

LADJA NA VODIK

Tehnična knjiga za projekt Youth@STEM4SF



HYDROWAVE

Group name:

HydroWave

Author:

Maks Zagode, Anton Mlinar

Group members:

Maks Zagode, Anton Mlinar,

Eva Zvonareva, Irena Tišler, Nace Kenda

Mentor: Adela Žigert

BIC LJUBLJANA

Gimnazija in veterinarska šola

Cesta v Mestni log 47

1000 Ljubljana

Ljubljana, Avgust 2024

Uvod

V tej tehnični knjigi bomo predstavili naš projekt z naslovom Ladja na vodik. V naslednjih poglavjih se bomo spustili čez sistem ladijskega delovanja, opis posameznih sestavnih delov ladje in njeno vzdržljivosti ter teoretične izračune glede porabe. Vrsta ladje, ki smo si jo izbrali je tovorna ladja, saj menimo da bi s transformacijo tovornih ladij na vodikovo gorivo močno pripomogli k čistejšemu okolju.

Ključne besede:

Tehnična knjiga, tovorna ladja, ladja na vodik, vodik, projekt

Kazalo

Uvod	3
Ključne besede:	3
Kazalo	4
1. Slovensko poglavje	6
1.1 Sistem delovanja	6
1.2 Opis sistemskih delov	6
1.2.1 Vodikova gorivna celica	7
1.2.2 Elektrolizator	8
1.2.3 Vodikov rezervoar tipa III	9
1.2.4 Sončne celice na osnovi ogljikovih nanovlaken	9
1.2.4.1 Odpiralni/Zapiralni sistem sončnih celic – princip I	10
1.2.4.2 Odpiralni/Zapiralni sistem sončnih celic – Princip II	10
1.2.5 Elektromotor	11
1.3 Izračuni proizvodnja/poraba	12
1.3.1 Model ladje: Neo-Panamax	12
1.3.2 Proizvodnja vodika	12
1.3.3 Učinkovitost gorivnih celic PEM	13
1.3.4 Sile in moč	14
1.3.5 Velikost rezervoarjev	15
1.3.6 Avtonomija	15
1.3.7 Proizvodnja vodika	15
1.4 Primerjava ladje na vodik z ladjo na fosilna goriva	16
1.4.1 Vpliv na okolje	16
1.4.2 Primerjava z ladjo na fosilna goriva	16
1.5 Okvirni izračun cene ladje	17
1.5.1 Cena vodikove gorivne celice	18
1.5.2 Cena elektrolizatorja	18
1.5.3 Cena sončnih celic	19
1.5.3.1 Fotovoltaične sončne celice	19
1.5.3.2 Sončne celice na osnovi ogljikovih nanovlaken	19
1.5.4 Cena vodikovega rezervoarja tipa III	20
1.5.5 Cena elektromotorja	20
1.5.6 Skupna cena za sistem delovanja	21
1.6 Analiza stroškov za trup tovarne ladje Neo-Panamax	22

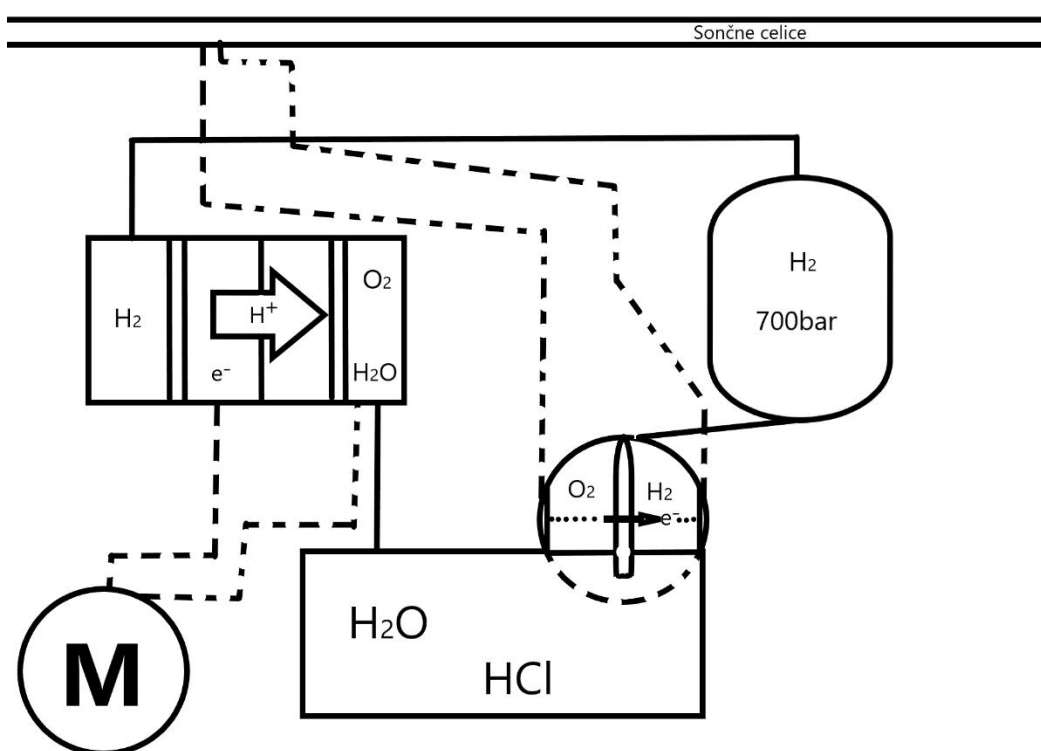
1.6.1	Izračuni stroškov materiala in opreme	22
1.6.1.1	Izračun stroškov jeklo	22
1.6.1.2	Izračun stroškov opreme	23
1.6.1.3	Skupna ocenjena cena	23
1.6.2	Izračuni stroškov izdelave in montaže	23
1.6.2.1	Regija z nizkimi stroški (Azija)	23
1.6.2.2	Skupna ocena za regijo z nizkimi stroški	24
1.6.2.3	Regija z visokimi stroški (Evropa, S Amerika)	24
1.6.2.4	Skupna ocena za regijo z visokimi stroški	24
1.7	Ocenjena nakupna cena ladje	25
Zaključek		26
Kazalo slik		27
Viri		28
Viri slik		28

1. Slovensko poglavje

Ta tehnična knjiga je razdeljena na tri dele, in sicer: slovenski, angleški ter nemški del. Ta poglavja se med seboj razlikujejo le v jeziku, v katerem so napisana.

1.1 Sistem delovanja

Koncept ladja na vodik je sestavljen iz sklopa gorivnih celic, rezervoarjev za vodik, rezervoarjev za vodo, sklopa elektrolizatorjev, elektromotorja in sončnih celic na osnovi ogljikovih nanocevi/fotovoltaičnih celic. V tem principu ladja medtem, ko porablja svoje zaloge vodika preko delovanja gorivnih celic, jih tudi proizvaja via sončne celice. Tako ladji omogočimo večjo avtonomijo,



kot bi jo imela sicer.

1.2 Opis sistemskih delov

V tem poglavju se bomo poglobili v posamezni del v sistemu, ki so bili omenjeni v prejšnjem poglavju. Predstavili bomo, sestavne dele komponent, njegove naloge in način delovanja.

