



Srednja šola Slovenska Bistrica
Ulica dr. Jožeta Pučnika 21, 2310 Slovenska Bistrica

Raziskovalna naloga

VODIK KOT POGONSKO GORIVO

Raziskovalno področje: kemija in kemijska tehnologija

Mentorica: mag. Damijana GREGORIČ

Avtor: Žiljen TOPOLŠEK

Slovenska Bistrica, februar 2024

Kazalo vsebine

1	UVOD.....	7
1.1	NAMEN IN CILJ RAZISKOVALNEGA DELA	7
1.2	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE RAZISKOVALNEGA DELA	7
1.3	HIPOTEZE.....	8
2	TEORETIČNI DEL	9
2.1	OSNOVNA NAČELA ELEKTROLIZE VODE	9
2.1.1	<i>Vrste elektrolitov</i>	<i>12</i>
2.1.2	<i>Kemijski zapis elektrolize</i>	<i>12</i>
2.2	PREGLED OBSTOJEČE LITERATURE IN TEORIJ NA TEMO VODIKA KOT POGONSKEGA GORIVA	13
2.2.1	<i>Emisije pogonskih goriv</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Polnilna infrastruktura za vodik v Sloveniji</i>	<i>15</i>
2.2.3	<i>Avtomobili na vodik</i>	<i>15</i>
3	EKSPERIMENTALNI DEL.....	17
3.1	OPIS OPREME IN NEODVISNIH SPREMENLJIVK	17
3.2	OPIS POSTOPKOV ZA PRIDOBIVANJE VODIKA	20
4	REZULTATI Z RAZPRAVO	21
4.1	REZULTATI EKSTRAKCIJE VODIKA	21
4.2	PRIHODNOST ELEKTROLIZE IN VODIKA KOT POGONSKEGA SREDSTVA	27
4.2.1	<i>Moderni pristopi elektrolize</i>	<i>27</i>
4.2.2	<i>Potencial vodika v prihodnosti</i>	<i>28</i>
5	ZAKLJUČEK	31
6	SEZNAM LITERATURE IN VIROV.....	38

Kazalo slik

SLIKA 1: SHEMA VODIKOVEGA ATOMA	9
SLIKA 2: DELOVANJE ELEKTROLIZERJA	10
SLIKA 3: NOTRANJA ZGRADBA ELEKTROLIZERJA S POLIMERNO ELEKTRONSKO MEMBRANO	11
SLIKA 4: EMISIJE AVTOMOBILOV FOSILNIH GORIV IN ELEKTRIKE.....	14
SLIKA 5: SLIKA PRIKAŽUJE, KOLIKO ELEKTRIKE PROIZVEDEJO POSAMEZNE ELEKTRARNE	14
SLIKA 6: VODIKOVA POLNILNICA V LESCAH	15
SLIKA 7: AVTOMOBIL NAMX HUV	16
SLIKA 8: OSNOVNI PRIPOMOČKI ZA PRIPRAVO POSODE	18
SLIKA 9: POTREBNI ELEMENTI ZA PRIPRAVO ELEKTROLITA IN IZVEDBO EKSPERIMENTA...	18
SLIKA 10: POSTAVITEV SISTEMA ZA EKSPERIMENT	19
SLIKA 11: NABIRANJE VODIKA (NA DESNI) IN KISIKA (NA LEVI)	20

Kazalo grafov

GRAF 1: KOLIČINA H_2 (ML) V ODVISNOSTI OD ČASA	23
GRAF 2: KOLIČINA O_2 (ML) V ODVISNOSTI OD ČASA	24
GRAF 3: IZLOČENA KOLIČINA VODIKA IN KISIKA	26

Kazalo tabel

TABELA 1: REZULTATI EKSPERIMENTA	21
--	----

Povzetek

V raziskavi sem preučeval trajnost goriv s poudarkom na vodiku kot pogonskem gorivu in pridobivanje vodika z elektrolizo. Spoznal sem osnovna načela elektrolize, torej kako elektroliza deluje, kaj je potrebno za uspešno izvedbo eksperimenta in kakšno je učinkovito izločanje plinov v odvisnosti od napetosti baterije, vrste vode in elektrolita.

