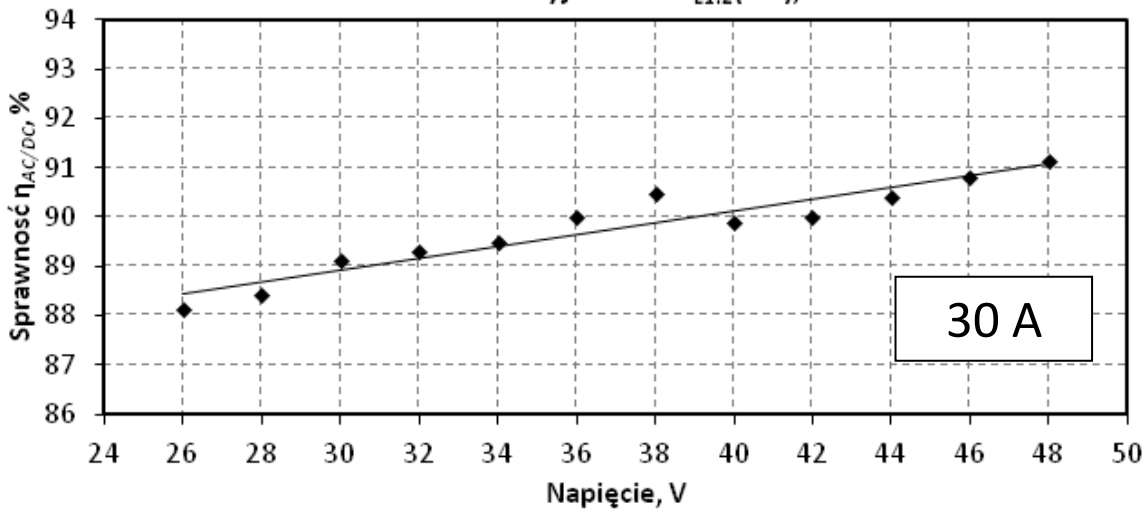
Charakterystyka sprawności elektrolizerów





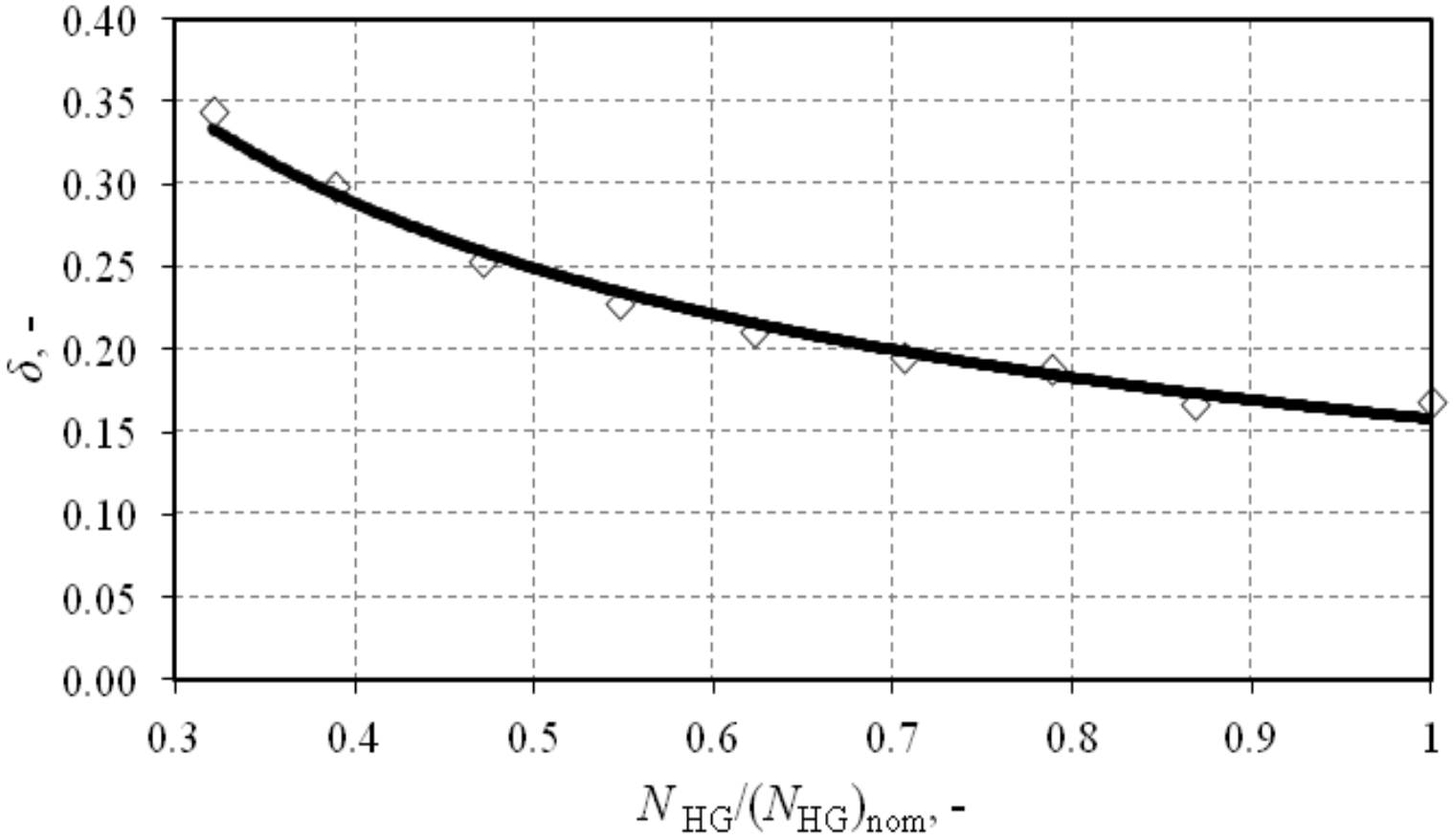
Charakterystyki przetwornic AC/DC (AEM)



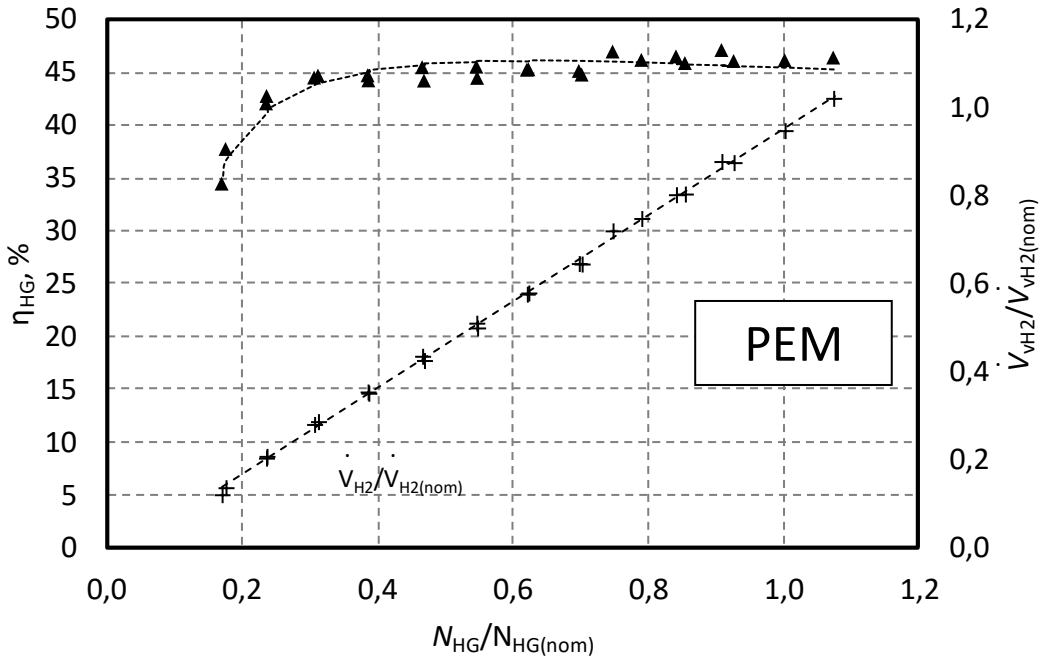


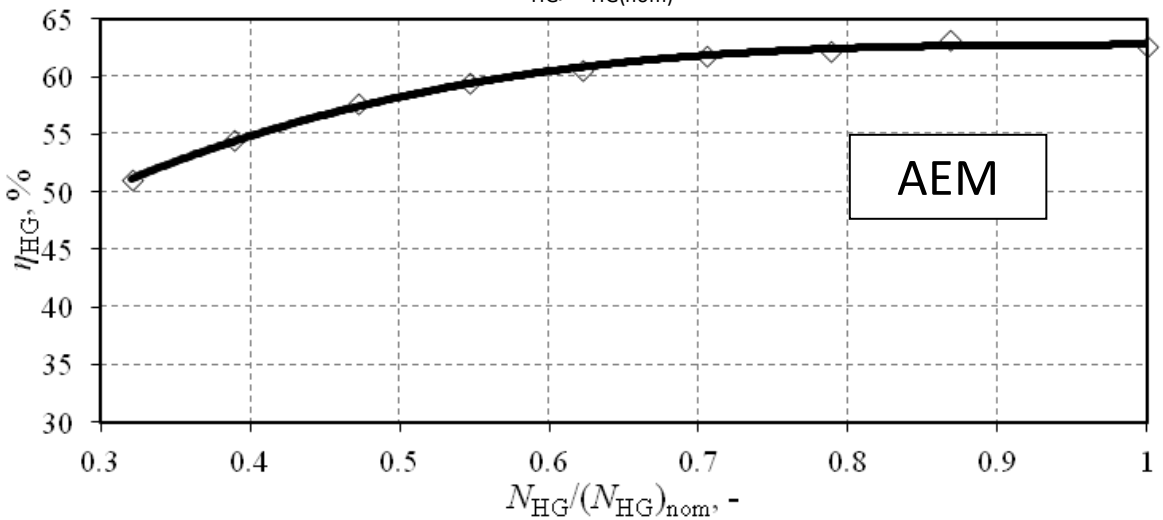
Wskaźnik potrzeb własnych (AEM)