1.2.1 Vodikova gorivna celica

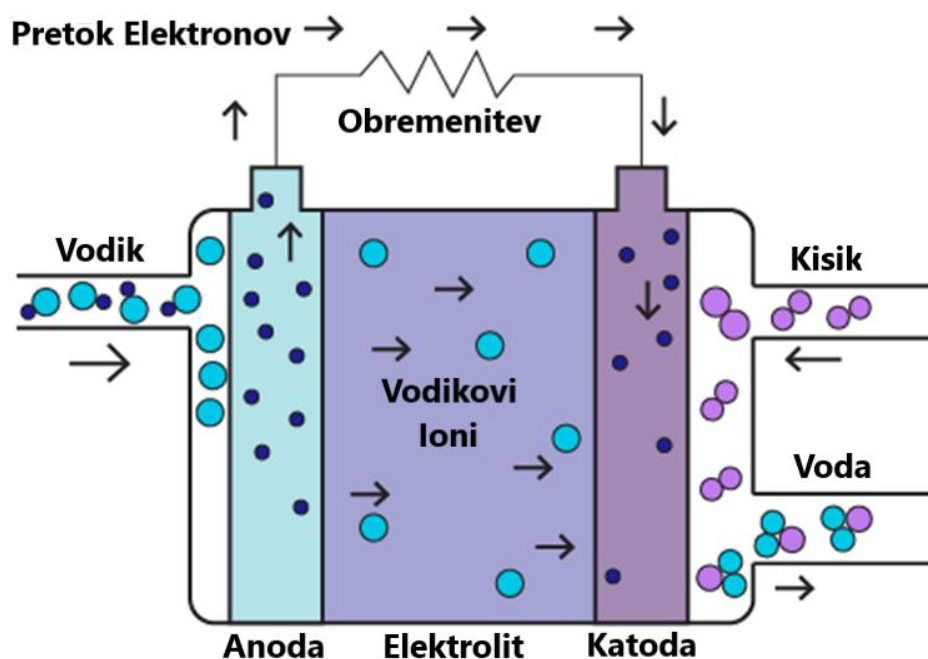
Vodikova gorivna celica pretvarja kemijsko energijo vodika in kisika neposredno v električno energijo, toploto in vodo. Deluje na osnovi elektrokemijskih reakcij, ki potekajo v več ključnih komponentah: anodi, katodi, elektrolitu, membrani in katalizatorju.

Vodik vstopi v celico na anodi, kjer katalizator, običajno iz platine, omogoči razpad vodika na protone in elektrone. Protoni potujejo skozi elektrolitno membrano proti katodi, medtem ko elektroni potujejo skozi zunanji električni krog, kar ustvarja električni tok za napajanje naprav. Na katodi se protoni, elektroni in kisik združijo, prav tako s pomočjo katalizatorja in tvorijo vodo ter sprostijo toploto.

Skupna kemijska reakcija je:



Vodikove gorivne celice so zelo učinkovite in okolju prijazne, saj proizvajajo le vodo kot stranski produkt. Kljub temu se soočamo z izzivi, kot so visoki stroški katalizatorjev in zahtevno shranjevanje vodika. Navkljub tem izzivom, imajo velik potencial za uporabo v transportu, stacionarnih energetskih napravah in prenosnih napravah.



Slika 2: Shema gorivne celice

1.2.2 Elektrolizator

Elektrolizator je naprava, ki uporablja električno energijo za spodbujanje kemijskih reakcij, ki sicer ne bi potekle spontano. Glavne komponente elektrolizatorja so vir napajanja, elektrode in elektrolit. Vir napajanja zagotavlja potrebno električno energijo, elektrode (katoda in anoda) so potopljene v elektrolit, ki omogoča prenos električnega toka.

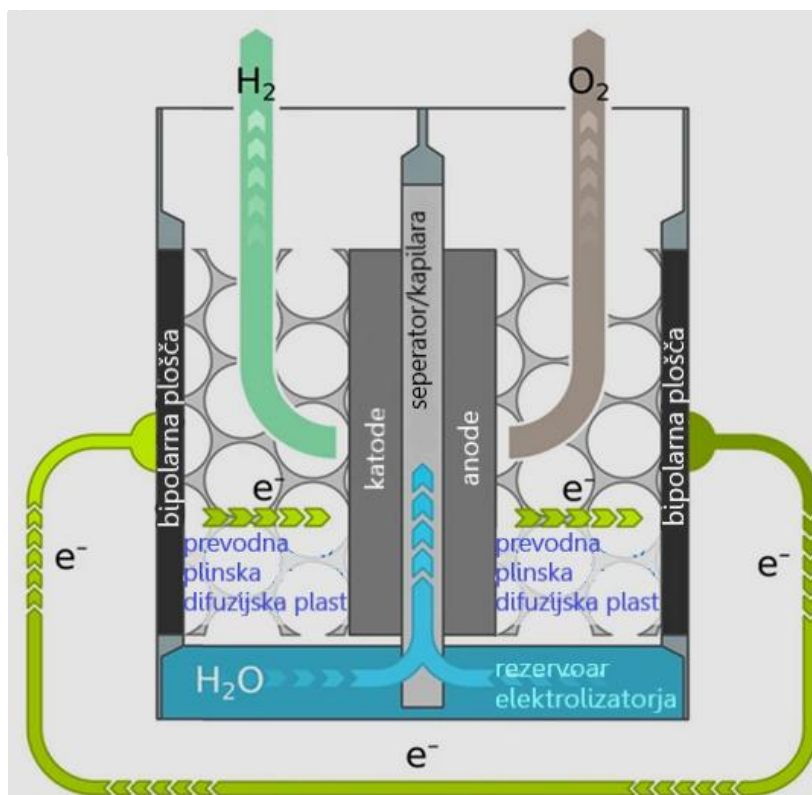
Proces elektrolize se začne s povezavo elektrolizatorja na električni vir, kar povzroči premikanje ionov v elektrolitu. Pozitivni ioni (kationi) se premaknejo proti katodi, kjer prejmejo elektrone in se reducirajo, medtem ko se negativni ioni (anioni) premaknejo proti anodi, kjer oddajo elektrone in se oksidirajo. Na ta način se na elektrodah tvorijo različni produkti, odvisno od uporabljenega elektrolita in elektrod.

Pri elektrolizi vode, ki je tipičen primer uporabe elektrolizatorja, se voda (H_2O) z dodatkom kisline ali baze razgradi na vodik (H_2) in kisik (O_2). Enačbe za elektrolizo vode so naslednje:

- Na katodi (reduciranje): $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
- Na anodi (oksidacija): $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$

Voda je v elektrolizatorju z dodatkom majhne količine kisline ali baze za povečanje prevodnosti. Ko tok teče skozi sistem, se voda razgradi in tvori vodik na katodi in kisik na anodi.

Elektrolizatorji, ki izvajajo elektrolizo vode, so ključni v različnih industrijskih procesih, kot so proizvodnja vodika za gorivne celice, kjer je vodik uporabljen kot čist vir energije. Prav tako so pomembni za proizvodnjo kisika za medicinske in industrijske namene. Proces elektrolize vode je okolju prijazen in ponuja obetavne možnosti za trajnostno proizvodnjo energije in industrijskih plinov.