Raziskava se osredotoča na pridobivanje vodika kot alternativnega pogonskega goriva z elektrolizo vode. Teoretični del pokriva osnovna načela elektrolize, vlogo elektrolitov in varnostne ukrepe pri ravnanju z vodikom. Prav tako je obravnavana uporaba vodika v avtomobilski industriji in primerjava emisijskih učinkov vodikovih vozil z vozili na fosilna goriva in električno energijo.

Eksperiment je bil izveden z uporabo različnih elektrolitov (kis in morska sol), dveh vrst baterij (9-voltna in 36-voltna) ter dveh vrst vode (voda iz pipe in destilirana) za pridobivanje vodika. Rezultati so pokazali, da koncentracija elektrolita in moč baterije pomembno vplivata na hitrost izločanja vodika. Večji volumen elektrolita in uporaba močnejše baterije sta povečala hitrost proizvodnje vodika.

Rezultati so potrdili teoretično pričakovanje, da se med elektrolizo proizvede dvakrat več vodika kot kisika, čeprav so bili podatki v nekaterih primerih nepričakovani, kar je mogoče pripisati omejitvam izvedbe eksperimenta doma.

Raziskava je potrdila večino hipotez, vključno s predpostavko, da uporaba destilirane vode in močnejše baterije vodi do hitrejšje proizvodnje vodika. Izpostavljeno je bilo, da je za natančnejšo analizo treba upoštevati več dejavnikov, kot sta čistost vode in učinkovitost elektrod.

Ključne besede: vodik, elektroliza, alternativna goriva, vodikova energija, elektroliti, obnovljivi viri energije, pogonska goriva, okoljska trajnost, proizvodnja vodika

Abstract

In this research, I examined sustainable fuels with an emphasis on hydrogen as a propulsion fuel and the production of hydrogen through electrolysis. I learned the basic principles of electrolysis, i.e., how electrolysis works, what is necessary for the successful execution of an experiment, and the efficiency of gas extraction depending on the battery voltage, type of water, and electrolyte.

The study focuses on the production of hydrogen as an alternative propulsion fuel through the electrolysis of water. The theoretical part covers the basic principles of electrolysis, the role of electrolytes, and safety measures in handling hydrogen. The use of hydrogen in the automotive industry and the comparison of emission effects of hydrogen vehicles with fossil fuel vehicles and electric energy are also discussed. The experiment was conducted using different electrolytes (acid and sea salt), two types of batteries (9-volt and 36-volt), and two types of water (tap water and distilled) for hydrogen production. The results showed that the electrolyte concentration and battery power significantly affect the rate of hydrogen extraction. A larger volume of electrolyte and the use of a stronger battery increased the rate of hydrogen production.

The results confirmed the theoretical expectation that twice as much hydrogen as oxygen is produced during electrolysis, although the data were unexpected in some cases, which may be attributed to the limitations of conducting the experiment at home.

The research confirmed most of the hypotheses, including the assumption that the use of distilled water and a stronger battery leads to faster hydrogen production. It was highlighted that for a more accurate analysis, it is necessary to consider several factors, such as water purity and electrode efficiency.