$$\delta = \frac{N'_{\mathrm{aux}} + \Delta N}{N_{\mathrm{HG}}}$$

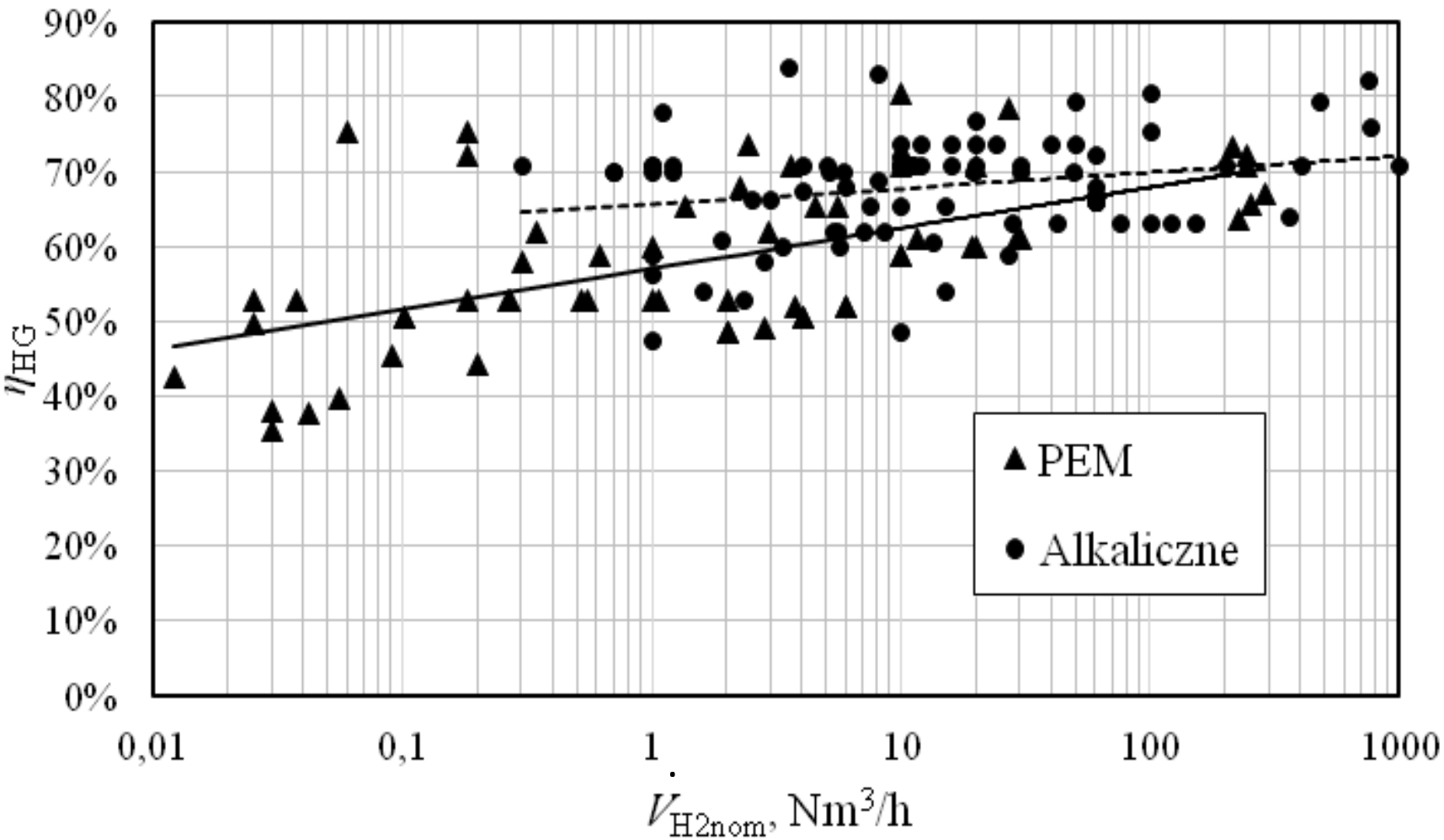


Sprawność generatora

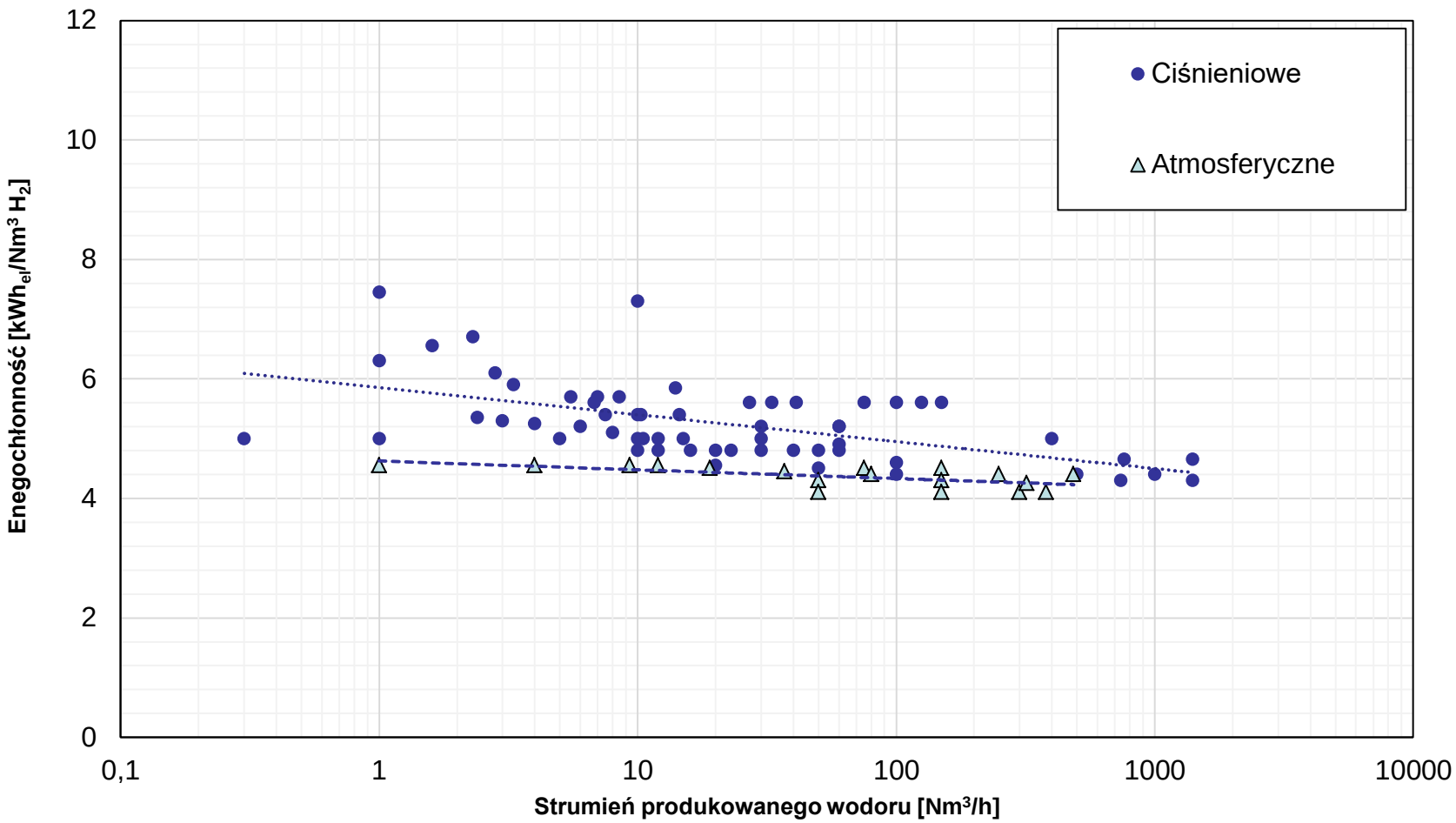




Sprawność komercyjnie dostępnych generatorów wodoru



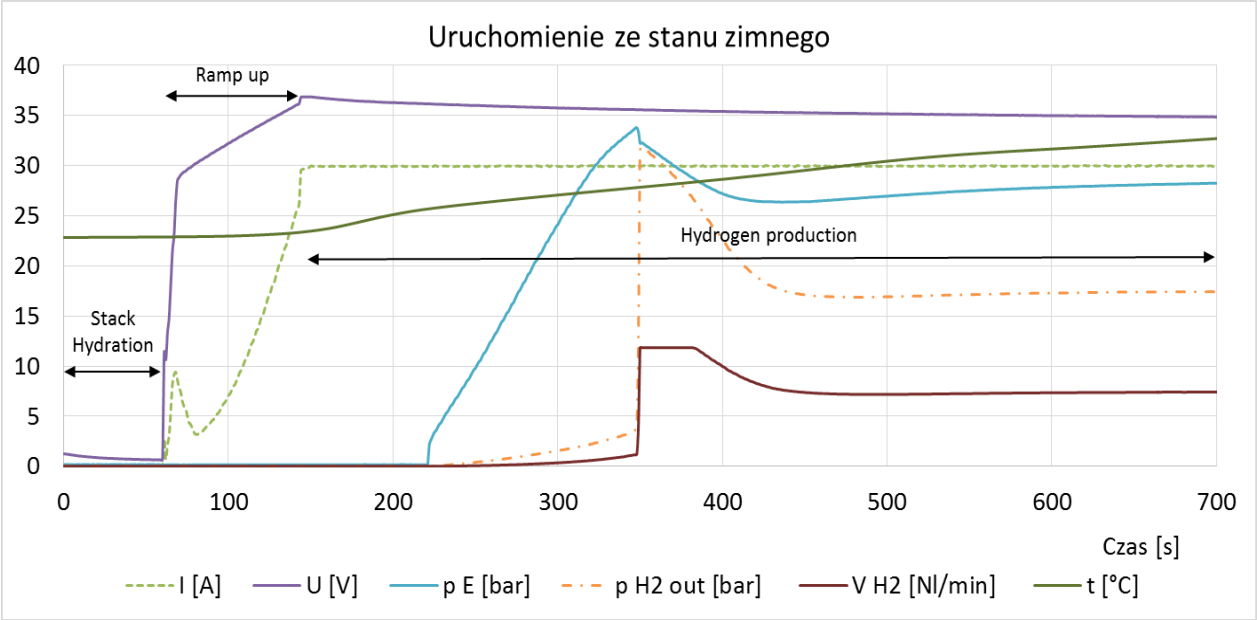
Energochłonność komercyjnie dostępnych elektrolizerów alkalicznych



