

Ogniwo paliwowe
vs.
Silnik cieplny o zimnych spalinach

Autor: Jacek Skalmierski

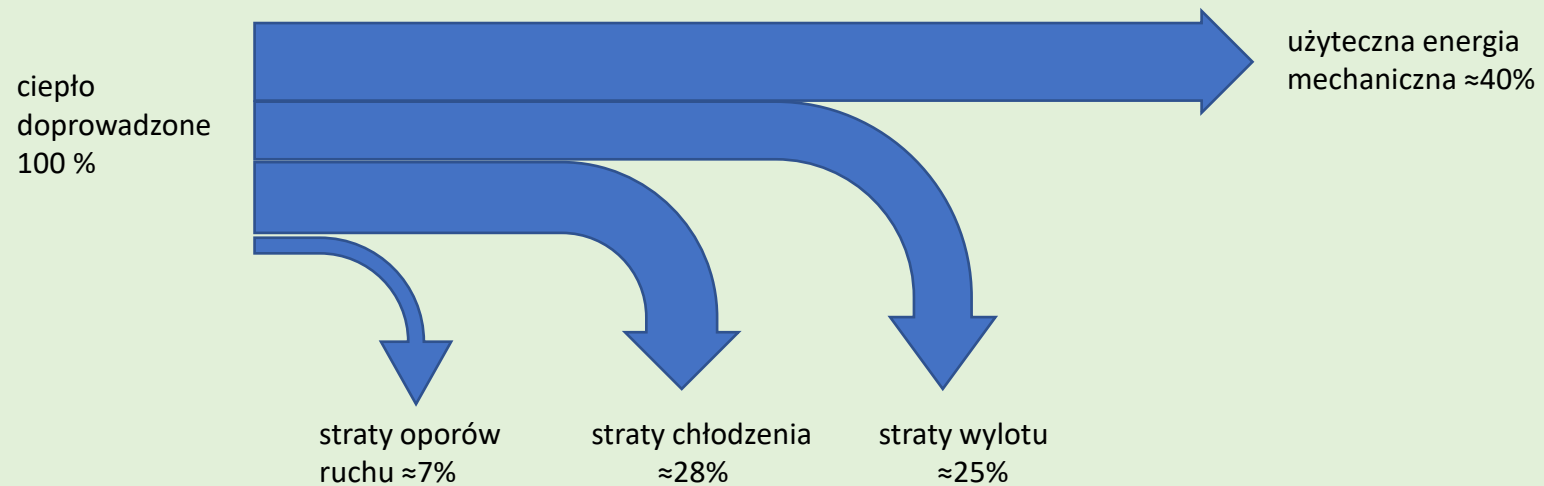
Plan referatu

1. Straty ciepła we współczesnym silniku spalinowym,
2. Stanu równowagi termodynamicznej z otaczającą przyrodą,
3. Straty ciepła w silniku cieplnym o zimnych spalinach,
4. Uproszczony schemat silnika cieplnego o zimnych spalinach oraz analiza czy nie mamy do czynienia z naruszeniem II zasady termodynamiki,
5. Przykładowe zastosowanie silnika o zimnych spalinach w maszynowni statku,
6. Stabilizator ciśnienia,
7. Odzyskiwanie energii z urządzeń, których sprawność jest mniejsza niż jeden,
8. Bilans energetyczny napędu opartego na ogniwie paliwowym,
9. Efektywność napędu silnika cieplnego o zimnych spalinach dla sprawności izentropowej turbiny wynoszący 93,86% ,
10. Efektywność napędu silnika cieplnego o zimnych spalinach dla sprawności izentropowej turbiny wynoszący 80% i o mocy 5 MW,
11. Przykładowy zasięg pociągu,
12. Efektywność napędu dla turbiny o sprawności izentropowej 87% i o mocy 20 MW,
13. Podsumowanie.

Silnik okrętowy



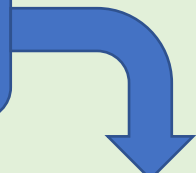
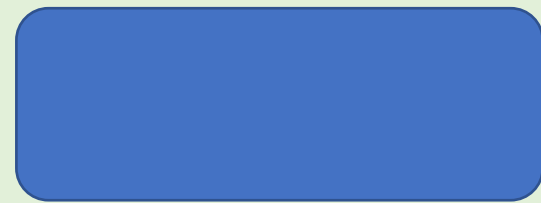
wykres Sankeya przedstawiający bilans energetyczny (cieplny) silnika



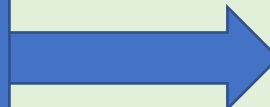
Coś co zastanawia

„ Praktyczna przydatność energetyczna materii staje się równa zeru, jeżeli materia ta zostanie sprowadzona do stanu równowagi termodynamicznej z otaczającą przyrodą, a ściślej – z jej częściami przeważającymi, nie należącymi do bogactw naturalnych. Otaczająca przyroda narzuca więc *naturalny punkt zerowy* przy praktycznej ocenie przydatności energetycznej. Wybór miernika tej przydatności jest umowny. Przyjęto posługiwać się maksymalną zdolnością do wykonywania pracy i nazwano tę wielkość *egzergią*. *Egzergia jest to więc maksymalna zdolność do wykonywania pracy wyznaczona w stosunku do otaczającej przyrody....*”

Sprężone powietrze (20°C)



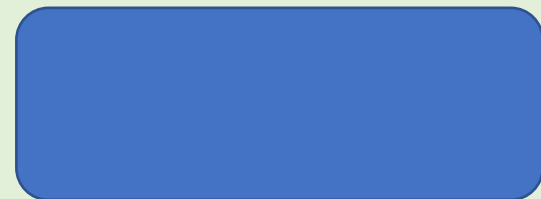
Komora spalania



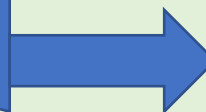
turbina



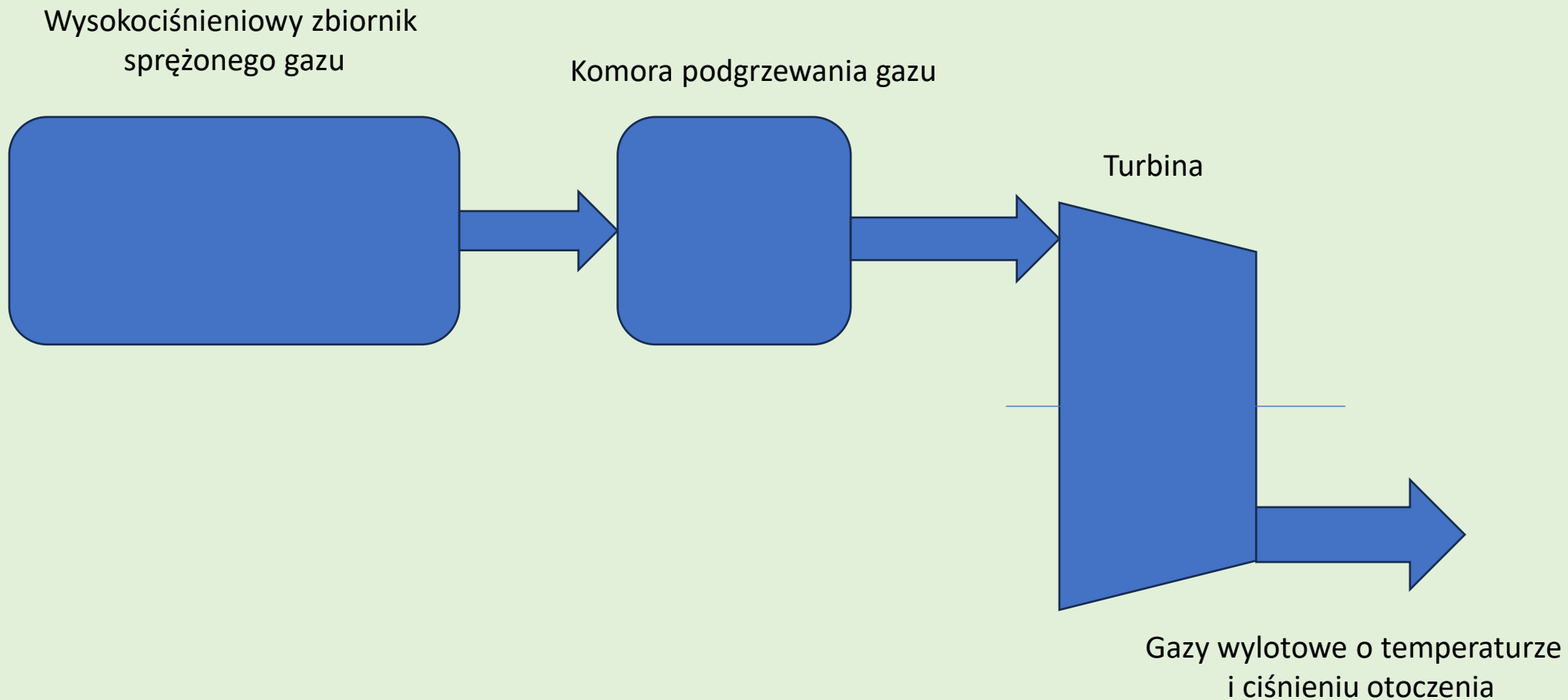
Sprężony wodór (20°C)



Spaliny (20°C, 0,1 Mpa)