Slika 3: Shema PEM elektrolizatorja - Hysata

1.2.3 Vodikov rezervoar tipa III

Vodikov rezervoar tipa 3 je napredna posoda za skladiščenje stisnjenega vodika, zasnovana za prenašanje visokih tlakov do 700 barov. Njegova struktura vključuje notranji liner iz aluminija, ki je neprepusten za pline, in kompozitni ovoj iz ogljikovih vlaken, ki dodatno povečuje trdnost in zmanjšuje težo. Zaradi teh lastnosti so rezervoarji tipa 3 idealni za uporabo v vozilih na gorivne celice, industrijskih procesih in stacionarnih sistemih za skladiščenje energije. Poleg visoke zmogljivosti so tudi zelo varni, saj so odporni na fizične poškodbe in korozijo, ter prestajajo stroga testiranja in certificiranja. S kombinacijo visoke odpornosti na tlak in zmanjšane mase, predstavljajo pomemben



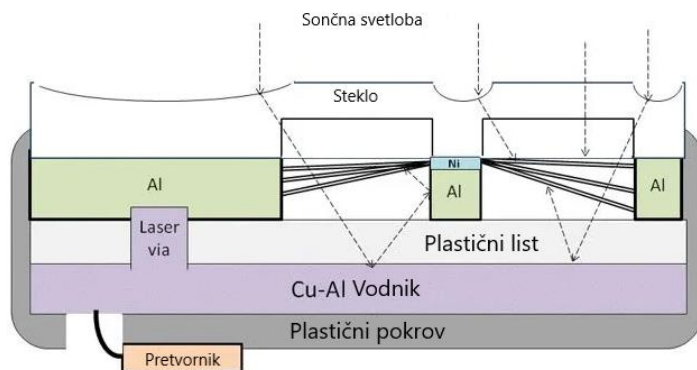
Slika 4: Shema Vodikovega rezervoarja tipa III

napredek v tehnologiji skladiščenja plinov.

1.2.4 Sončne celice na osnovi ogljikovih nanovlaken

Sončne celice na osnovi ogljikovih nanovlaken predstavljajo inovativno tehnologijo v fotovoltaiki. Ogljikova nanovlakna, zaradi svojih edinstvenih elektronskih in optičnih lastnosti, omogočajo učinkovito pretvorbo sončne energije v električno. Ogljikova nanovlakna učinkovito absorbirajo širok spekter sončne svetlobe, kar povzroči vzbujanje elektronov in nastanek elektronsko-luknjičnih parov. Ti pari se ločijo, elektroni in luknje pa se hitro premikajo proti elektrodama zaradi visoke mobilnosti v nanovlaknih, kar ustvarja električni tok z minimalnimi izgubami.

Sončne celice na osnovi ogljikovih nanovlaken ponujajo več prednosti. Njihova učinkovitost je višja od tradicionalnih silicijevih celic - so lahki, trpežni in prilagodljivi, kar omogoča izdelavo fleksibilnih sončnih modulov. Prav tako imajo potencial za nižje proizvodne stroške v primerjavi s silicijevimi celicami. Medtem ko so te sončne celice še v razvoju, laboratorijski poskusi kažejo obetavne rezultate. S kontinuiranim napredkom v raziskavah bi lahko postale ključni del trajnostne energetske

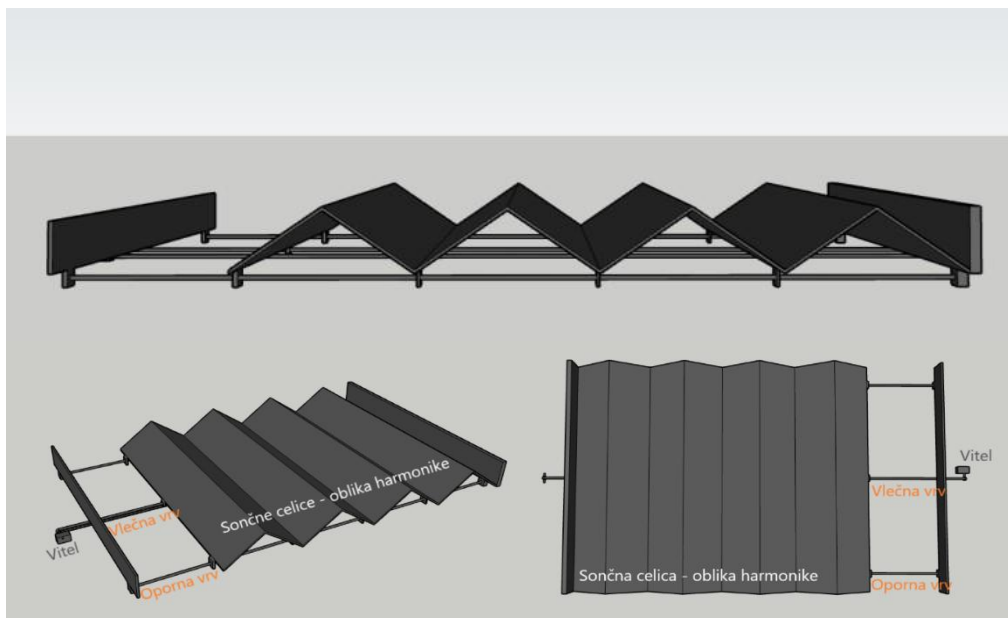


Slika 5: Shema sončnih celic na osnovi ogljikovih nanovlaken - NovaSolix

infrastrukture, zaradi svoje visoke učinkovitosti, prilagodljivosti in nizkih stroškov.

1.2.4.1 Odpiralni/Zapiralni sistem sončnih celic – princip I

Ena izmed možnosti za sistem sončnih celic, so sončne celice spete skupaj v obliki origamija harmonike. V tem principu potrebujemo samo en vitel, ki odpira in zapira sončne celice, ter dve

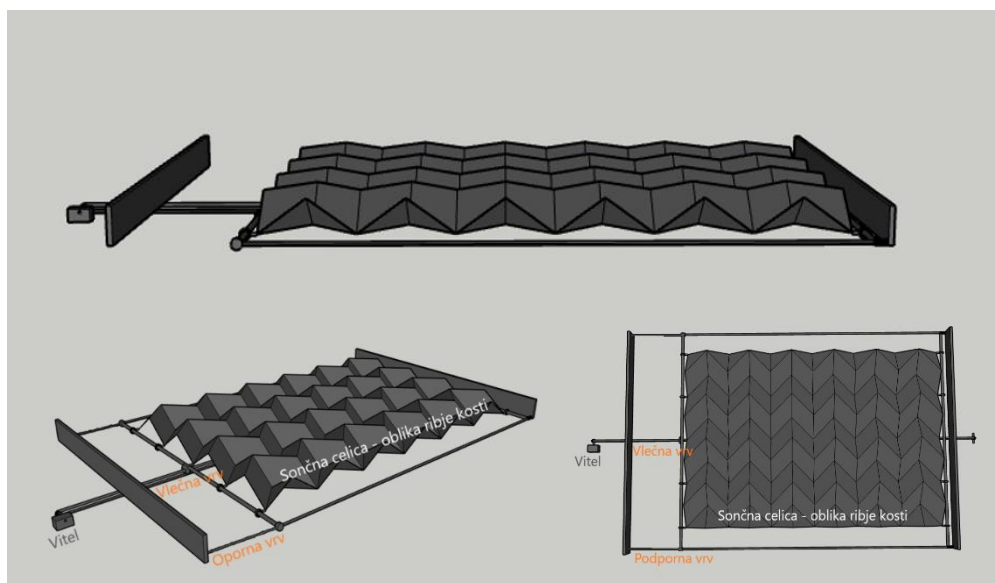


Slika 6: 3D shema principa I - Harmonika

pomožni stranski vrvi, ki služita kot nosila.