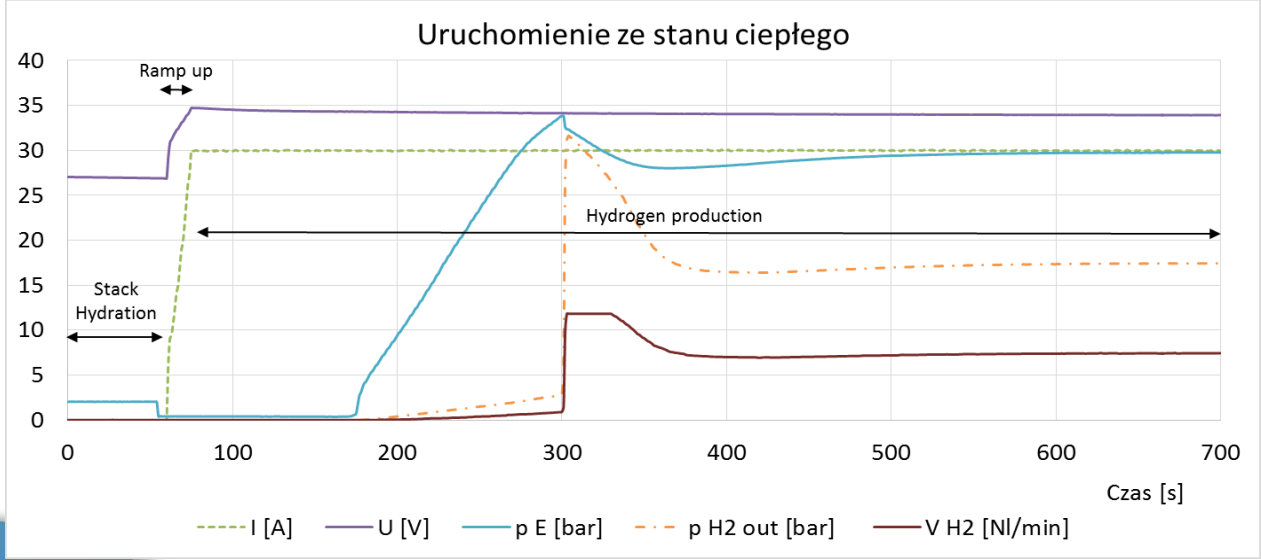
Stany pracy generatora (AEM)

Proces	Stan	Czas trwania	Moc AC, W
Filling/Refiling	Napełnianie/uzupełnianie zbiornika głównego roztworem KOH	Zależy od ilości uzupełnianego roztworu roboczego	100-110
Idle - Stand by	Tryb gotowości	-	34-35
Stack hydration/ heating	Cyrkulacja elektrolitu/Podgrzewanie elektrolitu	30-60 sekund Podgrzewanie roztworu KOH do temp. 20°C roboczego	120/320
Ramp up	Stopniowy rozruch urządzenia	10-60 sekund Wzrost natężenia prądu do maksymalnej wartości	min- max (120 do 2500)
Hydrogen production	Produkcja wodoru	Etap 1 ~60 sekund (Napełnianie wodorem instalacji modułu elektrolizera)	2400 - 2690
		Etap 2 ~60 sekund (Napełnianie wodorem instalacji modułu osuszacza)	2400 - 2690
		Etap 3 – Stabilna praca urządzenia	2400 - 2690
Ramp down	Stopniowe wyłączanie urządzenia	Kilka sekund	
Max pressure	Przekroczenie max ciśnienia	Kilka sekund przejście- w stan Ramp down	

Rozruch generatora (AEM) – Stany przejściowe

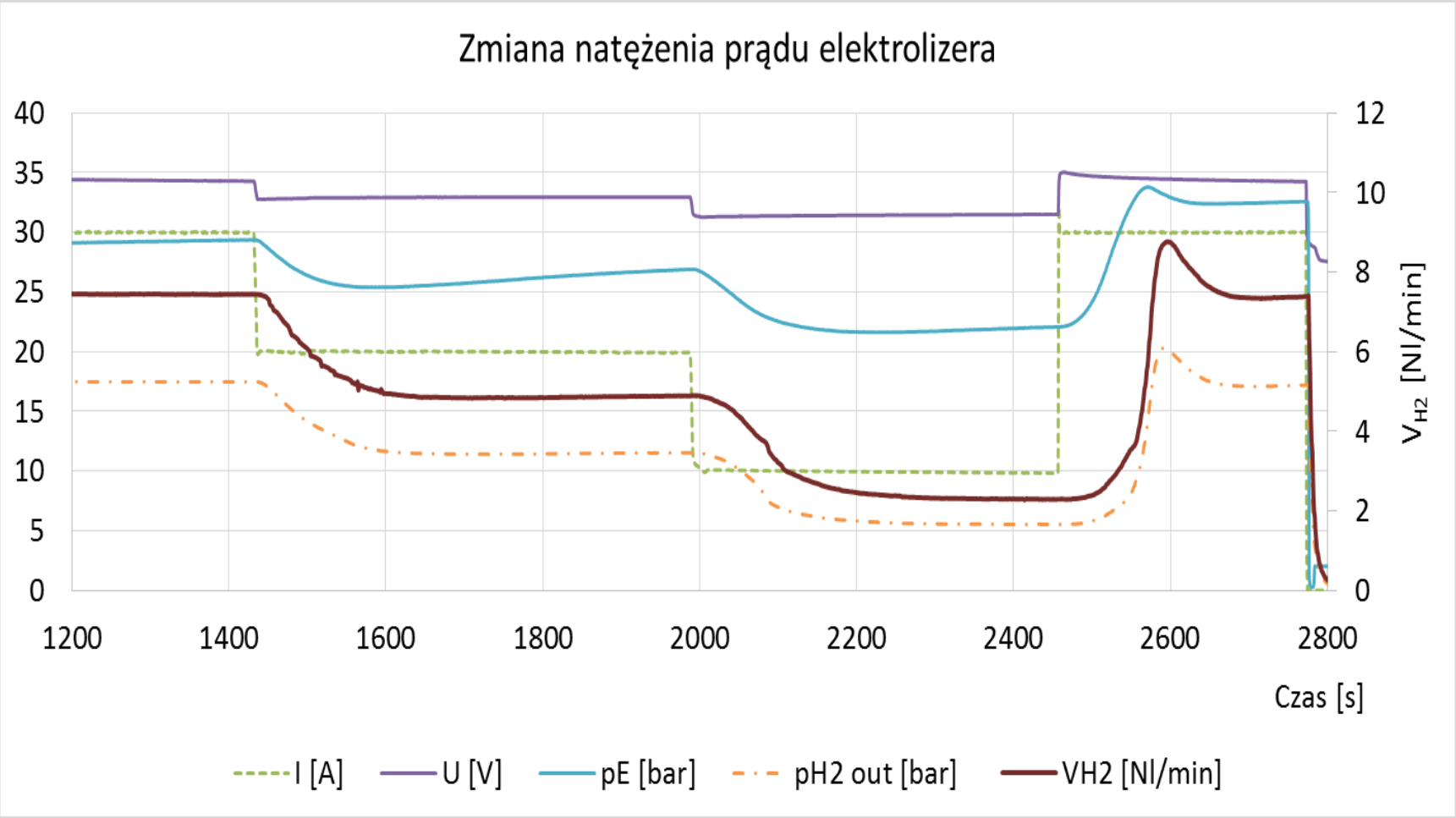


- uruchomienie następowało po dłuższym okresie przestoju, gdy elektrolit ma temperaturę otoczenia, a napięcie elektrolizerów jest bliskie 0 V.

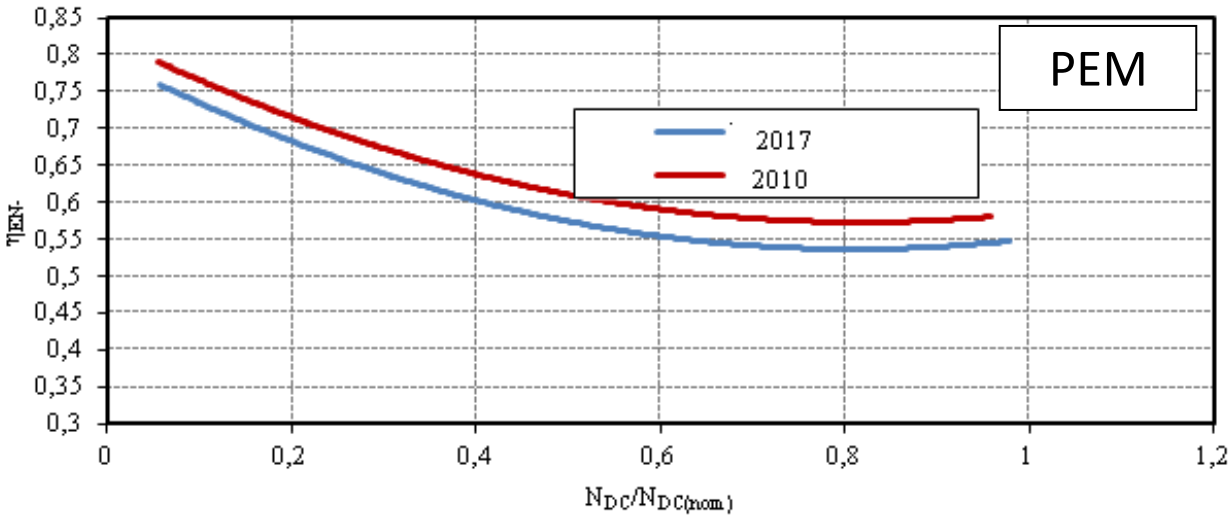


- uruchomienie następowało po krótkim okresie od wyłączenia zasilania elektrolizera, gdy elektrolit utrzymywał jeszcze temperaturę pracy rzędu 40°C, a napięcie elektrolizerów nie spadło poniżej 25 V.