Straty ciepła w silniku cieplnym o zimnych spalinach

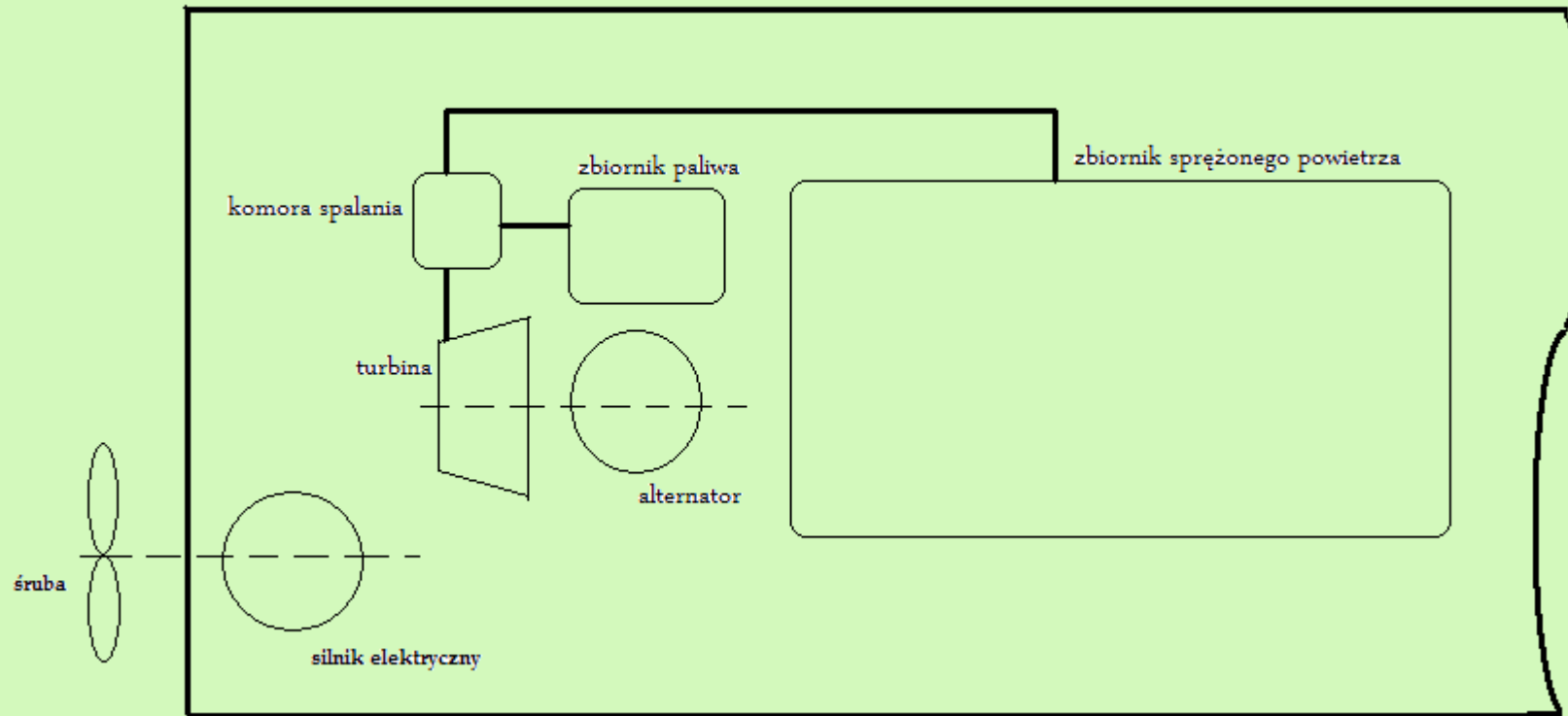


Uproszczony schemat silnika cieplnego o zimnych spalinach

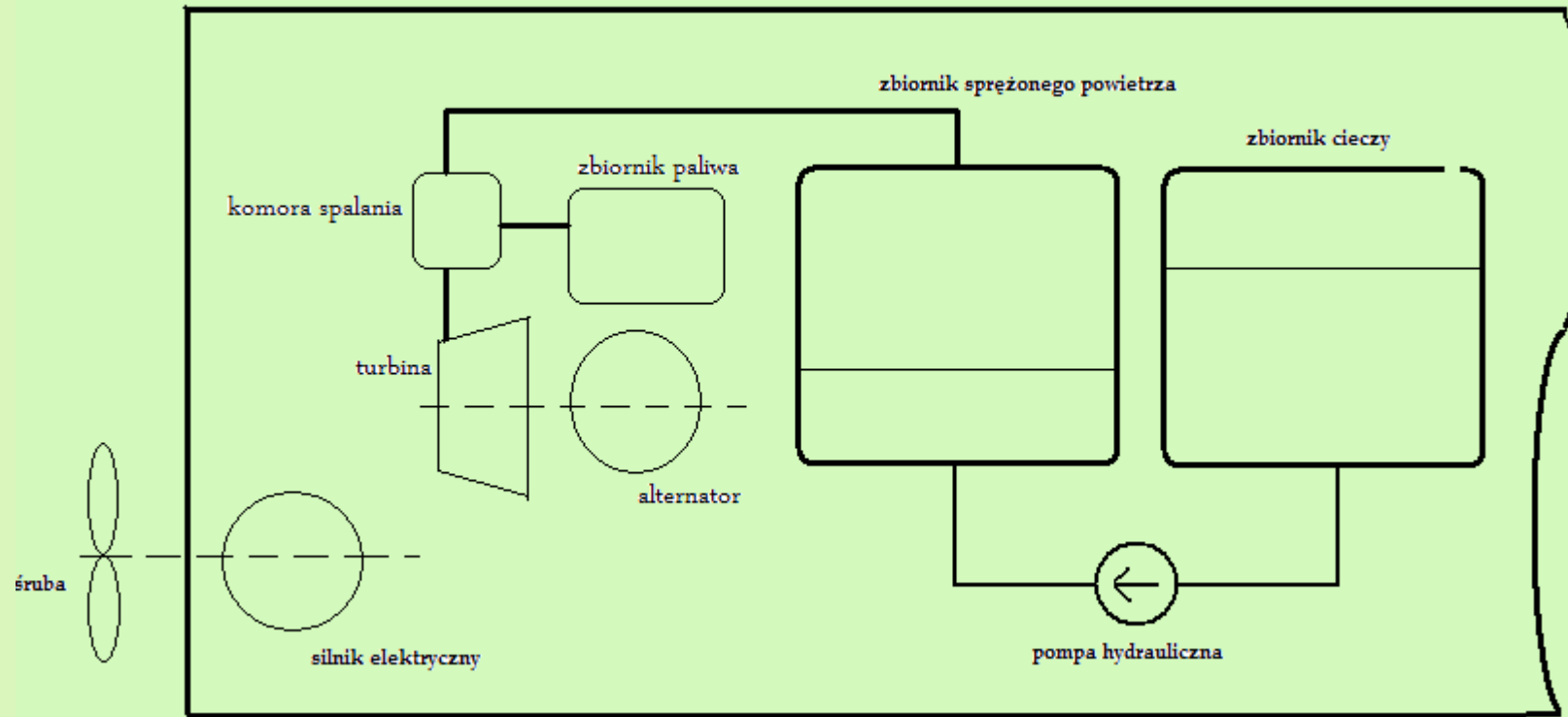


Obieg termodynamiczny dla gazu doskonałego dwuatomowego

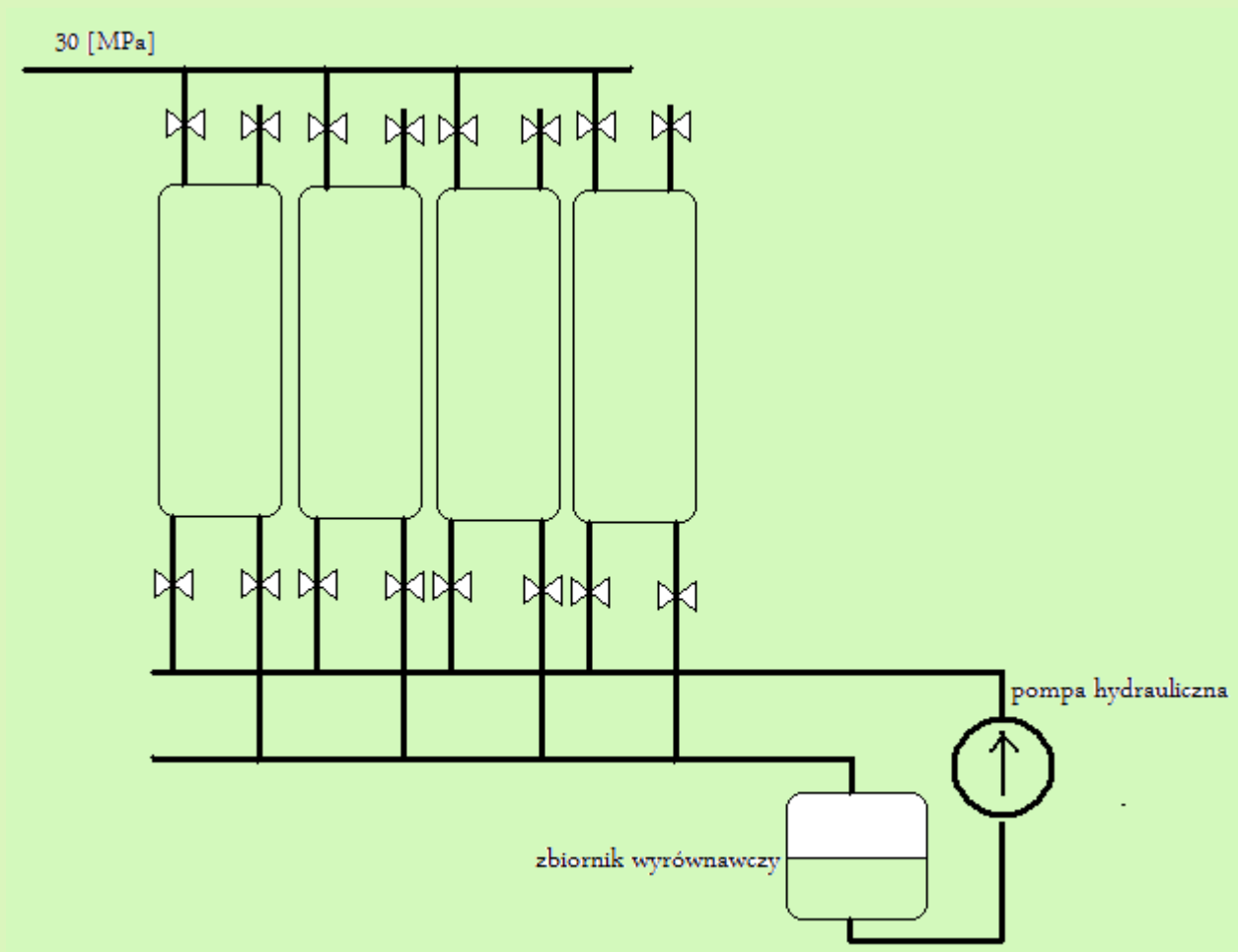
entropia [J/K·mol]