1.2.4.2 Odpiralni/Zapiralni sistem sončnih celic – Princip II

Drugi princip sončnih celic pa je origami oblike ribje kosti prvega reda. V tem primeru moramo uporabiti tri vitle, saj se v ta oblika origamija za razliko od origamija harmonike zmanjša tako po dolžini kot širini. Ta princip je nekoliko težji, saj se stranski (nosilni) vrvi, morata tudi nekoliko



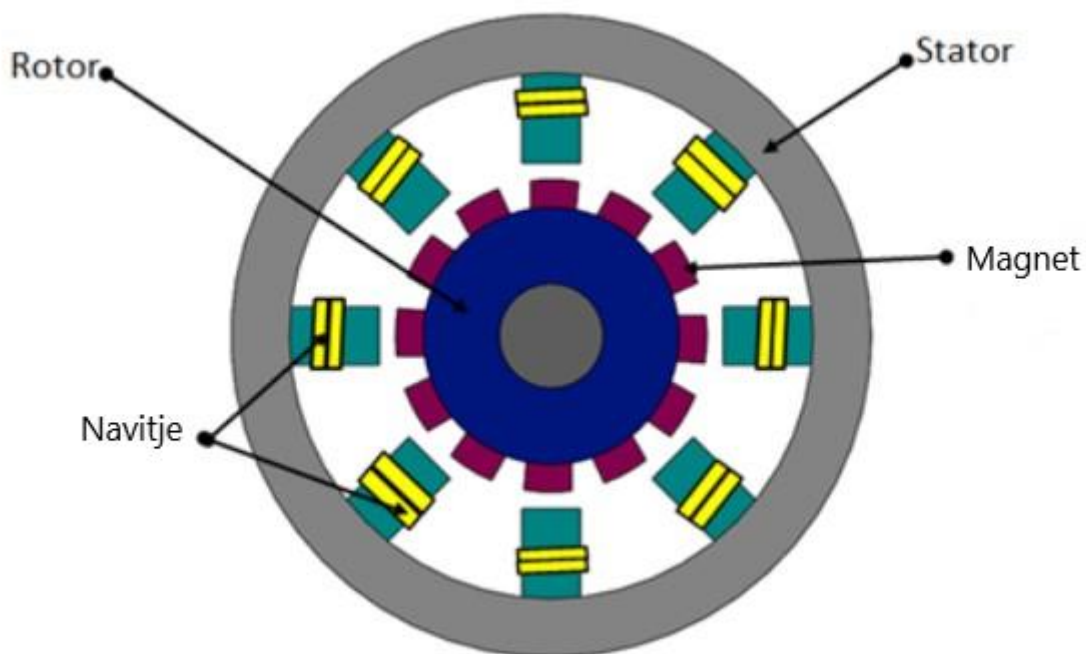
Slika 7: 3D shema principa II - Ribja kost

premikati, da ostaneta napeti v odprtem in zloženem stanju sončnih celic.

1.2.5 Elektromotor

Elektromotorji v ladjah delujejo na principu elektromagnetne indukcije. Sestavljeni so iz statorja (stacionarni del, ki ustvarja magnetno polje) in rotorja (rotirajoči del, ki se vrti zaradi interakcije z magnetnim poljem statorja). Vrtenje rotorja prenaša kinetično energijo na propeler, ki poganja ladjo.

Elektromotorji so učinkoviti, ekološki, omogočajo natančen nadzor hitrosti in smeri, ter so tišji od dizelskih motorjev. Najpogosteje se uporabljajo izmenični (AC) motorji, predvsem trifazni asinhroni ali sinhroni motorji, pa tudi permanentno magnetni sinhroni motorji (PMSM), znani po visoki učinkovitosti in zanesljivosti.



Slika 8: Shema delovanja elektromotorja

1.3 Izračuni proizvodnja/poraba

V tem poglavju bomo prikazali teoretično avtonomijo ladje.

1.3.1 Model ladje: Neo-Panamax

$$\text{cca. } d = 366 \text{ m}$$

$$\text{cca. } \check{s} = 49 \text{ m}$$

$$\text{cca. } v = 31 \text{ m}$$

$$\hookrightarrow \text{pod vodo } 15 \text{ m (ugrez)}$$

$$u = 15 \text{ m}$$

$$\text{cca. } S = d \times \check{s} + (v - u) \times d \times 2$$

$$S = 366 \text{ m} \times 49 \text{ m} + (31 \text{ m} - 15 \text{ m}) \times 366 \text{ m} \times 2$$

$$S = 17.934 \text{ m}^2 + 11.712 \text{ m}$$

$$S = 29.646 \text{ m}^2$$

$$\text{cca. } S_{\text{STRANICA}} = 5.856 \text{ m}^2$$

$$\text{cca. } S_{\text{PALUBA}} = 17.934 \text{ m}^2$$

$$\text{cca. } S_{\text{VSE}} = 29.646 \text{ m}^2$$

$$m_{\text{LADJA}} = 165.000 \text{ t}$$

$$m_{\text{TOVOR}} = 150.000 \text{ t}$$

$$m_{\text{VSE}} = 315.000 \text{ t}$$

$$V_{\text{LADJA}} = 555.954 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{TOVOR}} = 174.695 \text{ m}^3$$

$$\hookrightarrow \text{Tovor, ki je nad trupom}$$

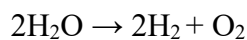
$$V_{\text{VSE}} = 730.649 \text{ m}^3$$

	Celica na ogljikova nanovlakna	Fotovoltaična celica
Učinkovitost	Do 90% $\eta = 0,9 \text{ kW/m}^2$	Do 23% $\eta = 0,23 \text{ kWh/m}^2$
Sonce je pod kotom 30° \hookrightarrow odboj svetlobe od morja je 65% \hookrightarrow sledi:	$2 \times 0,65 \times 0,9 \text{ kW/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2$ $= 6.851,5 \text{ kWh}$	$2 \times 0,65 \times 0,23 \text{ kWh/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2$ $= 1.750,9 \text{ kWh}$
Sonce je pod kotom 30° \hookrightarrow odboj svetlobe od morja je 8% \hookrightarrow sledi:	$2 \times 0,08 \times 0,9 \text{ kW/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2$ $= 842,3 \text{ kWh}$	$2 \times 0,08 \times 0,23 \text{ kWh/m}^2 \times 5.856 \text{ m}^2 =$ $215,5 \text{ kWh}$
Proizvodnja po 12h sonca je	46.182,7 kWh	11.798,64 kWh
Paluba Idealen kot 90°	$0,9 \text{ kW/m}^2 \times 17.934 \text{ m}^2$ $= 16.140,6 \text{ kWh}$	$0,23 \text{ kWh/m}^2 \times 17.934 \text{ m}^2$ $= 4.124,8 \text{ kWh}$
Proizvodnja po 12h sonca je	193.687,2 kWh	49.497,6 kWh
Skupna proizvodnja pri idealnih pogojih je	239.849,9 kWh $\hookrightarrow 5.780 \text{ kg H}_2$	61.296 kWh $\hookrightarrow 1.477 \text{ kg H}_2$