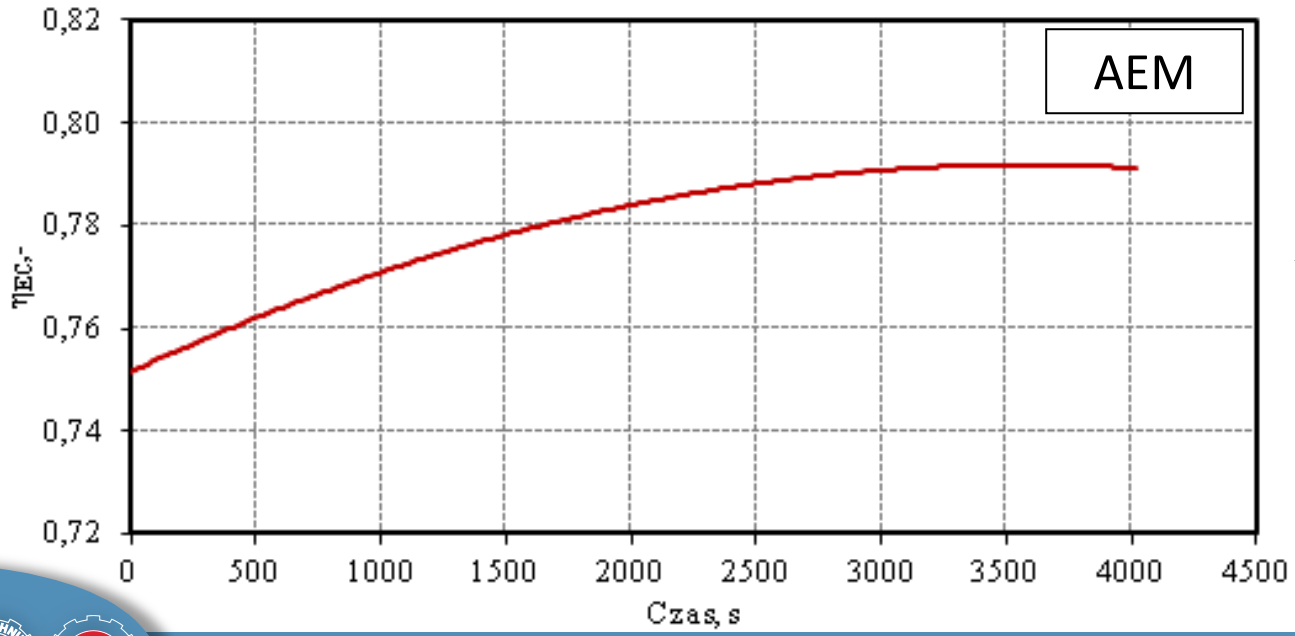
Charakterystyki pracy generatora (AEM)



Zmiana sprawności elektrolizerów

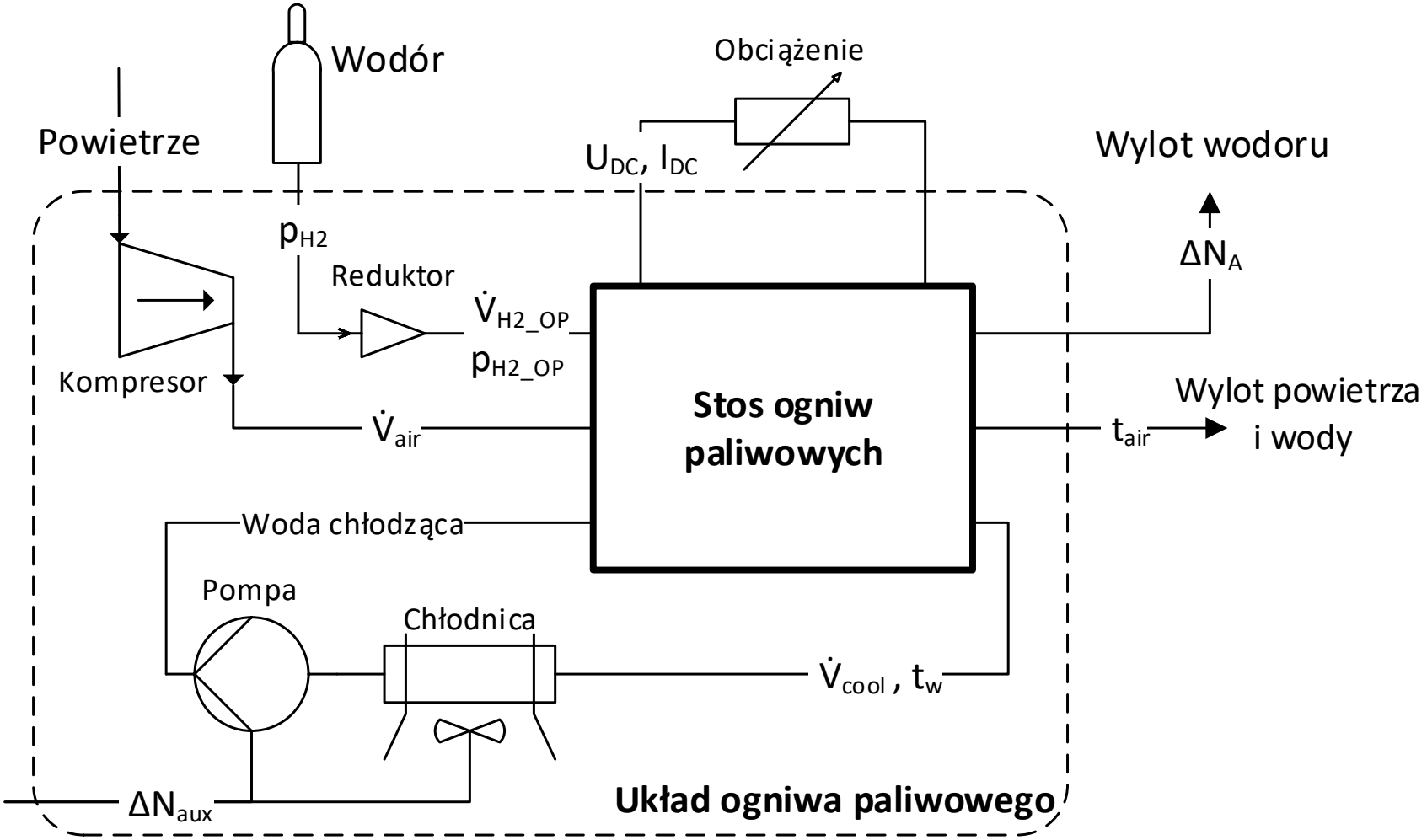


$$\eta_{EN} = \frac{n \cdot V^0}{U}$$



$$\eta_{EC} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot HHV}{N_{DC}}$$

Ogniwa paliwowe typu PEM



Charakterystyki ogniwa paliwowego

sprawność (brutto)

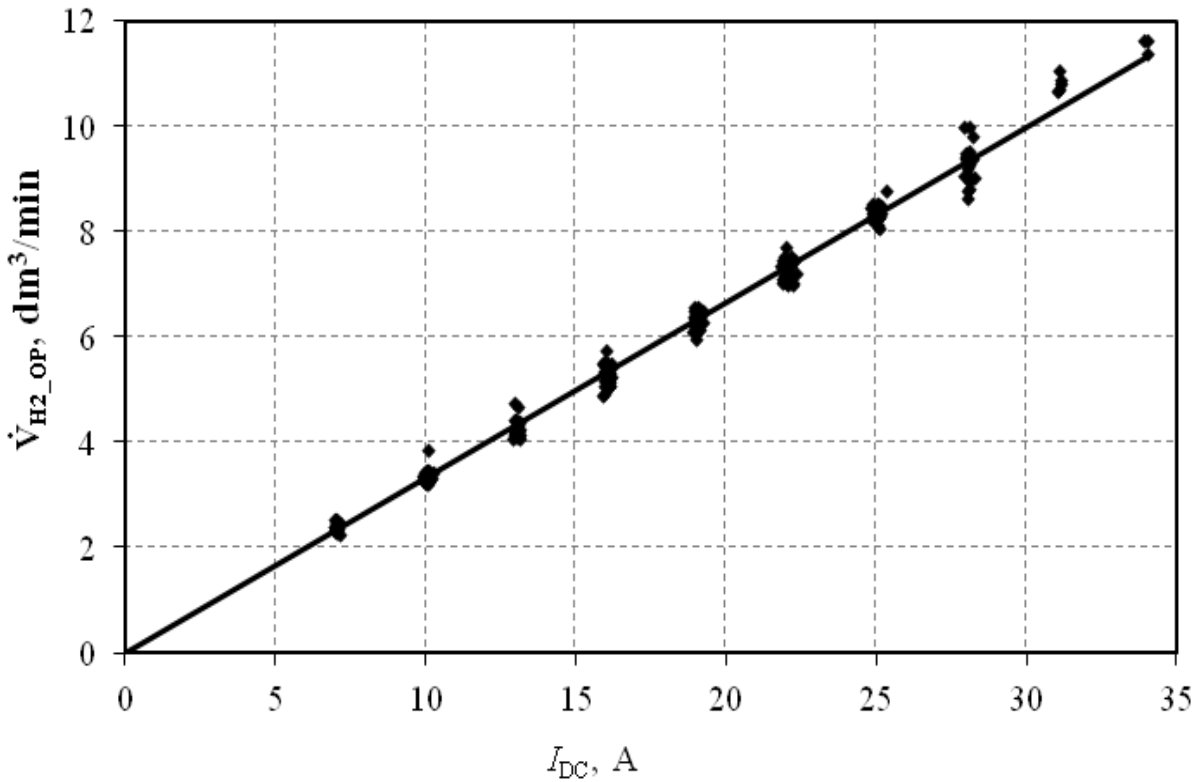
$$\eta_P = \frac{N_{OP}}{N_{\mathrm{H2}} - \Delta N_A}$$

sprawność (netto)

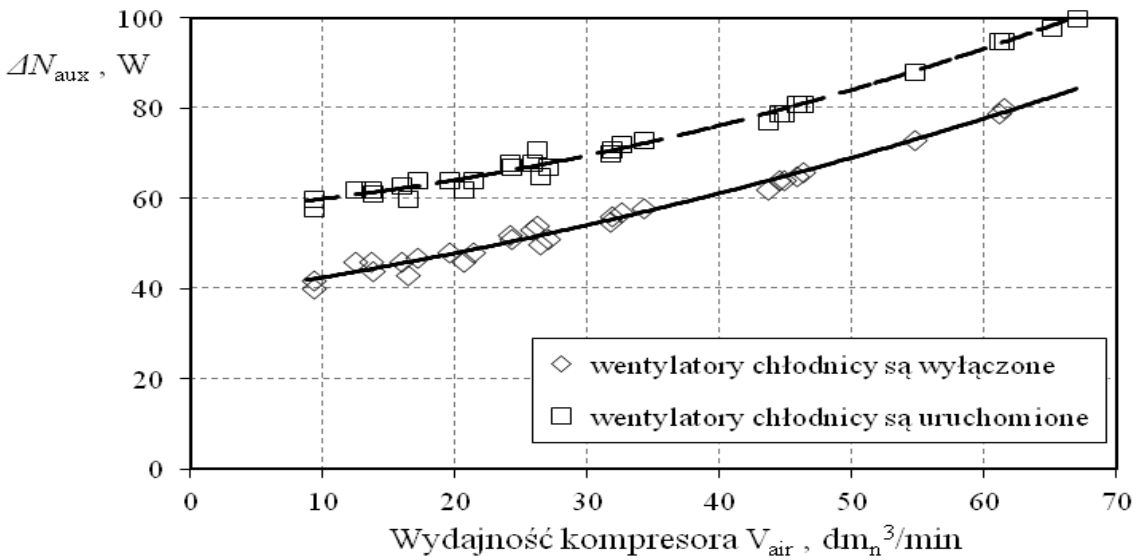
$$\eta_{OP} = \frac{N_{OP} - \Delta N_{aux}}{N_{\mathrm{H2}}}$$