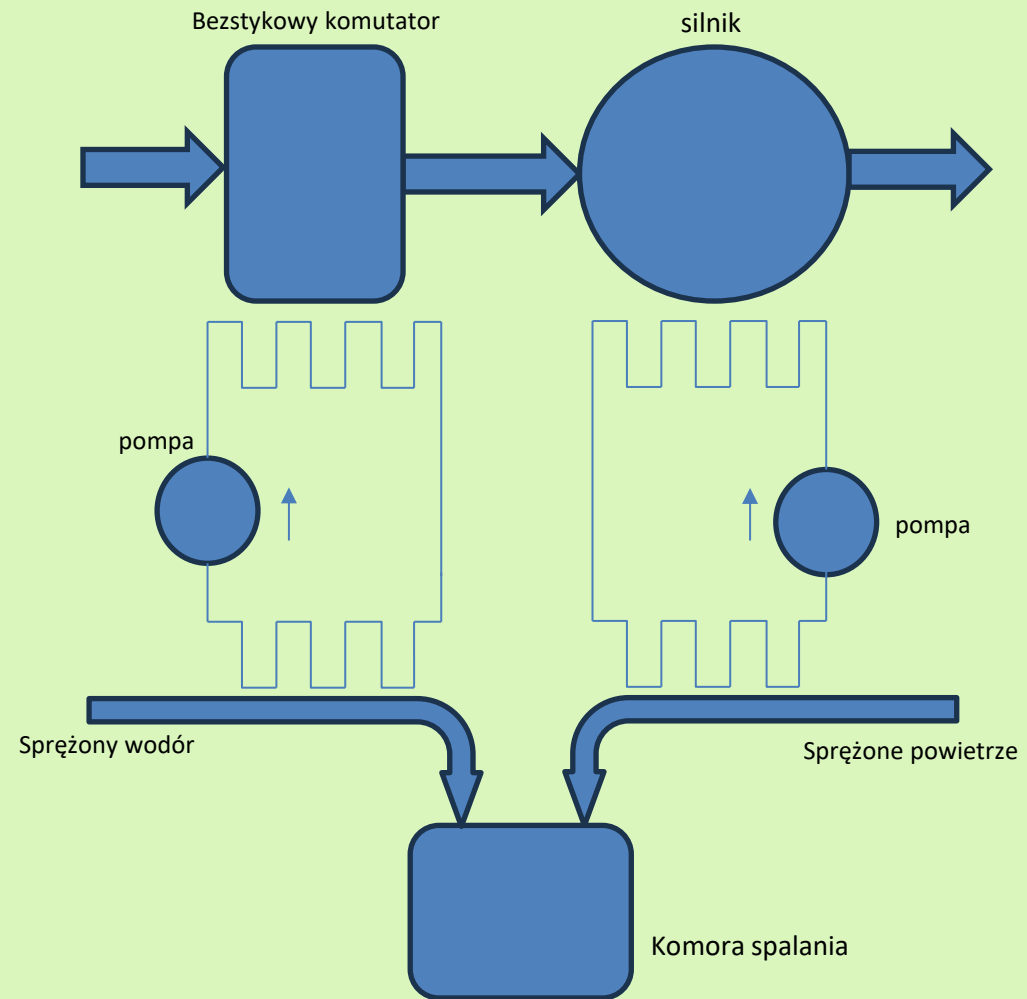
Maszynownia statku na bazie silnika cieplnego o zimnych spalinach



Maszynownia statku z silnikiem cieplnym o zimnych spalinach z hydraulicznym stabilizatorem ciśnienia

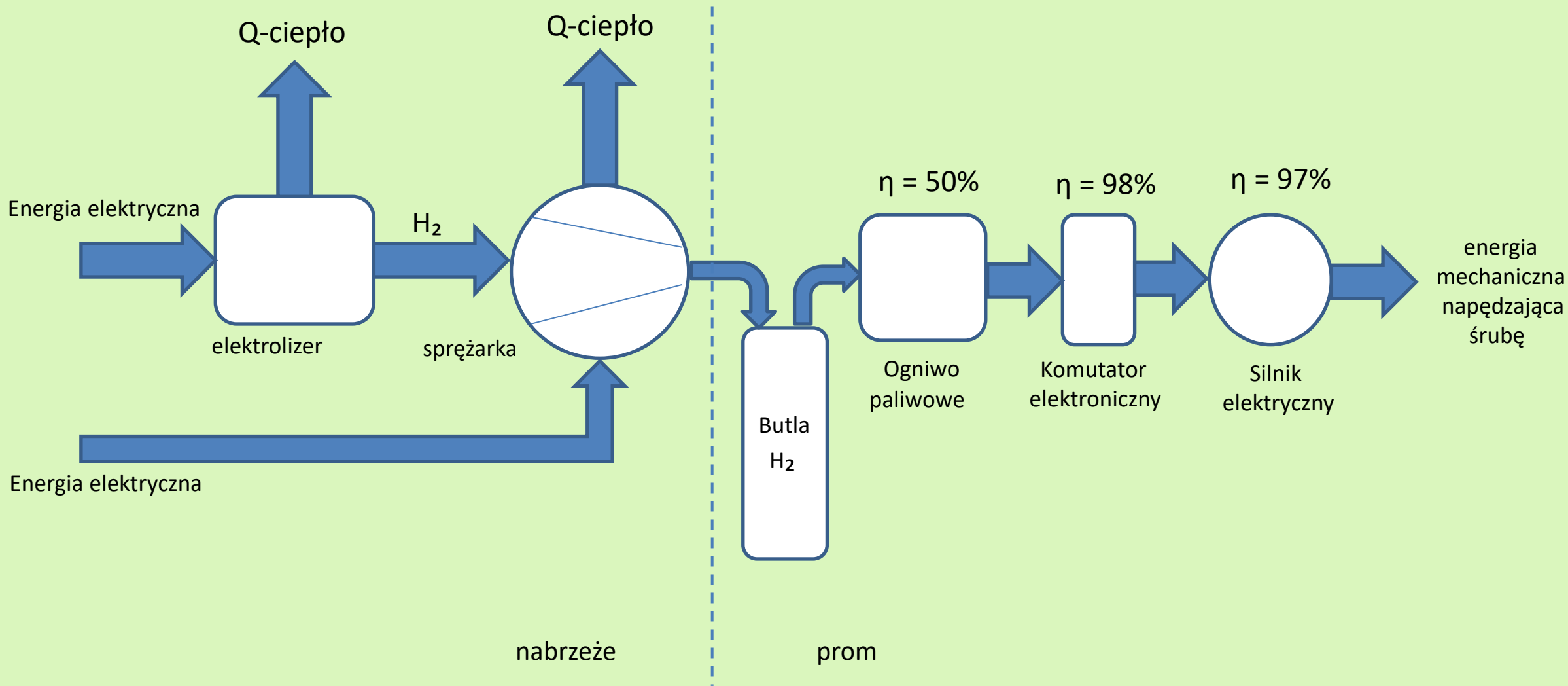


stabilizacja ciśnienia w zbiorniku sprężonego powietrza



Odzyskiwanie ciepła z urządzeń które się grzeją

Napęd oparty na ogniwie paliwowym



Schemat układu wytwarzania energii mechanicznej i cieplnej za pomocą ogniwa paliwowego

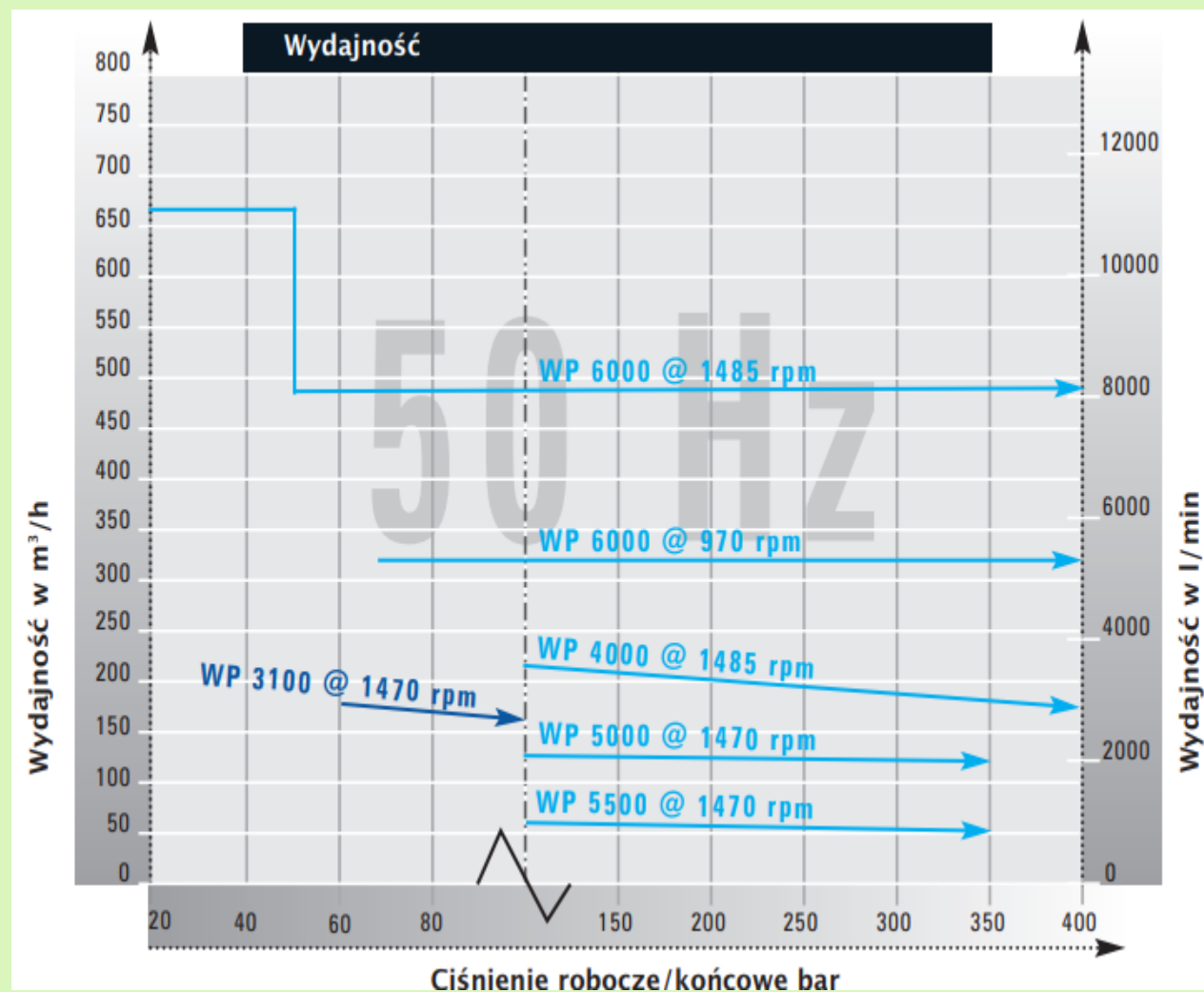
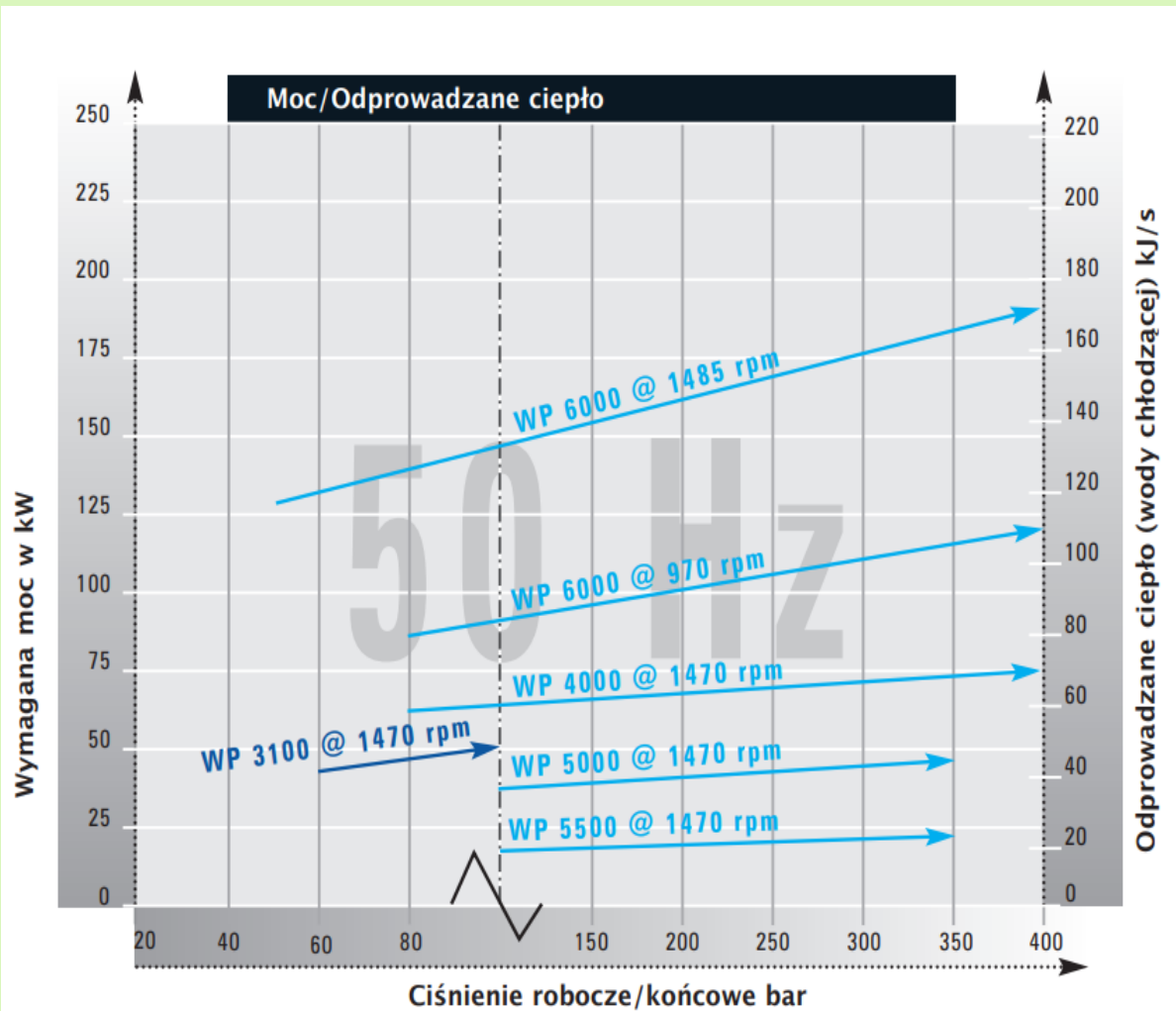
Założenia obliczeniowe:

- Ciśnienie w zbiorniku wodoru 350 [bar],
- Wydajność elektrolizera, ilość energii potrzebna do produkcji 1 [kg] wodoru: 50[kWh/kg],
- Sprawność ogniwa paliwowego (Mirai): 50%,
- Sprawność komutatora elektronicznego silnika 98%,
- Sprawność silnika napędzającego śrubę promu 97%.

Znaczenie używanych symboli:

\bar{E}	średnia wartość energii,	E_e	energia dostarczona do elektrolizera,
\dot{E}_p	moc sprężarki na początku sprężania, gdy zbiornik jest pusty,	E_d	energia dostarczona do elektrolizera i sprężarki,
\dot{E}_k	moc sprężarki na końcu sprężania, gdy zbiornik jest pełny,	E_{woH_2}	wartość opałowa wodoru,
$\bar{\dot{E}}$	średnia moc sprężarki,	η_{sp}	sprawność cieplna sprężarki (90%),
m_p	masa powietrza,	η_o	sprawność ogniwa paliwowego,
ρ_p	gęstość powietrza,	η_k	sprawność komutatora elektronicznego silnika,
V_p	objętość powietrza,	η_s	sprawność silnika.
M_{Bp}	masa molowa powietrza,		
M_{BH_2}	masa molowa wodoru,		

Parametry pracy sprężarki WP6000@970 rpm firmy J.P. Sauer&Sohn Maschinenbau gmbh



ciężar właściwy powietrza: 1,18895 [kg/m³] (1 bar; 293K)

ciężar właściwy powietrza: 421,6462 [kg/m³] (354,6 bar; 293K)

wydajność sprężarki: 324 [m³/h]

Wyliczamy średnią moc sprężarki napełniającą zbiornik o pojemności $324/350 \text{ [m}^3] = 0,92571 \text{ [m}^3]$ do ciśnienia 350 [bar] czas pracy sprężarki 1 [h] .

$$\bar{E} = \frac{(\dot{E}_p + \dot{E}_k)}{2} = \frac{77,5 \text{ [kW]} + 116,25 \text{ [kW]}}{2} = 96,875 \text{ [kW]} \quad (1)$$

Praca sprężarki w ciągu godziny wynosi $96,875 \text{ [kWh]}$

Ciężar właściwy powietrza przy ciśnieniu 1 [bar] temperatura 293 [K] wynosi $1,18895 \text{ [kg/m}^3]$ po godzinie pracy sprężamy $324 \text{ [m}^3]$ do ciśnienia 350 [bar] (przy tej samej temperaturze) masa sprężonego powietrza wynosi:

$$m_p = \rho_p \cdot V_p = 1,18895 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 324 \text{ [m}^3] = 385,219 \text{ [kg]} \quad (2)$$

Wyliczamy, ile energii trzeba aby sprężyć 1 kg powietrza:

$$E_{p350} = \frac{\bar{E}}{m_p} = \frac{96,875 \text{ [kWh]}}{385,219 \text{ [kg]}} = 0,25148 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \quad (3)$$

Mol powietrza waży $28,96 \text{ [g]}$, mol wodoru waży $2,02 \text{ [g]}$, obliczamy ile razy mol powietrza jest cięższy od mola wodoru:

$$c = \frac{M_{Bp}}{M_{BH_2}} = \frac{28,96 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]}{2,02 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]} = 14,3366 \quad (4)$$

Wyliczamy, ile energii trzeba aby sprężyć 1 kg wodoru:

$$E_{H_2,350} = E_{p350} \cdot c = 0,25148 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \cdot 14,3366 = 3,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \quad (5)$$

Aby otrzymać 1 kg wodoru, trzeba dostarczyć do elektrolizera 50 kWh , a zatem aby otrzymać kg wodoru sprężonego do ciśnienia 350 bar potrzebujemy:

$$E_d = E_{H_2,350} + E_e = 3,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] + 50 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] = 53,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] \quad (6)$$

Ciepło wytwarzane podczas elektrolizy to energia dostarczona do elektrolizy minus wartość opałowa wodoru $33,33 \text{ kWh/kg}$. Zakładamy że ciepło wytwarzane podczas elektrolizy możemy w 100% wykorzystać do innych celów.

Ponieważ straty musimy odnieść do energii dostarczonej wynik dzielimy przez energię dostarczoną:

$$\frac{E_e - E_{woH_2}}{E_d} = \frac{50 \text{ [kWh]} - 33,3333 \text{ [kWh]}}{53,60538 \text{ [kWh]}} = \frac{16,6667}{53,60538} = 0,31091469 = 31,09\% \quad (7)$$

Ciepło wytwarzane podczas procesu sprężania można odczytać z wykresów producenta sprężarek. Z wykresów można odczytać że 90% energii elektrycznej dostarczanej do sprężarki zamieniana jest na energię cieplną przenoszoną do cieczy chłodzącej, zaś 10% tej energii jest tracona. Na początku wyliczamy ciepło bezpowrotnie tracone:

$$\frac{E_{H_2,350} \cdot (1 - \eta_{sp})}{E_d} = \frac{3,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]}{53,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]} \cdot 0,1 = 0,00672578 = 0,673\% \quad (8)$$

Teraz obliczamy energię cieplną wytwarzaną przez sprężarkę, którą będzie można wykorzystać:

$$\frac{E_{H_2,350} \cdot \eta_{sp}}{E_d} = \frac{3,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]}{53,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]} \cdot 0,9 = 0,06053202 = 6,05\% \quad (9)$$

Obliczamy straty ciepła w ogniwie paliwowym:

$$\frac{(1 - \eta_o) \cdot E_{woH_2}}{E_d} = \frac{(1 - 0,5) \cdot 33,33 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]}{53,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]} = 0,3109137553 = 31,09\% \quad (10)$$

Obliczamy straty ciepła na komutatorze elektronicznym silnika napędzającego śrubę:

$$\frac{\eta_o \cdot E_{woH_2} \cdot (1 - \eta_k)}{E_d} = \frac{0,5 \cdot 33,33 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]}{53,60538 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]} \cdot 0,02 = 0,0062183 = 0,622\% \quad (11)$$

Obliczamy straty ciepła na silniku napędzającym śrubę:

$$\frac{\eta_o \cdot \eta_k \cdot E_{woH_2}}{E_d} \cdot (1 - \eta_s) = \frac{0,5 \cdot 0,98 \cdot 33,33 \left[\frac{kWh}{kg} \right]}{53,60538 \left[\frac{kWh}{kg} \right]} \cdot 0,03 = 0,0091409 = 0,91\% \quad (12)$$

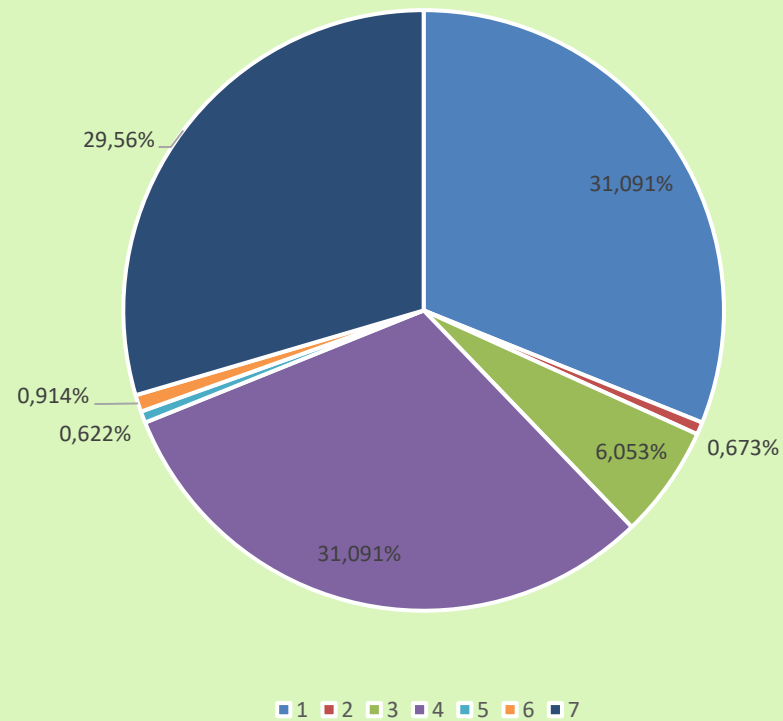
Obliczamy energię mechaniczną napędzającą śrubę okrętową:

$$\frac{\eta_o \cdot \eta_k \cdot \eta_s \cdot E_{woH_2}}{E_d} = \frac{0,5 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 33,33 \left[\frac{kWh}{kg} \right]}{53,60538 \left[\frac{kWh}{kg} \right]} = 0,295554616 = 29,56\% \quad (13)$$