1.3.2 Proizvodnja vodika

➤ elektroliza vode

- elektrika iz sončnih celic
- voda iz rezervoarja



$$\frac{n(\text{H}_2)}{n(\text{H}_2\text{O})} = \frac{2}{2}$$

$$n(\text{H}_2) = n(\text{H}_2\text{O})$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{1.000 \text{ g mol}}{2,02 \text{ g}}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = 495,05 \text{ mol}$$

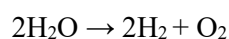
$$m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{495,05 \text{ mol} \times 18,02 \text{ g}}{\text{mol}}$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 8.920,79 \text{ g}$$

1 kg H₂ 8,92 kg H₂O
↳ 8,92 ℓ H₂O

1 kg H₂ 41,5 kWh
↳ Hysata

1.3.3 Učinkovitost gorivnih celic PEM



$$\Delta G = -237,13 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H = -285,84 \text{ kJ/mol}$$

$$\eta_{\text{MAX}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \times 100$$

$$\eta_{\text{MAX}} = \frac{-237,13 \text{ kJ mol}}{-285,84 \text{ kJ mol}} \times 100$$

$$\eta_{\text{MAX}} = 85,96 \%$$

$$\rho_E = 39,39 \text{ kWh/kg} \times 0,8296 = 32,7 \text{ kWh/kg}$$

ENERGIJSKA VREDNOST

1kg H₂. 39,39 kWh

MAKSIMALNI IZKORISTEK

1kg H₂ 32,70 kWh

1.3.4 Sile in moč

Podatki

$$V = 15,28 \text{ m/s}$$

$$d = 366 \text{ m}$$

$$S = 11.715 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Reynoldsovo število

$$Re = \frac{V \times d}{\nu}$$

$$Re = \frac{15,28 \text{ m} \times 366 \text{ m} \times \text{s}}{1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \times \text{s}}$$

$$Re = 4,7 \times 10^9$$

Koeficient trenja

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10}(Re) - 2)^2}$$

$$C_f = \frac{0,075}{(9,673 - 2)^2}$$

$$C_f \approx 0,00127$$

Trenje

$$R_f = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \times C_f$$

$$R_f = \frac{1}{2} \times 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (15,28 \text{ m/s})^2 \times 11.715 \text{ m}^2 \times 0,00127$$

$$R_f \approx 1.785.670 \text{ N} \approx 1,79 \text{ MN}$$

Moč

$$P = R_f \times V$$

$$P = 1,79 \text{ MN} \times 15,28 \text{ m/s}$$

$$P \approx 27.281.073 \text{ W} \approx 27,28 \text{ MW}$$

OPRAVLJENA MOČ MOTORJA

24h 654,72 MWh

↳ 20.022 kg H₂

Moč v dnevnu

$$P_{dan} = P \times dan$$

$$P_{dan} = 27,28 \text{ MW} \times 24 \text{ h}$$

$$P_{dan} \approx 654,72 \text{ MWh}$$

Poraba vodika na dan

$$m_{H_2} = \frac{P_{dan}}{\rho_E}$$

$$m_{H_2} = \frac{654,72 \text{ MWh} \times \text{kg}}{32,7 \text{ kWh}}$$

$$m_{H_2} \approx 20.022 \text{ kg}$$

1.3.5 Velikost rezervoarjev

Rezervoar za vodik: 3 milijona galonov ($\doteq 11.356.235,352 \ell$)

Rezervoar za vodo \rightarrow namenjen zgolj elektrolizi

$$p = 70.000 \text{ kPa}$$

$$m = \frac{P \times V \times M}{T \times R}$$

$$m = 664.663,5 \text{ kg}$$

$$T = 293 \text{ K}$$

	Celice iz ogljikovih nanovlaken	Fotovoltaične celice
H ₂	Proizvodnja: 481,6 kg/h Poraba: 834,3 kg/h Razlika: -352,7 kg/h	Proizvodnja: 123,1 kg/h Poraba: 834,3 kg/h Razlika: -711,2 kg/h
H ₂ O	Proizvodnja: 7.441,9 kg/h Poraba: 4.172,8 kg/h Razlika: -3.146,1 kg/h	Proizvodnja: 7.441,9 kg/h Poraba: 1.066,8 kg/h Razlika: -6.343,9 kg/h
VOLUMEN H ₂ O	1 m ³	1 m ³

*Odvečna voda se spusti v morje, ali se uporablja za dodatek k rezervoarju za pitno vodo

1.3.6 Avtonomija

$$m_{\text{GORIVA}} = 664.663,5 \text{ kg H}_2 \rightarrow \text{poln tank}$$

$$m_{\text{PORABA}} = 20.022 \text{ kg H}_2/24\text{h}$$

$$V_{\text{MAX}} = 30 \text{ vozlov} \doteq 55 \text{ km/h}$$

$$m_{\text{PROIZVODNJA}} = 5.780 \text{ kg H}_2/12\text{h} \rightarrow 90\% \text{ izkoristek celic}$$

$$1.477 \text{ kg H}_2/12\text{h} \rightarrow 23\% \text{ izkoristek celic}$$

$$\text{Avtonomija} = \frac{m_{\text{GORIVO}}}{m_{\text{PORABA}}}$$

POLN TANK 30 dni
↳ 39.600 km

$$\text{Avtonomija} = \frac{664.663,5 \text{ kg}}{20.022 \text{ kg}}$$

$$\text{Avtonomija} = 30 \text{ dni}$$

1.3.7 Proizvodnja vodika

➤ Proizvaja 30 dni

↳ prva faza → poraba začetnega polnega tanka → 664.663,5 kg

➤ povprečen čas sonca 12h

CIKEL		Celice iz ogljikovih nanovlaken	Fotovoltaične celice
	Proizvodnja*	481,6 kg/h	123,1 kg/h
0	Vzdržljivost	$\frac{30 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12\text{h}}{20.022 \text{ kg h}} = 9 \text{ dni}$ Po prvi fazi je dovolj goriva za dodatnih 9 dni	$\frac{30 \text{ dni} \times 123,1 \text{ kg} \times 12\text{h}}{20.022 \text{ kg h}} = 3 \text{ dni}$ Po prvi fazi je dovolj goriva za dodatne 3 dni
1	Vzdržljivost	$\frac{9 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12\text{h}}{20.022 \text{ kg h}} = 3 \text{ dni}$ Po prvi drugi je dovolj goriva za dodatne 3 dni	$\frac{3 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12\text{h}}{20.022 \text{ kg h}} = 7,2 \text{ h}$ Po drugi fazi je dovolj goriva za 7,2h
2	Vzdržljivost	$\frac{3 \text{ dni} \times 481,6 \text{ kg} \times 12\text{h}}{20.022 \text{ kg h}} = 1 \text{ dan}$ Po tretji fazi je dovolj goriva za dodaten dan	
3	Vzdržljivost	$\frac{1 \text{ dan} \times 481,6 \text{ kg} \times 12\text{h}}{20.022 \text{ kg h}} = 7,2\text{h}$ Po četrti fazi je dovolj goriva za 7,2h	
	CELOTNA AVTONOMIJA	43,3 DNI → 57.156 km	33,3 DNI → 43.956 km

* Pri vsakem ciklu se proizvede še nekaj vodika, zato ga uporabimo za nadaljnje faze

1.4 Primerjava ladje na vodik z ladjo na fosilna goriva

V tem poglavju se bomo, tako kot lahko že ugotovimo iz naslova, osredotočili na tehnične podatke ladji in jih primerjali.