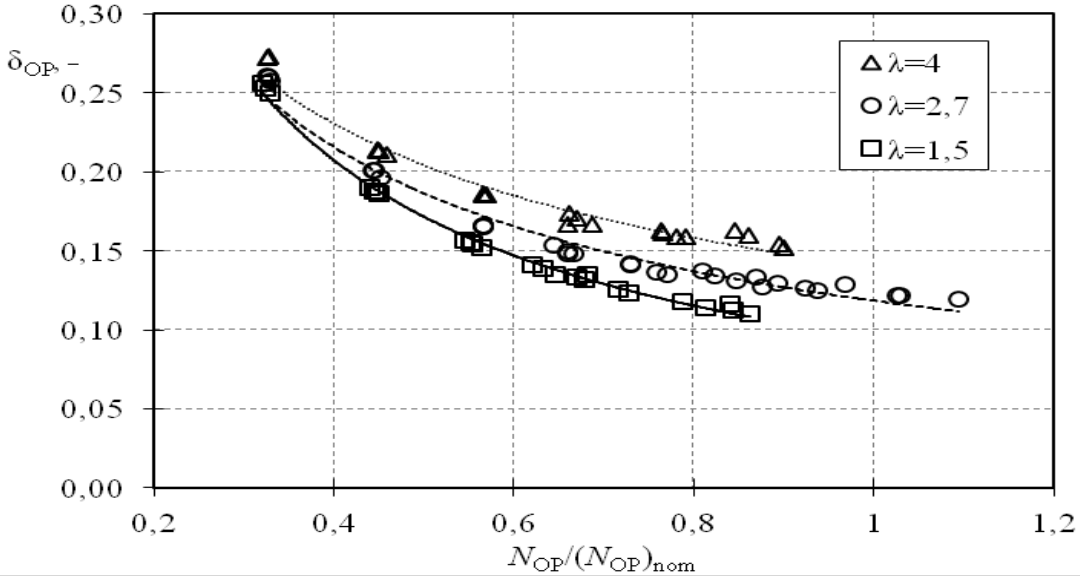
$$\eta_{OP} = \eta_P \cdot \left(1 - \delta_{OP}\right)$$

$$\delta_{OP} = \frac{\Delta N_{aux}}{N_{OP}}$$

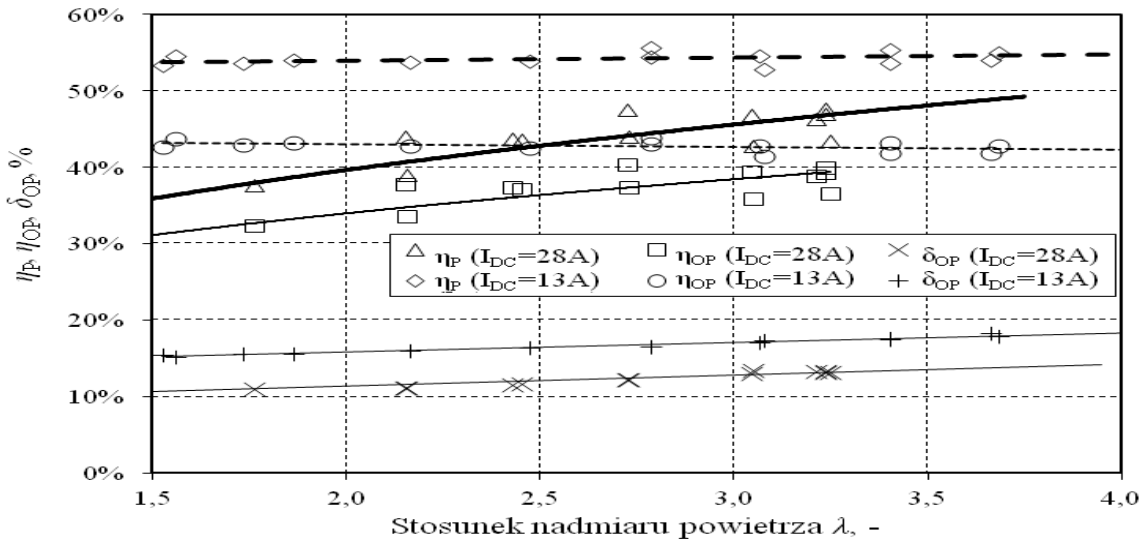


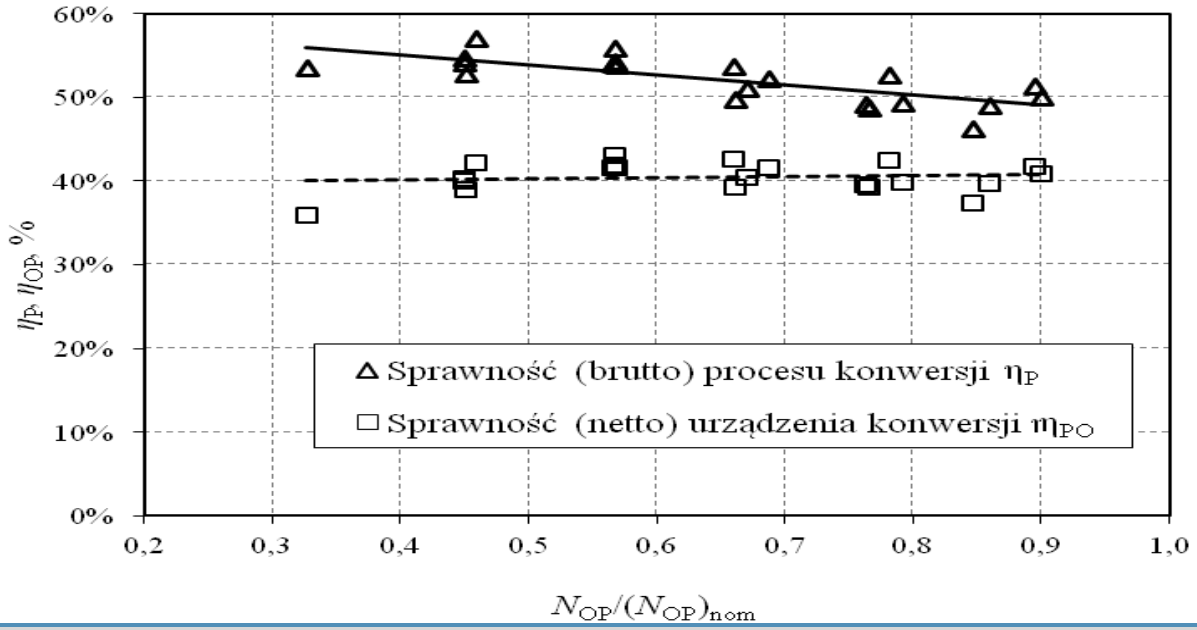
Moc i wskaźniki potrzeb własnych ogniwa paliwowego typu PEM