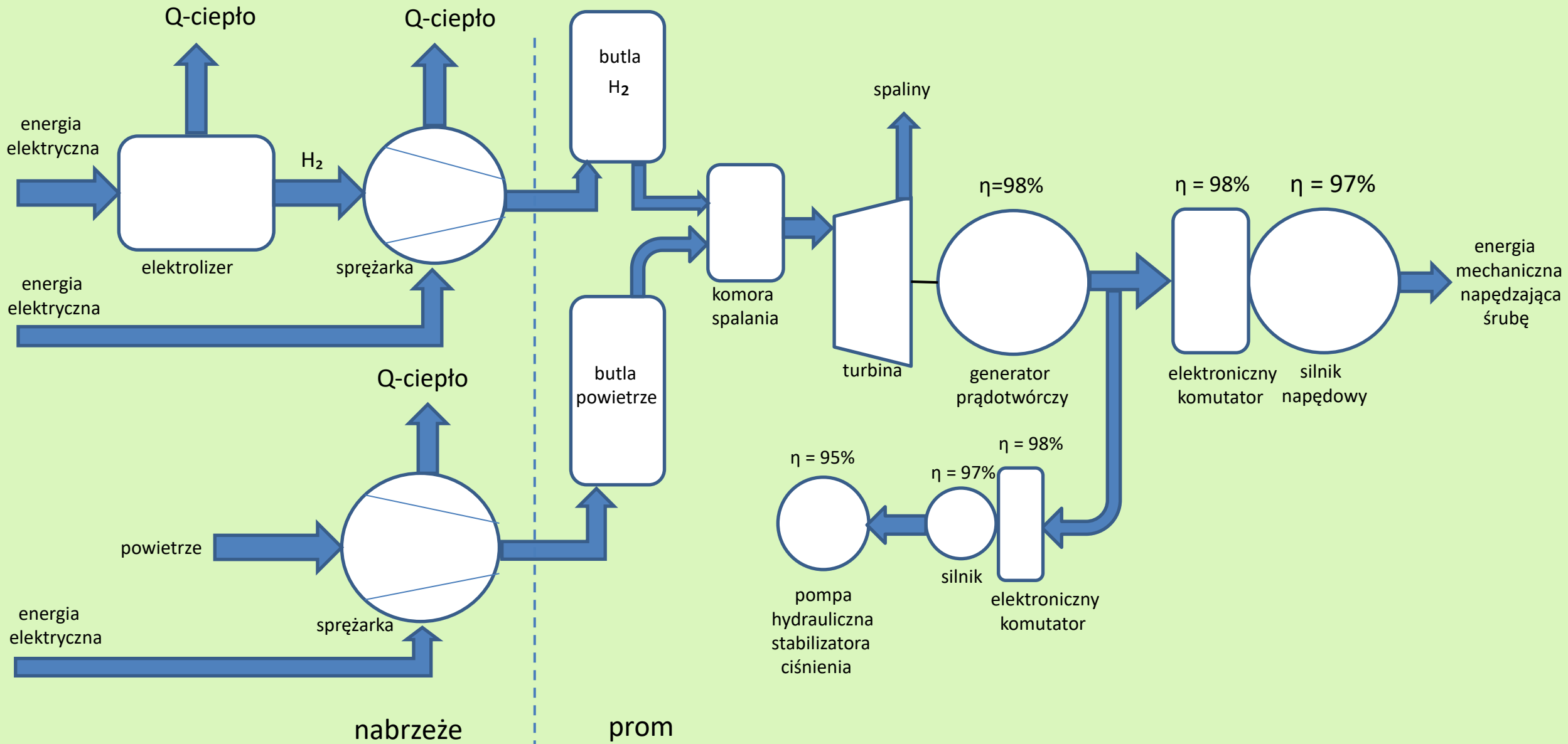
Obliczenia można sprawdzić dodając wyniki równań (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13) powinniśmy uzyskać 100%

1 ciepło z elektrolizera	31,09%
2 ciepło tracone podczas sprężenia wodoru	0,673%
3 ciepło odzyskiwane podczas sprężania wodoru	6,05%
4 straty ogniwa paliwowego	31,09%
5 straty komutator elektr	0,622%
6 straty silnik	0,91%
7 śruba	29,56%
	100,00%

ogniwo paliwowe



Napęd oparty o silnik
cieplny o zimnych spalinach



Schemat układu wytwarzania energii mechanicznej i cieplnej w konfiguracji z silnikiem cieplnym o zimnych spalinach

Komora spalania

Gaseq

File Edit Units StdProblems Mixtures Constraints Help

Problem Type
 Adiabatic T and composition at const P Frozen Chemistry

Reactants

Species	No.Moles	MolFrac	K
N2	0,79000	0,71246	
O2	0,21000	0,18939	
H2	0,10884	0,09816	

View Species
 Add Delete
 Clear Reacts Clear Prods
 Clear All R>>P R<<P

Stoichiometry, Phi 0,259 Set.. Uniform T

Input File Page Title

Products

Species	No.Moles	MolFrac	K
N2	0,79000	0,74923	
H2O	0,10884	0,10322	
O2	0,15558	0,14755	
H2	3,447e-11	3,27e-11	
OH	2,295e-07	2,18e-07	
H	1,365e-14	1,29e-14	
O	9,422e-11	8,94e-11	

Calculate (F10)

3
 Auto-increment a reactant conc or property by double clicking it.

Reactants		Temperature, K	1123,
343		Pressure, atm	350,0
350,0		Volume Products/Reactants	3,1133
		Moles Products/Reactants	0,95092
1,310		H0, kJ/mol	1,377
198,703		S0, J/mol/K	240,903
29,259		Cp, J/mol/K	34,644
1,397		Gamma, Cp/Cv	1,316
26,22		Mean Molecular Weight, g	27,57
326,0234		Density, kg/m3	104,71797
389,7		Sound speed, m/s	667,3
49,96		Enthalpy, H, kJ/kg	49,96
5721,17		Entropy, S, J/kg/K	6970,93
-58,82		Intern Energy, U, kJ/kg	-288,69
-1912,41		Free Energy, G, kJ/kg	-7778,35
1115,98		Cp, J/kg/K	1256,54
0,0804		Volume, m3	0,263
7,49E+21		Molecules/cc	2,29E+21
1,24E-02		Moles/cc	3,80E-03
2,05E-05		Viscosity, kg/m/s	4,55E-05
6,30E-08		Kinematic Visc, m2/s	4,34E-07
3,55E-02		ThermCond, J/m/K/s	7,13E-02
9,77E-08		ThDiffusivity, m2/s	5,42E-07

Do komory spalania doprowadzany jest sprężony wodór i sprężone powietrze o ciśnieniu 35,46 [MPa] (350 [atm]). Substraty doprowadzane do komory spalania mają temperaturę 343 [K] (około 70 [°C]) ponieważ przechodząc między butlami sprężonych gazów gdzie panuje temperatura 293 [K] (około 20 [°C]) a wejściem komory spalania są wykorzystywane do schładzania takich urządzeń jak generator prądotwórczy, komutatory elektroniczne silników, same silniki. Obliczenia temperatury wejściowej do komory spalania będą zamieszczone w dalszej części prezentacji.

W komorze spalania zachodzi adiabatyczne i izobaryczne spalanie. Parametry wejściowe i wyjściowe procesu zamieszczone są na karcie obliczeniowej programu Gaseq.

Obliczanie sprawności wewnętrznej (izentropowej) turbiny

Problem Type: Adiabatic compression/expansion, Frozen Chemistry checked.

Species	No. Moles	MolFrac	K
N2	0,79000	0,74923	
H2O	0,10884	0,10322	
O2	0,15558	0,14755	
H2	3,447e-11	3,27e-11	
OH	2,295e-07	2,18e-07	
H	1,365e-14	1,29e-14	
O	9,422e-11	8,94e-11	

Property	Value
Temperature, K	1123
Pressure, atm	350,0
Volume Products/Reactants	72,9297
Moles Products/Reactants	1,00000
Enthalpy, H, kJ/kg	49,96
Entropy, S, J/kg/K	6970,47
Free Energy, G, kJ/kg	-2604,92

Różnica entalpii:

$$49,96 \text{ [kJ/kg]} - (-973,83 \text{ [kJ/kg]}) = 1023,79 \text{ [kJ/kg]}$$

Sprawność wewnętrzna wynosi:

$$\Delta i_{1-2} = \frac{960,86 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]}{1023,79 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]} = 0,9385 = 93,85\%$$

Problem Type: Adiabatic compression/expansion, Frozen Chemistry checked.

Species	No. Moles	MolFrac	K
N2	0,79000	0,74923	
H2O	0,10884	0,10322	
O2	0,15558	0,14755	
H2	3,447e-11	3,27e-11	
OH	2,295e-07	2,18e-07	
H	1,365e-14	1,29e-14	
O	9,422e-11	8,94e-11	

Property	Value
Temperature, K	1123
Pressure, atm	158
Volume Products/Reactants	41,2235
Moles Products/Reactants	1,00000
Enthalpy, H, kJ/kg	49,96
Entropy, S, J/kg/K	7210,26
Free Energy, G, kJ/kg	-3023,50

Różnica entalpii:

$$49,96 \text{ [kJ/kg]} - (-910,9 \text{ [kJ/kg]}) = 960,86 \text{ [kJ/kg]}$$

Z udziałów molowych substancji wprowadzanych na wejście komory spalania wyliczamy udziały masowe:

- Udział molowy azotu N_2 wynosi 79%,
- Udział molowy tlenu O_2 wynosi 21%,
- Udział molowy wodoru H_2 wynosi 10,884%.