1.4.1 Vpliv na okolje

Pri vplivu na okolje lahko rečemo, da so ladje na vodikov pogon veliko bolj prijazne od ladji na fosilna goriva. To se dobro vidi pri nastalih produktih, saj medtem ko pri ladjah na vodik nastane samo voda (H_2O), so nastali produkti pri ladjah na fosilna goriva toplogredni plini, ki zastrupljajo vodo, segrevajo in onesnažujejo ozračje ter so lahko tudi škodjivi pri vdihavanju. A se moramo tukaj posvetiti še pridobivanju in proizvodnji fosilnih goriv ter vodika. Pri pridobivanju in predelavi fosilnih goriv močno posegamo v zemljino skorjo, zaradi česar se lahko na teh delih tudi ugrezne. Ne smemo tudi pozabiti na nevarnosti razlitja, ki močno uniči celoten ekosistem na tistem območju. Pri proizvodnji vodika pa ne smemo izpustiti, da potrebujemo elektriko, saj je vodik vrsta shranjevanja energije. Tu pa naletimo na problem, saj je večina svetovne elektrike proizvedena z izgorevanjem fosilnih goriv, kar je lahko velik minus, ker se tako ne izognemo proizvodnji toplogrednih plinov. Rešitev za to sta, tako imenovana zeleni in roza vodik. Zeleni vodik je izraz za vodik, ki je proizveden na osnovi elektrike iz naravnih virov (voda, zrak, sonce). Roza vodik, pa je ime za vodik, ki je proizveden na osnovi elektrike iz jedrske elektrarne.

1.4.2 Primerjava z ladjo na fosilna goriva

	Ladja na fosilna goriva	Ladja s fotovoltaičnimi celicami	Ladja na celice iz ogljikovih nanovlaken
Moč motorja	27,28 MW	27,28 MW	27,28 MW
Začetna masa goriva	664.663,5 kg	664.663,5 kg	664.663,5 kg
Končna masa goriva	664.663,5 kg	666.732,6 kg	866.952,6 kg
Volumen goriva	730,4 m ³	11.356,2	11.356,2
Gostota goriva	910 kg/m ³	59 kg/m ³	59 kg/m ³
Cena goriva (1.000 kg)	560 €	1.360 €	1.360 €
Poraba goriva (100 km)	4.240,6 kg	1.516,8 kg	1.516,8 kg
Cena goriva (100 km)	2.374,736 €	2.062,848 €	2.062,848 €
Avtonomija	11,9 dni ↳ 15.708 km	33,3 dni ↳ 43.956 km	43,3 DNI ↳ 57.156 km

Ladja na fosilna goriva

Podatki

$$m = 664.663,5 \text{ kg}$$

$$\rho = 910 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_E = 11,7 \text{ kWh/kg}$$

$$P = 27,28 \text{ MW}$$

Velikost rezervoarja

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{664.663,5 \text{ kg m}^3}{910 \text{ kg}}$$

$$V \approx 730,4 \text{ m}^3$$

Moč v dnevnu

$$P_{dan} = P \times dan$$

$$P_{dan} = 27,28 \text{ MW} \times 24 \text{ h}$$

$$P_{dan} \approx 654,72 \text{ MWh}$$

1.5 Okvirni izračun cene ladje

Poraba goriva na dan

$$m = \frac{P_{dan}}{\rho_E}$$

$$m = \frac{654,72 \text{ MWh} \times \text{kg}}{11,7 \text{ kWh}}$$

$$m \approx 55.958,9 \text{ kg}$$

Avtonomija

$$Avtonomija = \frac{m_{POLN TANK}}{m}$$

$$Avtonomija = \frac{664.663,5 \text{ kg}}{55.958,9 \text{ kg}}$$

$$Avtonomija \approx 11,9 \text{ dni}$$

$$Avtonomija = 11,9 \text{ dni} \times 24 \text{ h} \times 55 \text{ km/h}$$

$$Avtonomija = 15.708$$

Okvirni izračun cene ladje bomo izračunali na podlagi okvirnih cen vseh sistemskih delov ladje. Te podatke bomo dobili z ocenitvijo vrednosti s podatki iz interneta. Dobljeni ceni bomo nato prišteli še ovirno ceno ladijskega ogrođja.

1.5.1 Cena vodikove gorivne celice

$$P_{\text{GORIVNA CELICA}} = 27,28 \text{ MW}$$

$$P_{\text{HORIZON GORIVNA CELICA}} = 1 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{MAX}} = 85,96 \%$$

$$\text{cca. } \text{Cena}_{\text{HORIZON GORIVNA CELICA}} = 500.000 \text{ €}$$

$$\eta_{\text{GORIVNA CELICA}} = \frac{P_{\text{GORIVNA CELICA}}}{P_{\text{MAX}}}$$

$$\eta_{\text{GORIVNA CELICA}} = \frac{27,28 \text{ MW}}{0,86 \text{ MW}}$$

$$\eta_{\text{GORIVNA CELICA}} = 32$$

$$P_{\text{MAX}} = P_{\text{HORIZON GORIVNA CELICA}} \times \eta_{\text{MAX}}$$

$$P_{\text{MAX}} = 1 \text{ MW} \times 85,96\%$$

$$P_{\text{MAX}} = 0,86 \text{ MW}$$

$$\text{Cena} = \text{Cena}_{\text{HORIZON GORIVNA CELICA}} \times \eta_{\text{GORIVNA CELICA}}$$

$$\text{Cena} = 500.000 \text{ €} \times 32$$

$$\text{Cena} = 16.000.000 \text{ €}$$

1.5.2 Cena elektrolizatorja

$$m_{\text{VODIK}} = 834,3 \text{ kg/h}$$

$$\eta_{\text{MAX}} = 41,5 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\text{cca. } \text{Cena}_{\text{ELEKTROLIZATOR}} = 870 \text{ €/kW}$$

$$P_{\text{ELEKTROLIZATOR}} = \eta_{\text{MAX}} \times m_{\text{VODIK}}$$

$$P_{\text{ELEKTROLIZATOR}} = 41,5 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \times 834,3 \text{ kg/h}$$

$$P_{\text{ELEKTROLIZATOR}} = 34.623,5 \text{ kW}$$

$$\text{cca. } \text{Cena} = \text{Cena}_{\text{ELEKTROLIZATOR}} \times P_{\text{ELEKTROLIZATOR}}$$

$$\text{Cena} = 870 \text{ €/kW} \times 34.623,5 \text{ kW}$$

$$\text{cca. } \text{Cena} = 30.122.445 \text{ €}$$

1.5.3 Cena sončnih celic

Pri izračunu okvirne cene za sončne celice imamo dve možnosti (fotovoltaične celice in ogljikove celice).