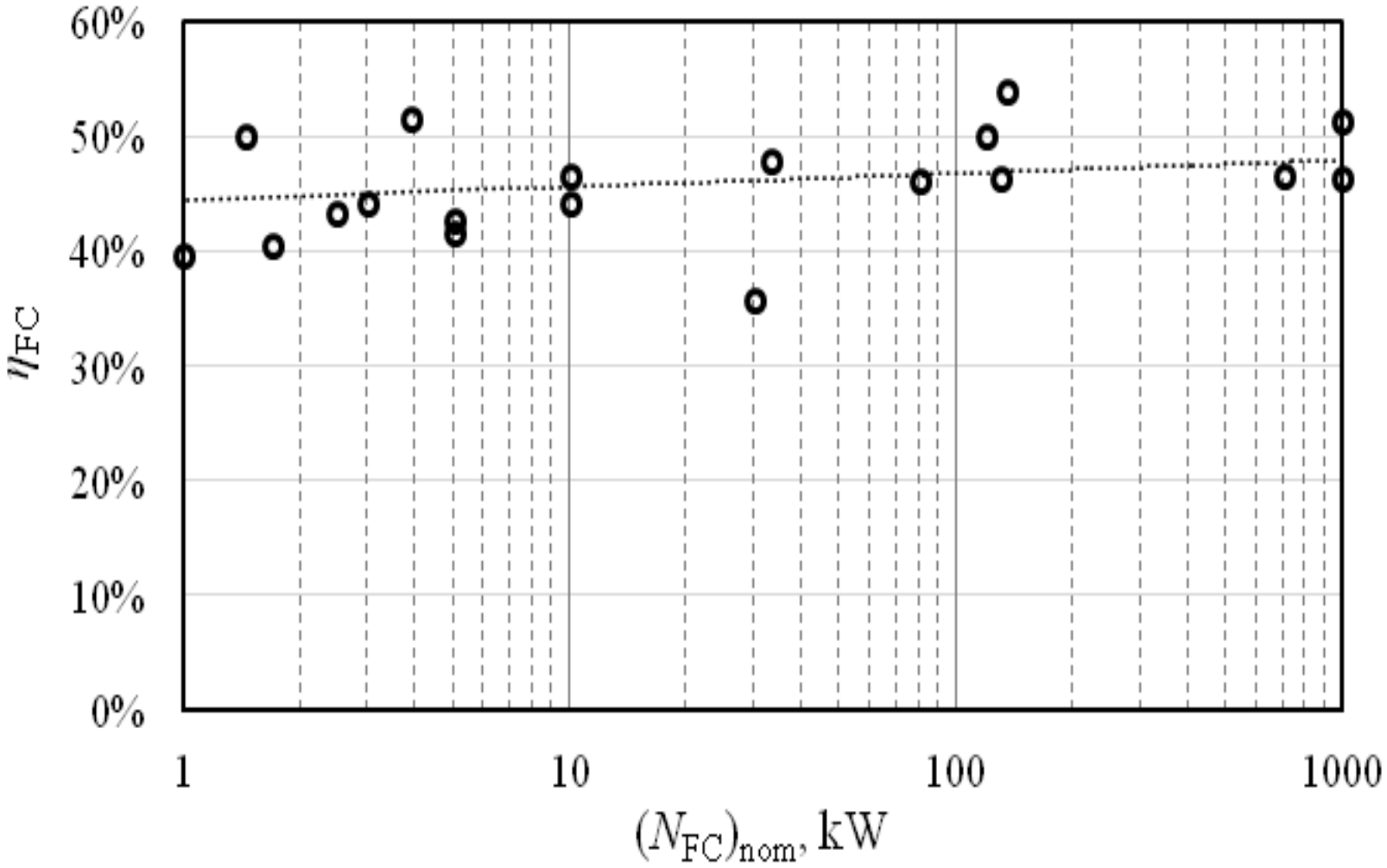


Sprawność ogniwa paliwowego

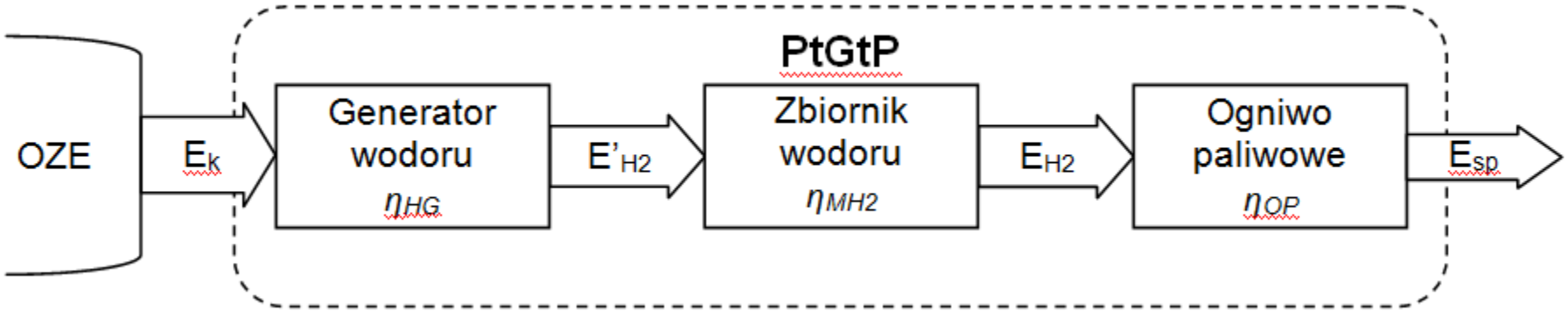




Sprawność konwersji dostępnych ogniw paliwowych typu PEM



Analiza ekonomiczna

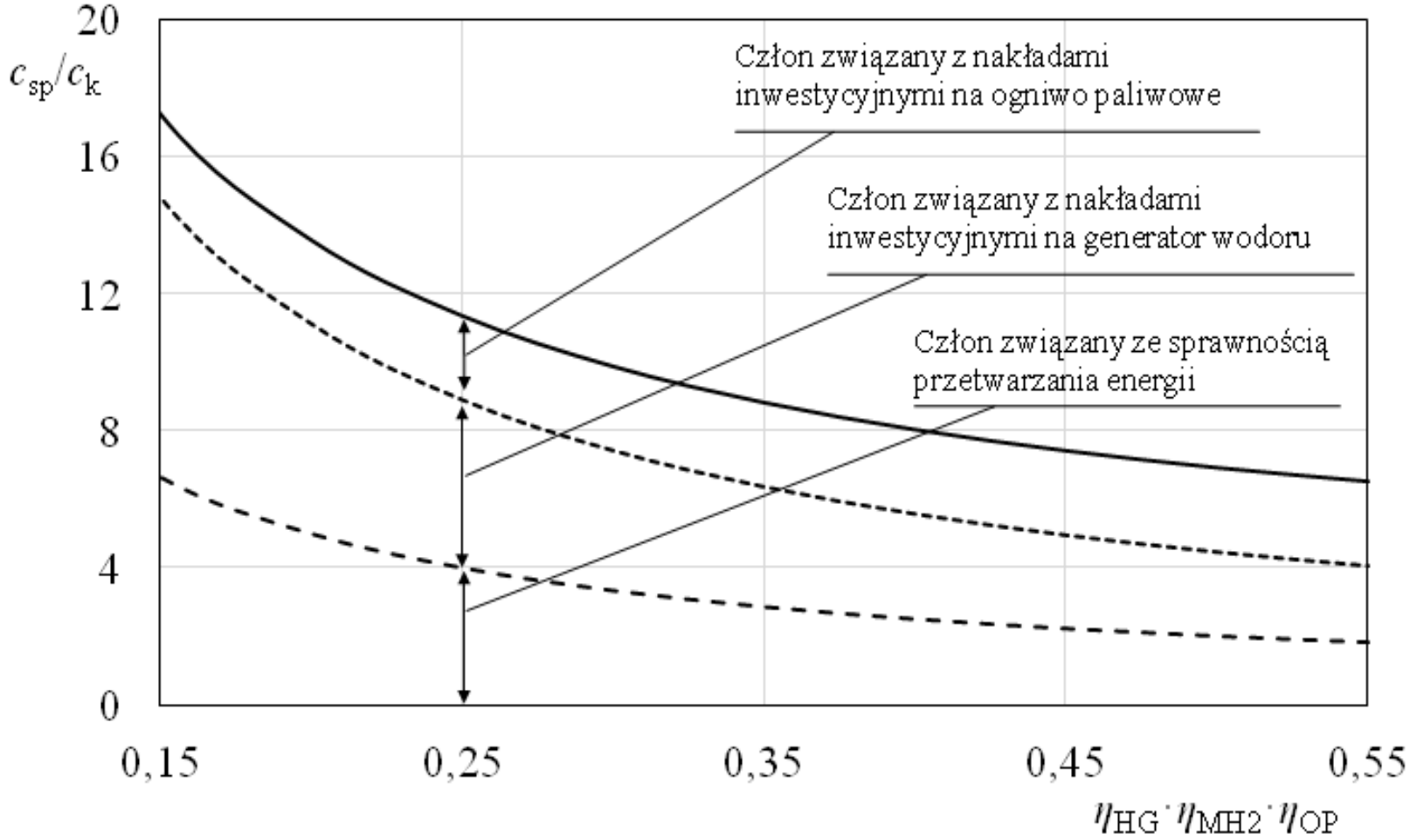


$$\eta_{el} = \frac{E_{\mathrm{sp}}}{E_{\mathrm{k}}} = \frac{E'_{\mathrm{H2}}}{E_{\mathrm{k}}} \cdot \frac{E_{\mathrm{H2}}}{E'_{\mathrm{H2}}} \cdot \frac{E_{\mathrm{sp}}}{E_{\mathrm{H2}}} = \eta_{\mathrm{HG}} \cdot \eta_{\mathrm{MH_2}} \cdot \eta_{\mathrm{OP}}$$

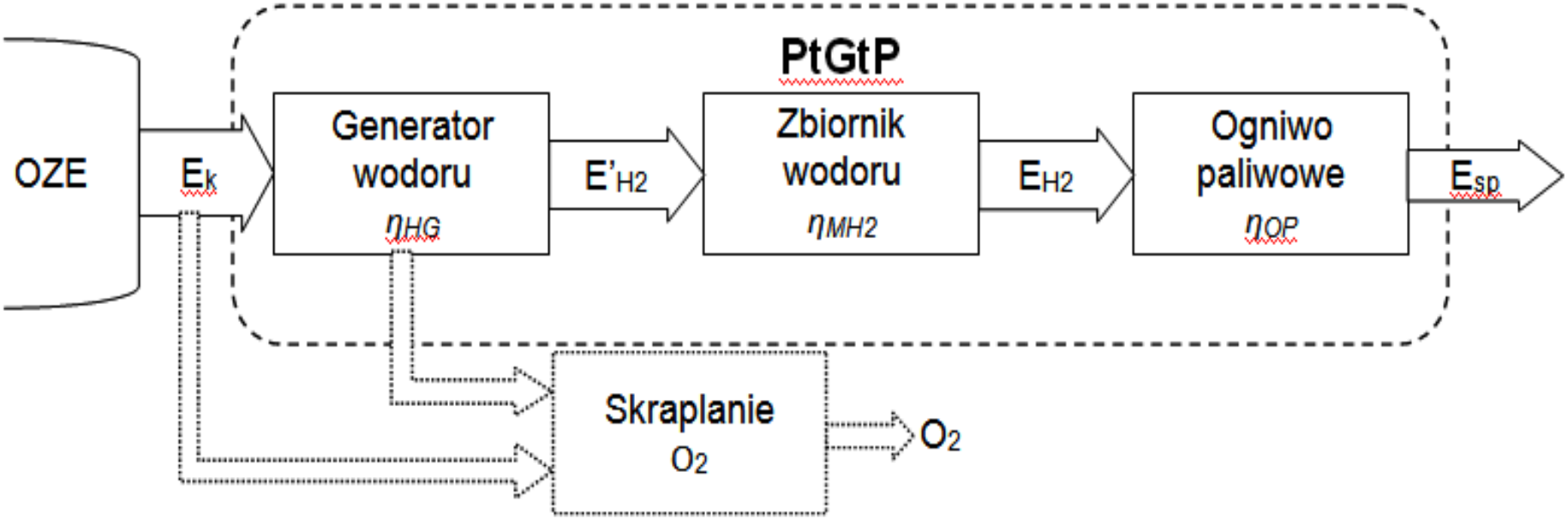
$$\rho = \frac{r \cdot (1+r)^t}{(1+r)^t - 1}$$

$$\frac{c_{sp}}{c_k} = \underbrace{\frac{1}{\eta_{\mathrm{HG}} \cdot \eta_{\mathrm{MH_2}} \cdot \eta_{\mathrm{OP}}}}_{\text{sprawność przetwarzania energii}} + \underbrace{\left(\frac{\rho}{c_k} \cdot \frac{1}{\eta_{HG} \cdot \eta_{MH_2} \cdot \eta_{OP}} \cdot \frac{k_{HG}}{\tau_{HG}}\right)}_{\text{nakłady inwestycyjne i praca generatora wodoru}} + \underbrace{\left(\frac{\rho}{c_k} \cdot \frac{k_{OP}}{\tau_{OP}}\right)}_{\text{nakłady inwestycyjne i praca ogniwa paliwowego}}$$