Powyższe udziały molowe procentowe odnoszą się do udziałów azotu i tlenu (powietrza) traktowanego jako 100%. Wyliczamy udziały masowe:

$$m_{N_2} = n_{N_2} \cdot M_{BN_2} = 0,79[mol] \cdot 28,01286 \left[\frac{g}{mol} \right] = 22,13016[g] \quad (14)$$

$$m_{O_2} = n_{O_2} \cdot M_{BO_2} = 0,21[mol] \cdot 31,99806 \left[\frac{g}{mol} \right] = 6,719593[g] \quad (15)$$

$$m_{H_2} = n_{H_2} \cdot M_{BH_2} = 0,10884[mol] \cdot 2,01568 \left[\frac{g}{mol} \right] = 0,219387[g] \quad (16)$$

Sumaryczna masa wynosi:

$$m_{\Sigma} = m_{N_2} + m_{O_2} + m_{H_2} = 22,13016[g] + 6,719593[g] + 0,219381[g] = 29,06914[g] \quad (17)$$

Wyliczamy procentowe udziały masowe:

$$m_{AN_2} = \frac{m_{N_2}}{m_{\Sigma}} = \frac{22,13016}{29,06914} = 0,7613 = 76,13\% \quad (18)$$

$$m_{AO_2} = \frac{m_{O_2}}{m_{\Sigma}} = \frac{6,719593}{29,06914} = 0,2312 = 23,12\% \quad (19)$$

$$m_{AH_2} = \frac{m_{H_2}}{m_{\Sigma}} = \frac{0,219387}{29,06914} = 0,007547 = 0,7547\% \quad (20)$$

Wykonane poniżej obliczenia odnosimy do jednego kg substancji, która przepływa przez komorę spalania i turbinę.

Obliczamy ilość energii elektrycznej doprowadzonej do elektrolizera by otrzymać wodór zawarty w kg substancji.

$$E_{elekt.} = m_{AH_2} \cdot E_e = 0,007547[kg] \cdot 50 \left[\frac{kWh}{kg} \right] = 0,37735[kWh] \quad (21)$$

Obliczamy ilość energii potrzebnej do sprężenia wodoru zawartego w kg mieszanki wprowadzanej do komory spalania.

$$\begin{aligned} E_{spr H_2} &= m_{AH_2} \cdot E_{350 H_2} = 0,007547[kg] \cdot 3,60538 \left[\frac{kWh}{kg} \right] \\ &= 0,02721[kWh] \end{aligned} \quad (22)$$

Obliczamy ilość energii potrzebnej do sprężenia powietrza (azotu i tlenu) zawartego w kg mieszanki wprowadzanej do komory spalania.

$$\begin{aligned} E_{spr AIR} &= (m_{AN_2} + m_{AO_2}) \cdot E_{350 AIR} = (0,7613[kg] + 0,2312[kg]) \cdot 0,25148 \left[\frac{kWh}{kg} \right] = \\ &= 0,992453[kg] \cdot 0,25148 \left[\frac{kWh}{kg} \right] = 0,249582[kWh] \end{aligned} \quad (23)$$

Ilość energii potrzebnej na sprężenie powietrza i wodoru wynosi:

$$\begin{aligned} E_{spr} &= E_{spr H_2} + E_{spr AIR} = 0,02721[kWh] + 0,249582[kWh] \\ &= 0,276792[kWh] \end{aligned} \quad (24)$$

Obliczamy całą energię dostarczoną dodając do energii sprężania energię dostarczoną do elektrolizera:

$$E_{\Sigma} = E_{elekt.} + E_{spr} = 0,37735[kWh] + 0,276792[kWh] = 0,654142[kWh] \quad (25)$$

Z wykresów pracy sprężarki wynika że sprawność cieplna sprężarki wynosi $\eta_{sp} = 90\%$, a zatem energia którą można odzyskać z procesu sprężania wynosi:

$$Q_{spr O} = \eta_{sp} \cdot E_{spr} = 0,9 \cdot 0,276792[kWh] = 0,249113[kWh] \quad (26)$$

Ciepło odzyskane w sprężarkach odnosimy do sumarycznej energii włożonej:

$$N_1 = \frac{Q_{spr O}}{E_{\Sigma}} = \frac{0,249113[kWh]}{0,654142[kWh]} = 38,08\% \quad (27)$$

Ciepło tracone podczas pracy sprężarek wynosi:

$$Q_{spr_T} = (1 - \eta_{sp}) \cdot E_{spr} = 0,1 \cdot 0,276792[kWh] = 0,0276792[kWh] \quad (28)$$

Ciepło tracone w sprężarkach odnosimy do sumarycznej energii włożonej:

$$N_2 = \frac{Q_{spr_T}}{E_{\Sigma}} = \frac{0,0276792[kWh]}{0,654142[kWh]} = 4,23\% \quad (29)$$

Obliczamy wartość opałową wodoru zawartego w kg mieszanki:

$$E_{wo_elek} = m_{AH_2} \cdot E_{woH_2} = 0,007547[kg] \cdot 33,3333 \left[\frac{kWh}{kg} \right] = 0,251566[kWh] \quad (30)$$

Ciepło odzyskane z elektrolizera odnosimy do sumarycznej energii włożonej:

$$N_3 = \frac{E_{elekt.} - E_{wo_elek}}{E_{\Sigma}} = \frac{0,37735[kWh] - 0,251566[kWh]}{0,654142[kWh]} = \frac{0,125784[kWh]}{0,654142[kWh]} = 19,23\% \quad (31)$$

Entalpia na wejściu turbiny wynosi 50,53 [kJ/kg], entalpia na wyjściu turbiny wynosi -910,89 [kJ/kg], zatem różnica entalpii wynosi:

$$\Delta_i = i_{we} - i_{wy} = 49,96 \left[\frac{kJ}{kg} \right] - \left(-910,90 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) = 960,86 \left[\frac{kJ}{kg} \right] = \frac{960,86}{3600} \left[\frac{kWh}{kg} \right] = 0,266906 \left[\frac{kWh}{kg} \right] \quad (32)$$

Zakładamy że sprawność turbiny wynosi $\eta_{tur} = 99,5\%$ a zatem energia mechaniczna uzyskana na wale turbiny wynosi:

$$E_{tur} = \Delta_i \cdot \eta_{tur} = 0,266906 \left[\frac{kWh}{kg} \right] \cdot 0,995 = 0,265571 \left[\frac{kWh}{kg} \right] \quad (33)$$

Przyjmując że generator prądowórczy ma sprawność $\eta_{gen} = 98\%$ możemy wyliczyć energię elektryczną indukowaną na wyjściu generatora prądowórczego:

$$E_{gen} = E_{tur} \cdot \eta_{gen} = 0,265571 \left[\frac{kWh}{kg} \right] \cdot 0,98 = 0,2602596[kWh] \quad (34)$$

Obliczanie energii potrzebnej dla stabilizatora ciśnienia:

The screenshot shows the Gaseq software interface. The main window displays the following information:

- Problem Type:** Adiabatic T and composition at const P
- Reactants:**

Species	No. Moles	MolFrac	K
N2	0,79000	0,71246	
O2	0,21000	0,18939	
H2	0,10884	0,09816	
- Products:**

Species	No. Moles	MolFrac	K
N2	0,79000	0,74923	
H2O	0,10884	0,10322	
O2	0,15558	0,14755	
H2	1,152e-11	1,09e-11	
OH	1,122e-07	1,06e-07	
H	2,954e-15	2,80e-15	
O	3,086e-11	2,93e-11	
- Stoichiometry, Phi:** 0,259
- Set..:** UniformT
- Calculate (F10) Results:**

Property	Value
Temperature, K	1078,6
Pressure, atm	350,0
Volume Products/Reactants	3,5005
Moles Products/Reactants	0,95092
H0, kJ/mol	-0,156
S0, J/mol/K	239,509
Cp, J/mol/K	34,407
Gamma, Cp/Cv	1,319
Mean Molecular Weight, g	27,57
Density, kg/m3	109,03077
Sound speed, m/s	654,7
Enthalpy, H, kJ/kg	-5,67
Entropy, S, J/kg/K	6920,39
Intern Energy, U, kJ/kg	-330,92
Free Energy, G, kJ/kg	-7469,81
Cp, J/kg/K	1247,94
Volume, m3	0,253
Molecules/cc	2,38E+21
Moles/cc	3,95E-03
Viscosity, kg/m/s	4,43E-05
KinematicVisc, m2/s	4,06E-07
ThermCond, J/m/K/s	6,89E-02
ThDiffusivity, m2/s	5,07E-07

Mieszanka wodorowo powietrzna w temperaturze 293 [K] (około 20 [°C]) ma gęstość $\rho_{mie} = 381,6588$ [kg/m³], a zatem jeden kilogram mieszanki zajmuje objętość:

$$V_{mie} = \frac{1}{\rho_{mie}} = \frac{1}{381,6588 \frac{kg}{m^3}} = 0,00262014 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (35)$$

Ciśnieni na wyjściu zbiorników ciśnieniowych wynosi $p_{but} = 35,46375$ [MPa] (350[atm]), ciśnienie otoczenia wynosi $p_{ot} = 0,101325$ [MPa]. Różnica ciśnień jaką ma pokonać pompa wynosi:

$$\Delta p = p_{but} - p_{ot} = 35,46375 \text{ [MPa]} - 0,101325 \text{ [MPa]} = 35,36243 \text{ [MPa]} = 35362425 \text{ [Pa]} \quad (36)$$

Obliczamy energię potrzebną na ustabilizowanie ciśnienia dla kilograma mieszanki wodorowo powietrznej:

$$E_{st} = \Delta p \cdot V_{mie} = 35362425 \text{ [Pa]} \cdot 0,0026201 \text{ [m}^3] = 92510,28 \text{ [J]} = 0,0257374 \text{ [kWh]} \quad (37)$$

Sprawność pompy hydraulicznej wynosi $\eta_{pom} = 0,95$ a zatem energia na wale pompy wynosi

$$E_{pom} = \frac{E_{st}}{\eta_{pom}} = \frac{0,0257374 \text{ [kWh]}}{0,95} = 0,027092 \text{ [kWh]} \quad (38)$$

Do napędu pompy hydraulicznej używamy bezkomutatorowego silnika prądu stałego o sprawności $\eta_s = 0,97$ w tym przypadku energia dostarczana do silnika wynosi:

$$E_{s_stab} = \frac{E_{pom}}{\eta_s} = \frac{0,027092 \text{ [kWh]}}{0,97} = 0,0279299 \text{ [kWh]} \quad (39)$$

Silnik zasilany jest z komutatora elektronicznego o sprawności $\eta_k = 0,98$ a zatem do komutatora należy doprowadzić energię:

$$E_{k_stab} = \frac{E_{s_stab}}{\eta_k} = \frac{0,0279299 \text{ [kWh]}}{0,98} = 0,0284999 \text{ [kWh]} \quad (40)$$

Obliczamy energię doprowadzaną do komutatora silnika głównego, która jest różnicą energii otrzymywanej z generatora minus energia potrzebna do zasilania układu regulacji ciśnienia w zbiornikach ciśnieniowych sprężonego powietrza i wodoru.

$$E_{k_główny} = E_{gen} - E_{k_stab} = 0,2602596 \text{ [kWh]} - 0,0284999 \text{ [kWh]} = 0,2317597 \text{ [kWh]} \quad (41)$$

Silnik główny zasilany jest z komutatora elektronicznego o sprawności $\eta_k = 0,98$ a zatem do silnika głównego doprowadzimy energię o wartości:

$$E_{s_główny} = E_{k_główny} \cdot \eta_k = 0,2317597 \text{ [kWh]} \cdot 0,98 = 0,2271245 \text{ [kWh]} \quad (42)$$

Wiedząc że silnik główny napędzający śrubę (pędnik) ma sprawność $\eta_s = 0,97$ obliczamy energię mechaniczną doprowadzaną na śrubę okrętową:

$$E_{\text{śruba}} = E_{s_główny} \cdot \eta_s = 0,2271245 \text{ [kWh]} \cdot 0,97 = 0,220311 \text{ [kWh]} \quad (43)$$

Odzyskiwanie ciepła

Niektóre podzespoły, naszego schematu, takie jak:

- Generator prądu,
- Silnik napędzający śrubę,
- Komutator elektroniczny silnika napędzającego śrubę,
- Silnik pompy stabilizacji ciśnienia,
- Komutator silnika stabilizacji ciśnienia,

podczas pracy nagrzewają się, a chłodząc je można część energii cieplnej wykorzystać, podgrzewając wodór i powietrze przed wprowadzeniem do komory spalania. Zakładamy, że 85% tej energii można wykorzystać.