1.5.3.1 Fotovoltaične sončne celice

cca. $d = 366 \text{ m}$

cca. $\check{s} = 49 \text{ m}$

cca. $v = 31 \text{ m}$

\hookrightarrow pod vodo 15 m (ugrez)

$u = 15 \text{ m}$

1 m² 320 €

cca. $S = d \times \check{s} + (v - u) \times d \times 2$

$S = 366 \text{ m} \times 49 \text{ m} + (31 \text{ m} - 15 \text{ m}) \times 366 \text{ m} \times 2$

$S = 17.934 \text{ m}^2 + 11.712 \text{ m}$

$S = 29.646 \text{ m}^2$

cca. $S_{\text{STRANICA}} = 5.856 \text{ m}^2$

cca. $S_{\text{PALUBA}} = 17.934 \text{ m}^2$

cca. $S_{\text{VSE}} = 29.646 \text{ m}^2$

cca. $\text{Cena} = S_{\text{VSE}} \times \frac{320 \text{ €}}{\text{m}^2}$

$\text{Cena} = 29.646 \text{ m}^2 \times \frac{320 \text{ €}}{\text{m}^2}$

cca. $\text{Cena} = 9.486.720 \text{ €}$

1.5.3.2 Sončne celice na osnovi ogljikovih nanovlaken

cca. $d = 366 \text{ m}$

cca. $\check{s} = 49 \text{ m}$

cca. $v = 31 \text{ m}$

\hookrightarrow pod vodo 15 m (ugrez)

$u = 15 \text{ m}$

1 m² 30 €

$S = d \times \check{s} + (v - u) \times d \times 2$

$S = 366 \text{ m} \times 49 \text{ m} + (31 \text{ m} - 15 \text{ m}) \times 366 \text{ m} \times 2$

$S = 17.934 \text{ m}^2 + 11.712 \text{ m}$

$S = 29.646 \text{ m}^2$

cca. $S_{\text{STRANICA}} = 5.856 \text{ m}^2$

cca. $S_{\text{PALUBA}} = 17.934 \text{ m}^2$

cca. $S_{\text{VSE}} = 29.646 \text{ m}^2$

cca.

cca. $\text{Cena} = S_{\text{VSE}} \times \frac{30 \text{ €}}{\text{m}^2}$

$\text{Cena} = 29.646 \text{ m}^2 \times \frac{30 \text{ €}}{\text{m}^2}$

cca. $\text{Cena} = 889.380 \text{ €}$

1.5.4 Cena vodikovega rezervoarja tipa III

$$V_{\text{SKUPAJ}} = 11.356,2 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{REZERVOAR}} = 6,5 \text{ m}^3$$

$$\text{cca. } \text{Cena}_{\text{REZERVOAR}} = 12.000 \text{ €}$$

$$n_{\text{REZERVOAR}} = \frac{V_{\text{SKUPAJ}}}{V_{\text{REZERVOAR}}}$$

$$n_{\text{REZERVOAR}} = \frac{11.356,2 \text{ m}^3}{6,5 \text{ m}^3}$$

$$n_{\text{REZERVOAR}} = 1.747$$

$$\text{Cena}_{\text{SKUPAJ}} = \text{Cena}_{\text{REZERVOAR}} \times n_{\text{REZERVOAR}}$$

$$\text{Cena}_{\text{SKUPAJ}} = 12.000 \text{ €} \times 1.747$$

$$\text{Cena}_{\text{SKUPAJ}} = 20.965.292 \text{ €}$$

1.5.5 Cena elektromotorja

$$P = 27.281 \text{ kW}$$

$$\text{cca. } \text{Cena}_{\text{ELEKTROMOTOR}} = 500 \text{ €/kW}$$

$$\text{Cena}_{\text{SKUPAJ}} = P \times \text{Cena}_{\text{ELEKTROMOTOR}}$$

$$\text{Cena}_{\text{SKUPAJ}} = 27.281 \text{ kW} \times 500 \text{ €/kW}$$

$$\text{Cena}_{\text{SKUPAJ}} = 13.640.500 \text{ €}$$

1.5.6 Skupna cena za sistem delovanja

$Cena_{GORIVNA\ CELICA} = 16.000.000\ €$

$Cena_{ELEKTROLIZATOR} = 30.122.445\ €$

$Cena_{SONČNE\ CELICE}:$

- Fotovoltaične celice = 9.486.720 €
- Celice na osnovi ogljikovih nanovlaken = 889.380 €

$Cena_{REZERVOAR} = 20.965.292\ €$

$Cena_{ELEKTROMOTOR} = 13.640.500\ €$

-
1. $Cena_{SKUPAJ}\text{ (fotovoltaične)} = 90.214.957\ €$
 2. $Cena_{SKUPAJ}\text{ (ogljikova nanovlakna)} = 81.617.617\ €$

1.6 Analiza stroškov za trup tovarne ladje Neo-Panamax

1.6.1 Izračuni stroškov materiala in opreme

Izračun cene trupa brez pogonskega sistema lahko izračunamo na naslednji način:

1.6.1.1 Izračun stroškov jekla

Površina trupa:

- Dolžina (d): 366 metrov
- Širina (š): 49 metrov
- Višina / ugrez (v): 50 metrov

$$S = 2 \times d \times \check{s} + 2 \times d \times v$$

$$S = 2 \times 17.934 \text{ m}^2 + 2 \times 18.300 \text{ m}^2$$

$$S = 72.468 \text{ m}^2$$

Masa jekla:

- Gostota (ρ) = 7.850 kg/m³

$$m = V \times \rho$$

$$m = 1.452,96 \text{ m}^3 \times 7.850 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 11.405.736 \text{ kg}$$

Prostornina jekla:

- Povprečna debelina (pd) = 0,02 m

$$V = S \times pd$$

$$V = 72.468 \text{ m}^2 \times 0,02 \text{ m}$$

$$V = 1.452,96 \text{ m}^3$$

Cena jekla:

- Cena jekla (c) = 850 €/t

$$Cena_{JEKLO} = m \times c$$

$$Cena_{JEKLO} = 11.406 \text{ t} \times 850 \text{ €/t}$$

$$Cena_{JEKLO} = 9.695.100 \text{ €}$$

- Potrošni material (pm) = +10%

$$Cena_{KONČNA} = Cena_{JEKLO} \times (pm + 1)$$

$$Cena_{KONČNA} \approx 10.664.610 \text{ €}$$

1.6.1.2 Izračun stroškov opreme

Opremljanje trupa vključuje dodajanje različnih komponent in elementov. Ti stroški okvirno znašajo med 100 in 150 €/m²

- Povprečna cena (c) = 125 €/m²

$$Cena_{OPREMA} = S \times c$$

$$Cena_{OPREMA} = 72.468 \text{ m}^2 \times 125 \text{ €/m}^2$$

$$Cena_{OPREMA} = 9.058.500 \text{ €}$$

1.6.1.3 Skupna ocenjena cena

$$Cena_{SKUPNO} = Cena_{OPREMA} + Cena_{KONČNA}$$

$$Cena_{SKUPNO} = 9.058.500 \text{ €} + 10.664.610 \text{ €}$$

$$Cena_{SKUPNO} = 19.723.110 \text{ €}$$

1.6.2 Izračuni stroškov izdelave in montaže

Ocenjeno število ur dela za te postopke se giblje med 200.000 in 400.000 urami, povprečno 300.000 ur.