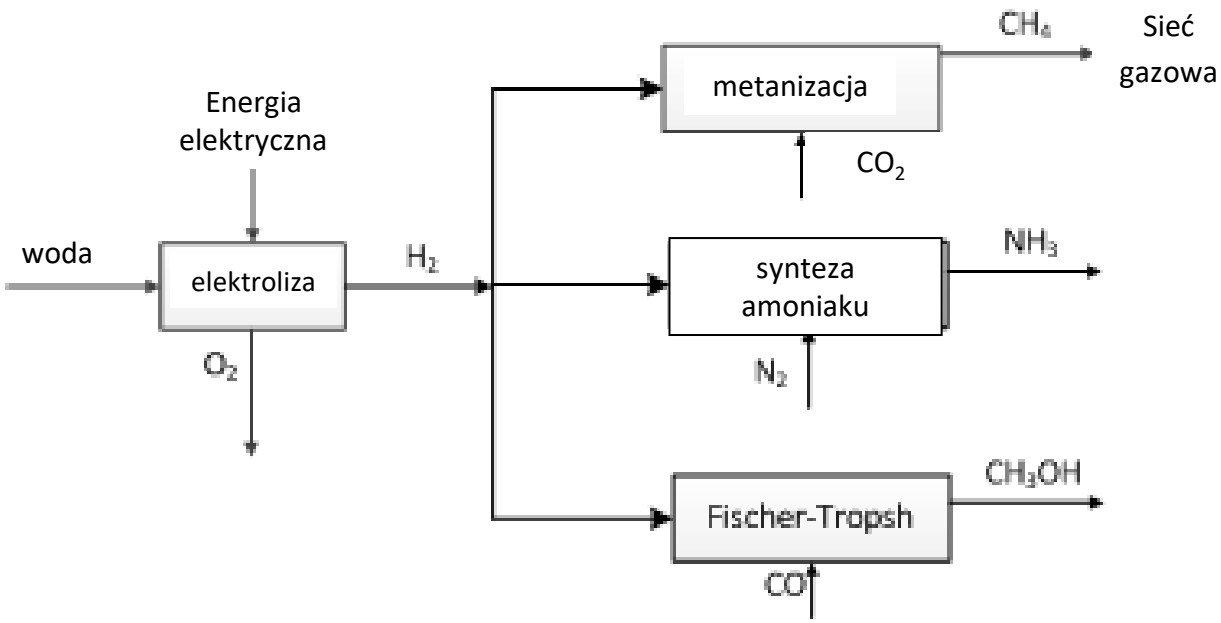
Analiza ekonomiczna



Możliwości poprawy charakterystyk ekonomicznych

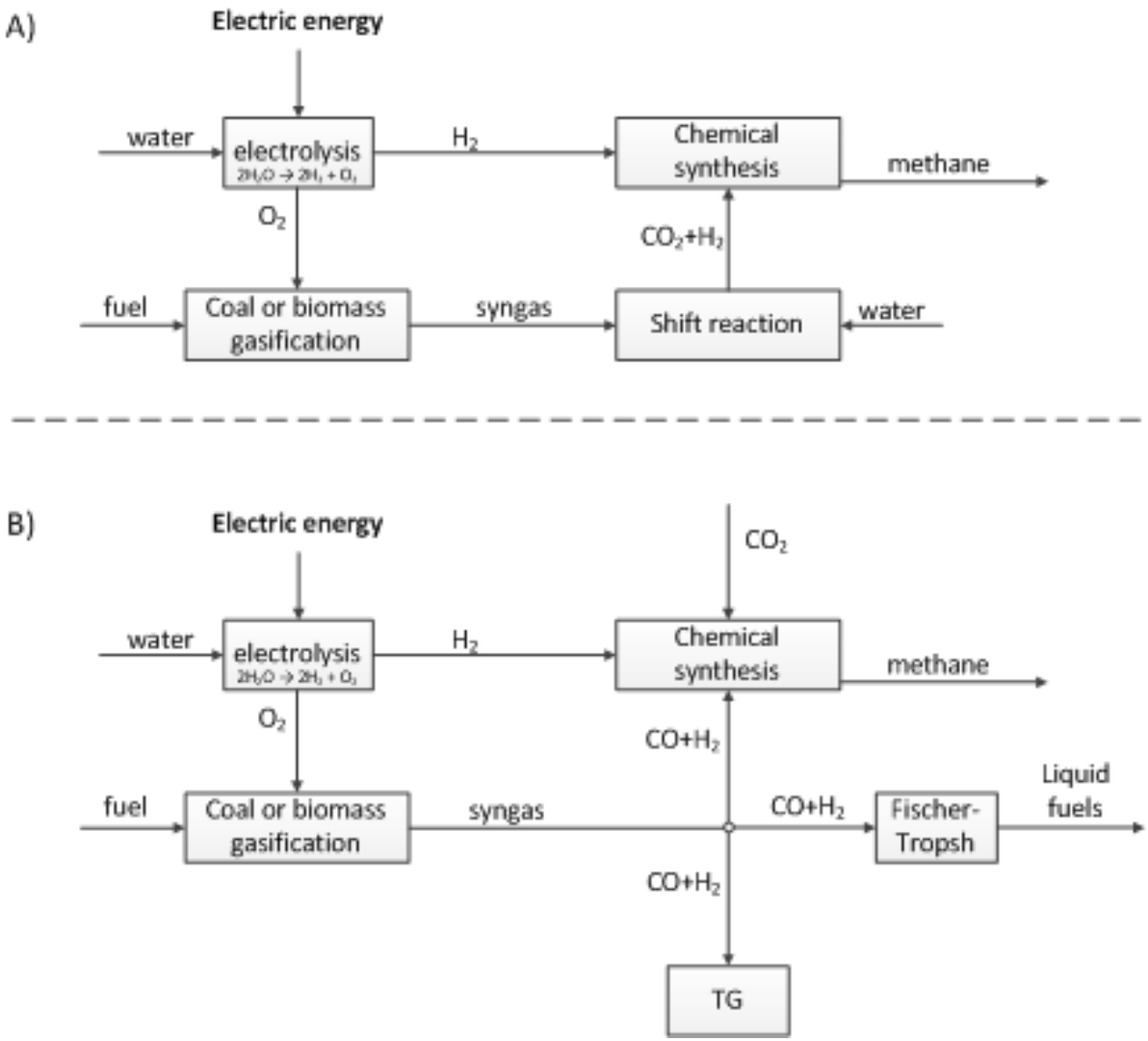


Idea produkcji metanu i płynnych paliw

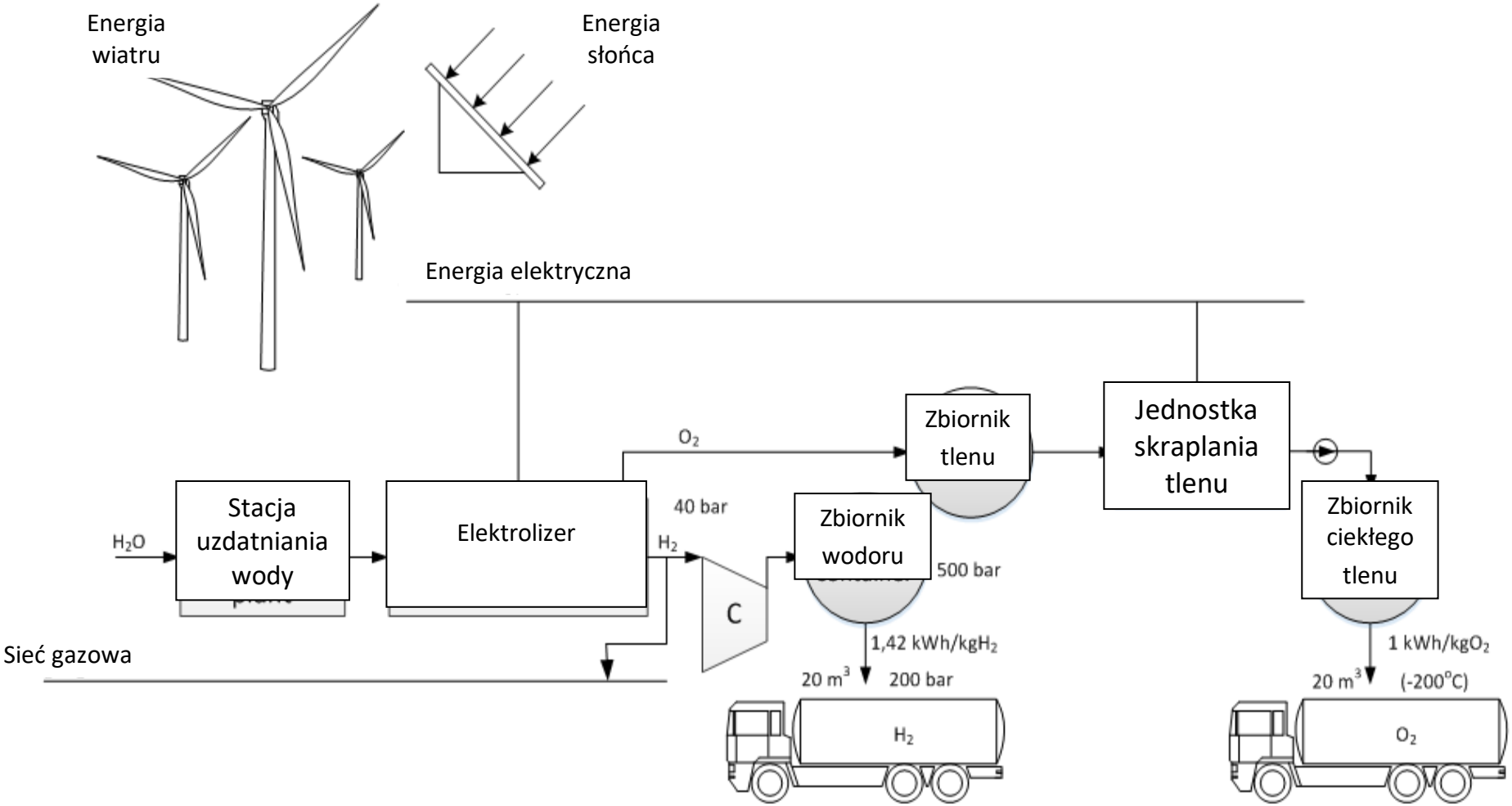


$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$
$$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$$
$$2H_2 + CO \rightarrow CH_3OH$$
$$3H_2 + CO \rightarrow CH_3OH + H_2O$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

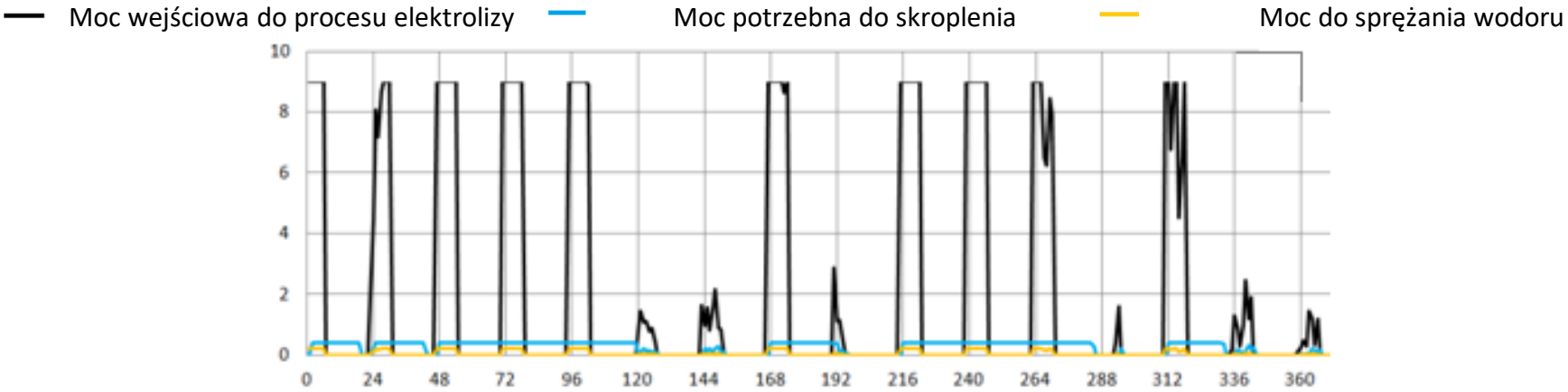
Możliwości poprawy charakterystyk ekonomicznych