Obliczamy kolejne wartości energii, którą można powtórnie wykorzystać od Q_1, Q_2, \dots, Q_5 .

Odzyskana energia cieplna z generatora (równanie 34)

$$Q_1 = E_{tur} \cdot k \cdot (1 - \eta_{gen}) = 0,26557 \text{ [kWh]} \cdot 0,85 \cdot 0,02 = 0,004515 \text{ [kWh]} = 16,2529 \text{ [kJ]} \quad (44)$$

Odzyskana energia cieplna z silnika napędzającego śrubę (równanie 43)

$$Q_2 = E_{s_główny} \cdot k \cdot (1 - \eta_s) = 0,2271245 \text{ [kWh]} \cdot 0,85 \cdot 0,03 = 0,005792 \text{ [kWh]} = 20,85003 \text{ [kJ]} \quad (45)$$

Odzyskana energia cieplna z komutatora elektronicznego silnika napędzającego śrubę (równanie 42)

$$Q_3 = E_{k_główny} \cdot k \cdot (1 - \eta_k) = 0,23176 \text{ [kWh]} \cdot 0,85 \cdot 0,02 = 0,0039 \text{ [kWh]} = 14,18369 \text{ [kJ]} \quad (46)$$

Odzyskana energia cieplna z komutatora elektronicznego silnika napędzającego śrubę (równanie 42)

$$Q_3 = E_{k_główny} \cdot k \cdot (1 - \eta_k) = 0,23176[kWh] \cdot 0,85 \cdot 0,02 = 0,0039[kWh] = 14,18369[kJ] \quad (46)$$

Odzyskana energia cieplna z silnika napędzającego pompę stabilizacji ciśnienia (równanie 39)

$$Q_4 = E_{k_stab} \cdot k \cdot (1 - \eta_{s_stab}) = 0,0279299[kWh] \cdot 0,85 \cdot 0,02 = 0,000712212[kWh] = 2,563965[kJ] \quad (47)$$

Odzyskana energia cieplna z komutatora elektronicznego silnika napędzającego pompę stabilizacji ciśnienia

(równanie 40).

$$Q_5 = E_{k_stab} \cdot k \cdot (1 - \eta_{k_stab}) = 0,284999[kWh] \cdot 0,85 \cdot 0,02 = 0,000484498[kWh] = 1,744194[kJ] \quad (48)$$

Obliczamy sumaryczne ciepło odzyskane:

$$Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 16,2529 [kJ] + 20,85003 [kJ] + 14,18369 [kJ] + 2,563965 [kJ] + 1,744194 [kJ] = 55,59483 [kJ] \quad (49)$$

Entalpia mieszanki wodoru i powietrza doprowadzanej do komory spalania wynosi

49,96 [kJ/kg] dla temperatury 343 [K] (70 [°C]) – temperatura po przepływie obu gazów przez wymienniki ciepła.

Entalpia mieszanki wodoru i powietrza doprowadzanej do wymiennika ciepła wynosi

-5,67 [kJ/kg] dla temperatury 293 [K] (20 [°C]) – temperatura przed przepływem obu gazów przez wymienniki ciepła.

Różnica entalpii wynosi $49,96 [kJ/kg] - (-5,67 [kJ/kg]) = 55,63 [kJ/kg]$.

Procentowe wyliczenia energii przekazywanej na śrubę, energii odzyskanej i energii traconej

Całkowita energia dostarczona wynosi (równanie 25): $E_\Sigma = 0,654142[kWh]$

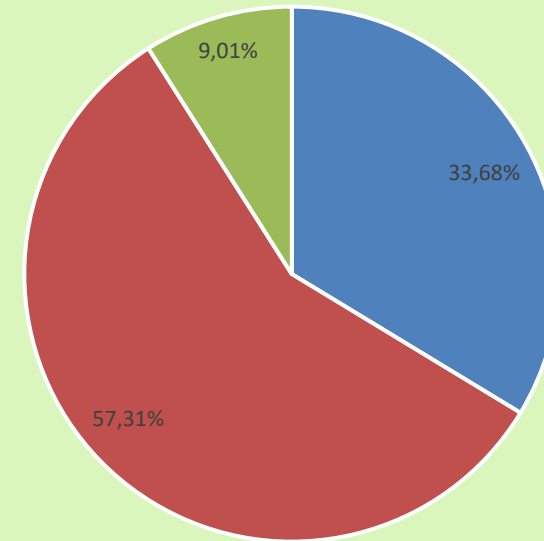
Energia przekazywana na śrubę wynosi (równanie 43): $E_{\dot{s}ruba} = 0,220311[kWh]$

Procentowy udział energii na śrubę wynosi: $\frac{E_{\dot{s}ruba}}{E_\Sigma} = \frac{0,220311[kWh]}{0,654142[kWh]} = 33,68\%$

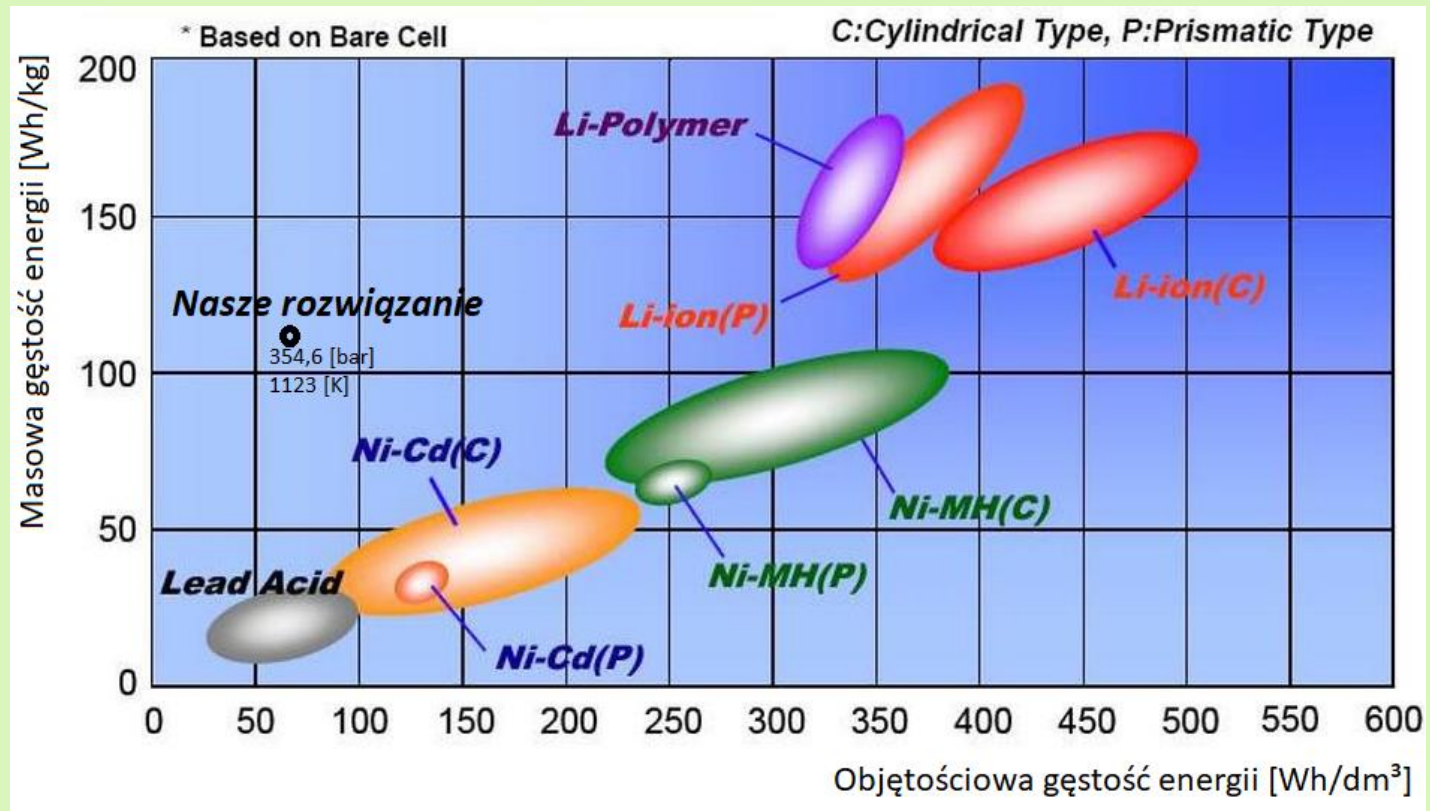
Procentowy udział energii odzyskanej wynosi: $N_1 + N_3 = 38,08\% + 19,23\% = 57,31\%$