1.6.2.1 Regija z nizkimi stroški (Azija)

Urna predpostavka med 20 in 40 €/h:

- Plača (p) = 30 €/h
- Čas (t) = 300.000 h

- Stroški ladjedelnice (sld) = +15%

$$Plačilo = t \times p$$

$$Plačilo_{KONČNO} = Plačilo \times (sld + 1)$$

$$Plačilo = 300.000 \text{ h} \times 30 \text{ €/h}$$

$$Plačilo_{KONČNO} = 10.350.000 \text{ €}$$

$$Plačilo = 9.000.000 \text{ €}$$

1.6.2.2 Skupna ocena za regijo z nizkimi stroški

- Nepredvideni stroški (nps) = +5%

$$\text{Stroški} = (\text{Plačilo}_{\text{KONČNO}} + \text{Cena}_{\text{SKUPNO}}) \times (\text{nps} + 1)$$

$$\text{Stroški} = (19.723.110 \text{ €} + 10.350.000 \text{ €}) \times (0,05 + 1)$$

$$\text{Stroški} = 30.073.000 \text{ €} \times 1,05$$

$$\text{Stroški} = 31.576.650 \text{ €}$$

1.6.2.3 Regija z visokimi stroški (Evropa, S Amerika)

Urna postavka med 50 in 100€/h:

- Plača (p) = 75 €/h
- Čas (t) = 300.000 h
- Stroški ladjedelnice (sld) = +15%

$$\text{Plačilo} = t \times p$$

$$\text{Plačilo}_{\text{KONČNO}} = \text{Plačilo} \times (\text{sld} + 1)$$

$$\text{Plačilo} = 300.000 \text{ h} \times 75 \text{ €/h}$$

$$\text{Plačilo}_{\text{KONČNO}} = 25.875.000 \text{ €}$$

$$\text{Plačilo} = 22.500.000 \text{ €}$$

1.6.2.4 Skupna ocena za regijo z visokimi stroški

- Nepredvideni stroški (nps) = +5%

$$\text{Stroški} = (\text{Plačilo}_{\text{KONČNO}} + \text{Cena}_{\text{SKUPNO}}) \times (\text{nps} + 1)$$

$$\text{Stroški} = (19.723.110 \text{ €} + 25.875.000 \text{ €}) \times (0,05 + 1)$$

$$\text{Stroški} = 45.598.110 \text{ €} \times 1,05$$

$$\text{Stroški} = 46.891.860 \text{ €}$$

1.7 Ocenjena nakupna cena ladje

- Trup ladje z opremo:
 - Regija z nizkimi stroški (rn): 31.576.650 €
 - Regija z visokimi stroški (rv): 46.891.860 €
- Pogonski sistem:
 - Fotovoltaične celice(fc): 90.214.957 €
 - Celice na osnovi karbonski vlaken (kc): 81.617.617 €

$$Cena_{SPODNJA} = rn + kc$$

$$Cena_{SPODNJA} = 31.576.650 \text{ €} + 81.617.617 \text{ €}$$

$$Cena_{SPODNJA} = 113.194.267 \text{ €}$$

$$Cena_{ZGORNJA} = rv + fc$$

$$Cena_{ZGORNJA} = 46.891.860 \text{ €} + 90.214.957 \text{ €}$$

$$Cena_{ZGORNJA} = 137.106.817 \text{ €}$$

Zaključek

V tej tehnični knjigi smo predstavili celovit projekt ladje na vodik, osredotočen na transformacijo tovornih ladij. Temeljito smo analizirali ključne komponente, kot so vodikove gorivne celice, elektrolizatorji, vodikovi rezervoarji tipa III, sončne celice na osnovi ogljikovih nanovlaken ter elektromotorji. Poudarili smo prednosti, kot so visoka učinkovitost, okolju prijazna proizvodnja energije in povečana avtonomija plovil. Uporaba teh naprednih tehnologij omogoča zmanjšanje emisij škodljivih plinov ter izboljšanje energetske učinkovitosti, kar je ključno za trajnostni razvoj pomorskega sektorja.

Prehod tovornih ladij na vodikovo gorivo predstavlja pomemben korak k čistejšemu in bolj trajnostnemu pomorskemu transportu. Implementacija inovativnih rešitev iz tega projekta lahko bistveno prispeva k zmanjšanju okoljskega odtisa globalne logistike. Naš projekt ladje na vodik ponuja perspektivno in trajnostno rešitev, ki lahko pozitivno vpliva na globalno okolje in prispeva k bolj trajnostni prihodnosti v pomorski industriji.

Kazalo slik

Slika 1: Shema sistema ladijskega delovanja	6
Slika 2: Shema gorivne celice	7
Slika 3: Shema PEM elektrolizatorja - Hysata	8
Slika 4: Shema Vodikovega rezervoarja tipa III	9
Slika 5: Shema sončnic celic na osnovi ogljikovih nanovlaken - NovaSolix	9
Slika 6: 3D shema principa I - Harmonika	10
Slika 7: 3D shema principa II - Ribja kost	10
Slika 8: Shema delovanja elektromotorja	11

Viri

[Vrste tovornih ladij \(27.5.2024\)](#)
[Velikosti tovornih ladij tipa Panamax \(27.5.2024\)](#)
[Panamax in Neopanamax \(27.5.2024\)](#)
[Opis delovanja vodikove gorivne celice \(28.5.2024\)](#)
[Opis in primerjava vodikovih tankov \(28.5.2024\)](#)
[Hysata original spletna stran \(1.6.2024\)](#)
[NovaSolix originalna spletna stran \(1.6.2024\)](#)
[NovaSolix opis delovanja sončne celice \(1.6.2024\)](#)
[Opis delovanja električnega motorja \(6.6.2024\)](#)
[Podatki o porabi goriva in opis tanka \(31.7.2024\)](#)
[Moč motorja New Panamax \(31.7.2024\)](#)
[Podatki o gorivnem olju \(31.7.2024\)](#)
[Fizikalne lastnosti gorivnega olja \(31.7.2024\)](#)
[Cena fotovoltaične celice \(27.7.2024\)](#)
[Cena celice na osnovi karbonskih nanovlaken \(27.7.2024\)](#)
[Cena sklopa vodikovih gorivnih celic 1MW \(29.7.2024\)](#)
[Cena vodikovega rezervoarja tipa III \(29.7.2024\)](#)
[Cena elektrolizatorja \\$/kW \(29.7.2024\)](#)
[Cena elektromotorja \\$/kW \(29.7.2024\)](#)
[Cena jekla \(1.8.2024\)](#)
[Debelina trupa \(1.8.2024\)](#)

Viri slik

Slika 1: Maks Zagode ročno risanje

Slika 2: https://www.3m.com/3M/en_US/hydrogen-technology-us/applications/fuel-cells/ - prevedel Maks Zagode

Slika 3: <https://voteclimateone.org.au/efficient-electrolysis-makes-hydrogen-economy-look-good/> - prevedel Maks Zagode

Slika 4: <https://didionvessel.com/hydrogen-storage-tanks/> - prevedel Maks Zagode

Slika 5: <https://www.solarfabric.com/a-90-efficient-solar-panel/> - prevedel Maks Zagode

Slika 6: Anton Mlinar 3D modeliranje

Slika 7: Anton Mlinar 3D modeliranje

Slika 8: <https://www.powerelectronicstips.com/basics-ac-motors-and-their-applications-faq/> - prevedel Maks Zagode