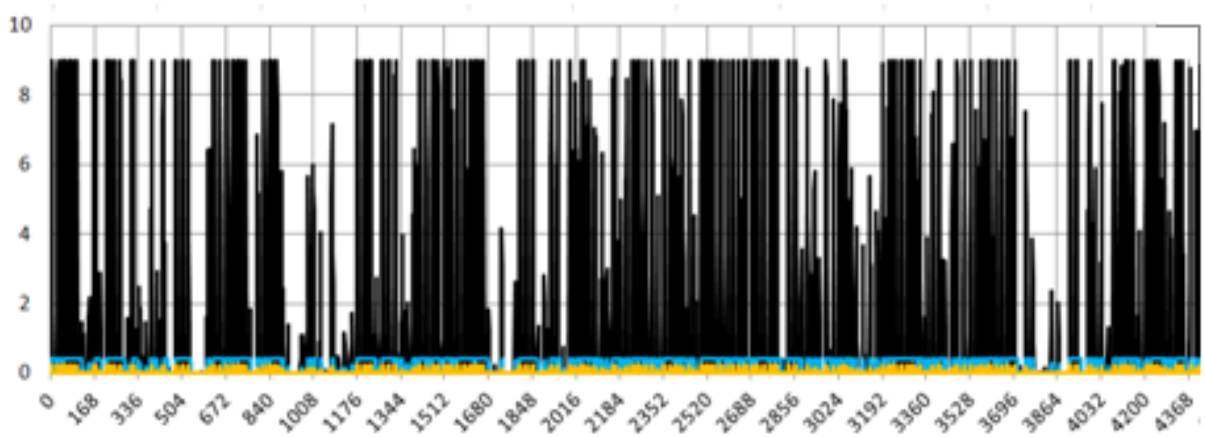
Przykład instalacji w Power to Gas (H_2, O_2 – liquid)



Charakterystyki instalacji Power to Gas

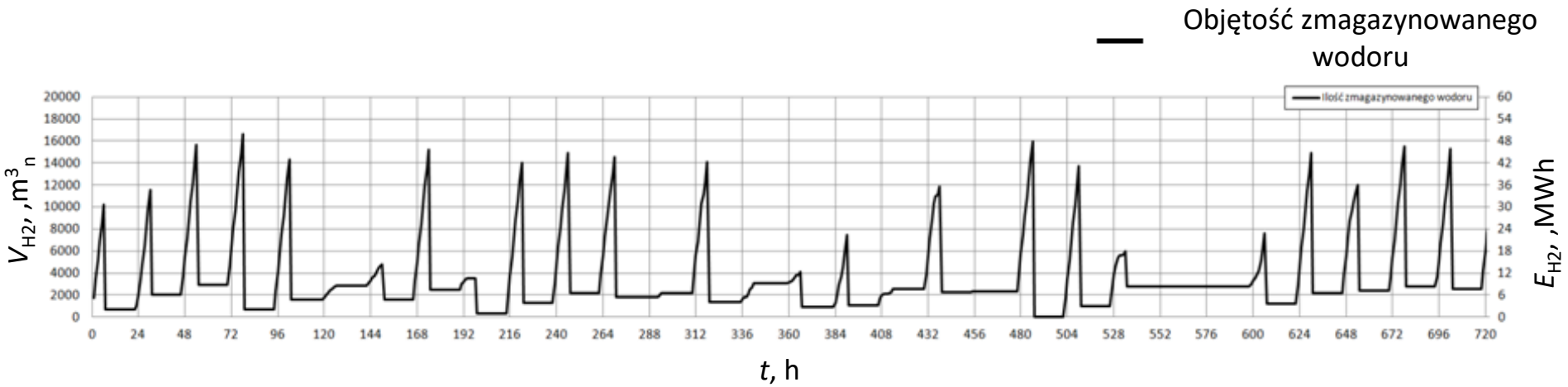


Moc wejściowa instalacji elektrolizerów, zużycie energii skraplania tlenu i zużycie energii sprężania wodoru w funkcji czasu w cyklu 15 dni

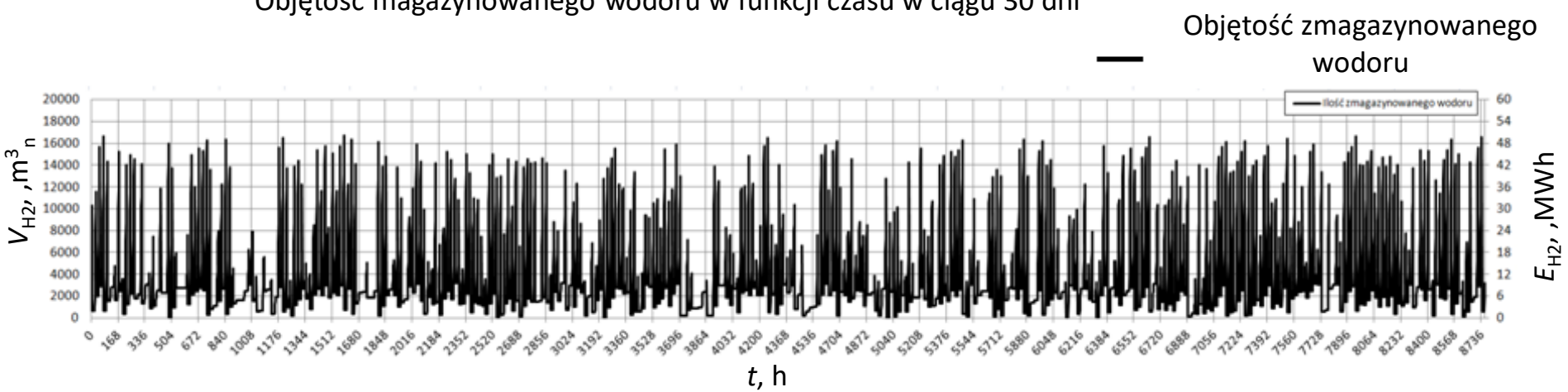


Moc wejściowa instalacji elektrolizerów, zużycie energii skraplania tlenu i zużycie energii sprężania wodoru w funkcji czasu w cyklu półrocznym

Charakterystyki instalacji Power to Gas

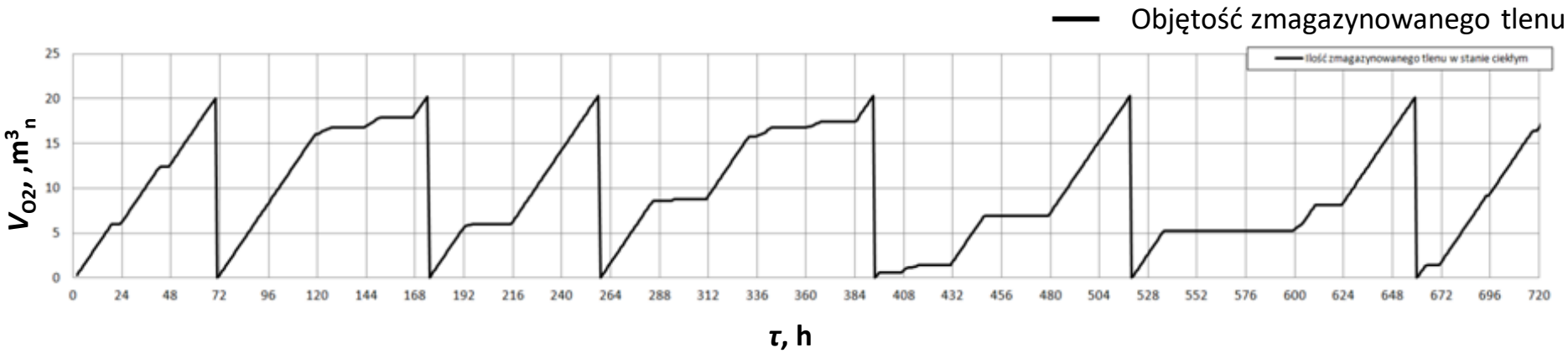


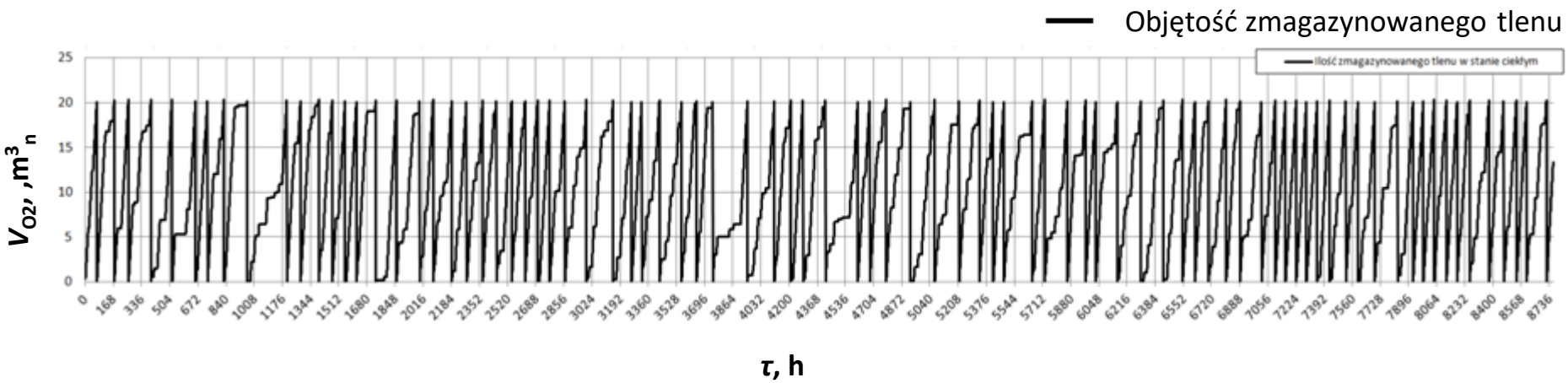
Objętość magazynowanego wodoru w funkcji czasu w ciągu 30 dni



Objętość magazynowanego wodoru w funkcji czasu w cyklu rocznym

Power to Gas (H_2, O_2-liquid)





Dziękuję za uwagę