Procentowy udział energii traconej wynosi: $100\% - 33,68\% - 57,31\% = 9,01\%$

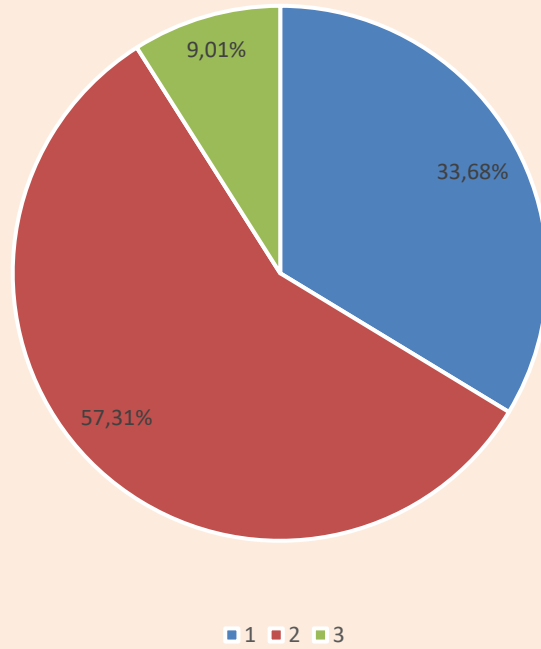
silnik cieplny o zimnych spalinach



1 energia silnika	33,68%
2 energia odzyskana	57,31%
3 energia tracona	9,01%

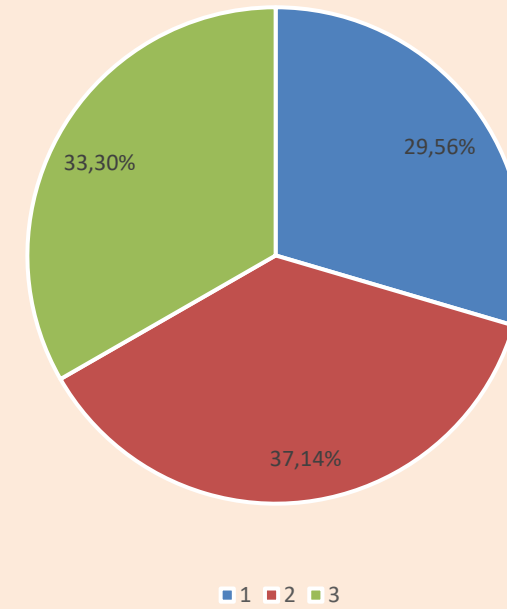


silnik cieplny o zimnych spalinach



1 śruba	33,68%
2 ciepło odzyskane	57,31%
3 ciepło tracone	9,01%

ogniwo paliwowe



1 śruba	29,56%
2 ciepło odzyskane	37,14%
3 ciepło tracone	33,30%

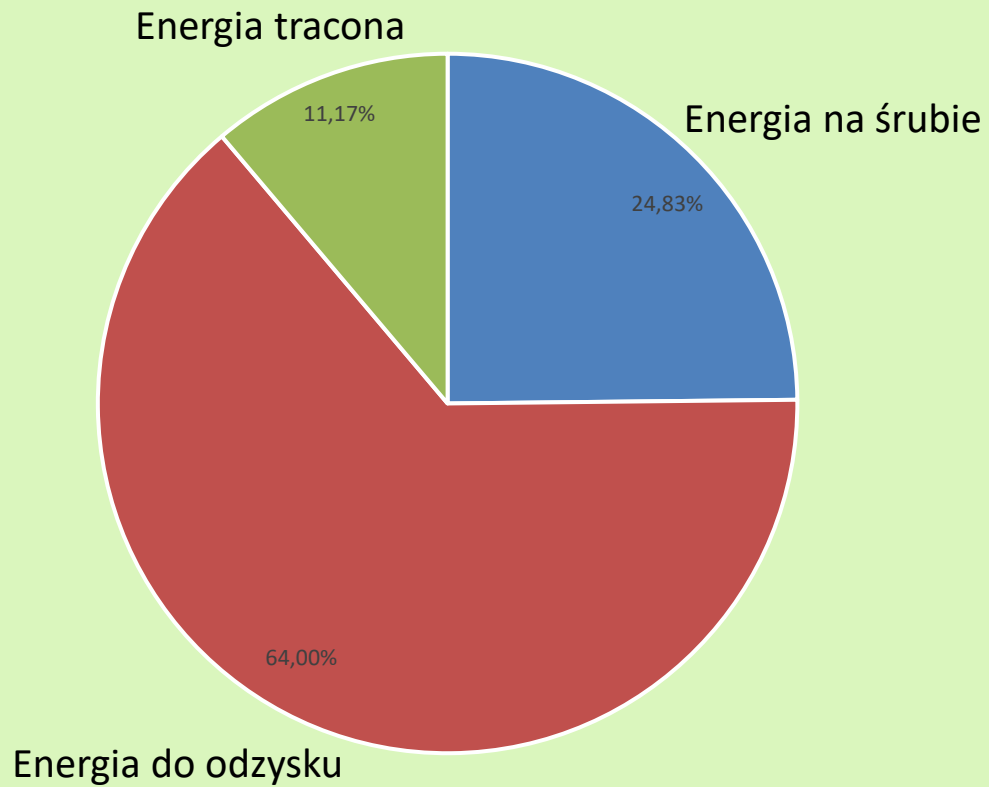
Lokomotywa spalinowa wyposażona w silnik cieplny o zimnych spalinach.

Moc turbiny 5 MW, sprawność izentropowa 80%.

Do lokomotywy dołączane są jeden lub dwa wagony z butlami wysokociśnieniowymi wykonanymi z kompozytów Zawierającymi sprężone powietrze i sprężony wodór.



Sprawność izentropowa turbiny około 80%



współczynnik λ dla procesu spalania	6,451613		
temperatura na wejściu komory spalania	325 [K]		52 [°C]
temperatura na wyjściu komory spalania	820 [K]		547 [°C]
różnicz entalpii	576,52 [kJ/kg]		0,160144 [kWh/kg]

Energia uzyskiwana na kołach lokomotywy wynosi 0,122343 [kWh/kg], ponieważ gęstość mieszaniny gazów powietrza i wodoru wynosi 396,1615 [kg/m³] mnożąc obie wielkości możemy obliczyć, ile energii można uzyskać z jednego m³ mieszaniny sprężonych gazów.

$$0,122343 \text{ [kWh/kg]} \cdot 396,1615 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 48,46739 \text{ [kWh/m}^3\text{]},$$

Masa butli cylindrycznej o pojemności 1 [m³] wytrzymującej ciśnienie 35 [MPa] wynosi 350 [kg], zatem masa butli z gazem wynosi:

$$350 \text{ [kg]} + 396,1615 \text{ [kg]} = 746,1615 \text{ [kg]}$$

Masa pełnych butli w wagonie nie może przekroczyć 90 [t] (wagon sześćoosiowy masa brutto 120 [t] masa tara wynosi 30 [t]). Przyjmujemy że w wagonie łączna pojemność wszystkich butli wynosi 120 [m³].

$$\text{Sprawdzamy: } 120 \text{ [m}^3\text{]} \cdot 746,1615 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 89539,38 \text{ [kg]} = 89,54 \text{ [t]}.$$

Obliczamy ilość energii (na kołach) jaką można wygenerować z jednego wagonu,

$$120 \text{ [m}^3\text{]} \cdot 48,46739 \text{ [kWh/m}^3\text{]} = 5816,087 \text{ [kWh]}.$$

Rozpatrujemy pociąg o masie 3240 [t], składający się z 27 wagonów (w tym lokomotywa) o masie 120 [t].

Zużycie energii potrzebnej na przeniesienie 1 [t] na odległość jednego km wynosi: 0,012 [kWh/km·t],

Zatem aby pociąg przejechał jeden km potrzeba:

$$3240 \text{ [t]} \cdot 0,012 \text{ [kWh/km} \cdot \text{t]} = 38,88 \text{ [kWh/km]}.$$

W takim razie jeden wagon daje zasięg pociągu wynoszącą:

$$5816,087 \text{ [kWh]} / 38,88 \text{ [kWh/km]} = 149,59 \text{ [km]}.$$

1. mf Scandinavia, trasa GDAŃSK – NYNÄSHAMN,
moc silnika: 21,5 MW, moc eksploatacyjna:18 MW

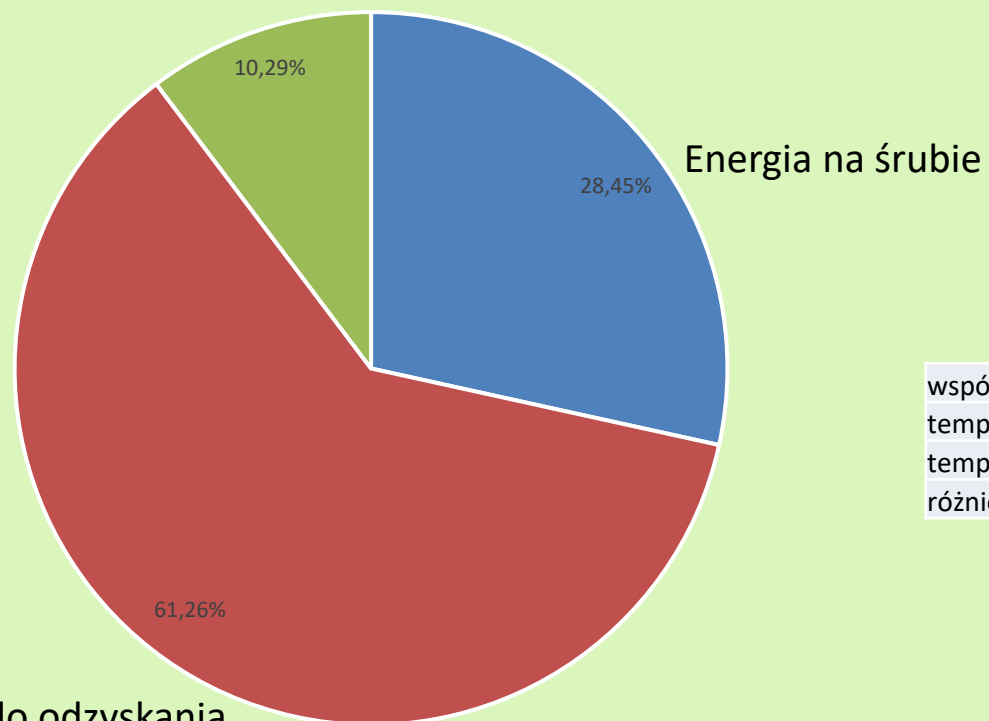
2. porównujemy napędy oparte na ogniwach paliwowych
(parametry toyoty mirai) i silnika cieplnego o zimnych
spalinach (sprawność wewnętrzna turbiny 87%)

3. W obu przypadkach paliwem jest wodór H_2 uzyskany
w wyniku elektrolizy. Porównując napędy obliczamy ile
energii mechanicznej i cieplnej można uzyskać z jednostkowej
ilości energii elektrycznej.



Sprawność izentropowa turbiny około 87%

Energia tracona



współczynnik λ dla procesu spalania	5,263158		
temperatura na wejściu komory spalania	332 [K]	59 [°C]	
temperatura na wyjściu komory spalania	928,7 [K]	655,7 [°C]	
różnicz entalpii	708,18 [kJ/kg]	0,196717 [kWh/kg]	

Pytania uwagi należy kierować na adres: ***pekajotes@gmail.com***