Keywords: Hydrogen, Electrolysis, Alternative Fuels, Hydrogen Energy, Electrolytes, Renewable Energy Sources, Propulsion Fuels, Hydrogen Production

Seznam okrajšav

AEM	Alkalna izmenjevalna membrana
APU	Pomožna energijska enota
CHP	Sistem za kombinirano toploto in energijo
EU	Evropska unija
EV	Električno vozilo
FCHEV	Hibridno električno vozilo na gorivne celice
HFCV	Vozilo na vodikove gorivne celice
ICE	Motor z notranjim zgorevanjem
KM	Konjska moč
kW	Kilovatna ura
SOE	Trdni oksidni elektrolit
PEM	Polimerna elektrolitska membrana
pH	Koncentracija oksonijevih ionov v raztopini

1 UVOD

Trajnost je opredeljena kot sposobnost izpolnjevanja potreb sedanje generacije, ne da bi pri tem ogrožali zmožnost prihodnjih generacij, da zadovoljijo svoje lastne potrebe. Trajnost je ena izmed glavnih usmeritev, h katerim teži Evropska unija. V Evropi osebni avtomobili še vedno proizvedejo kar 12 % več emisij ogljikovega dioksida, transportna vozila pa še dodatnih 20 % [1]. V Evropi se trudimo zmanjšati emisije toplogrednih plinov, kar lahko dosežemo tudi z uporabo alternativnih virov energije (kot je vodik). Evropska komisija stremi k temu, da bodo vsi novi avtomobili in dostavna vozila, registrirana v Evropi, do leta 2035 brez emisij. Kot vmesni korak proti ničnim emisijam bodo novi standardi CO₂ zahtevali tudi, da povprečne emisije novih avtomobilov do leta 2030 padejo za 55 %, pri novih dostavnih vozilih pa za 50 % do leta 2030. Ta dogovor predstavlja prvi korak pri sprejetju zakonodajnih predlogov Pripravljeni na 55, ki jih je Komisija predložila julija 2021 [2].

1.1 Namen in cilj raziskovalnega dela

Namen raziskovalne naloge z naslovom Vodik kot pogonsko gorivo je, da odkrijemo, ali lahko in kako lahko iz doma dostopnih sestavin pridobimo vodik. To bomo poskušali izvesti tako, da bomo na osnovi iskanja informacij na spletu in znanja, pridobljenega v šoli, pripravili osnove za izvedbo elektrolize in pridobivanja vodika.

Glavni cilj raziskovalnega dela je pridobiti vodik iz vode. Cilji, ki sledijo iz glavnega cilja, pa so:

- Ugotoviti, kako pridobiti čim več vodika iz vode.
- Ugotoviti, ali vrsta elektrolita vpliva na hitrost pridobivanja vodika.
- Ugotoviti, ali moč baterije vpliva na hitrost pridobivanja vodika in kisika.

1.2 Predpostavke in omejitve raziskovalnega dela

Pri izdelavi raziskovalnega dela predpostavljam, da bo voda iz vodovoda enaka ne glede na to, kje jo bomo vzeli (na primer voda iz kleti bo enaka kot voda iz kuhinje) in da bodo vse grafitne paličice imele enako koncentracijo grafita.

Omejitev te raziskovalne naloge pa je bil način izvedbe eksperimenta, saj sem imel na razpolago omejeno opremo (opisano v podpoglavju 3.1 Opis opreme in neodvisnih spremenljivk).

1.3 Hipoteze

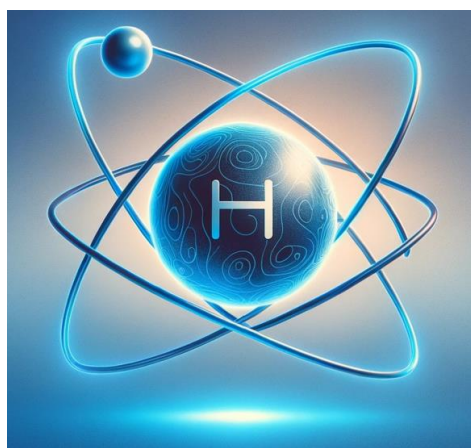
Postavil sem naslednje hipoteze, ki jih bom poskušal potrditi ali ovreči:

- Hipoteza 1: Uporaba očetne kisline kot elektrolita bo povzročila hitrejše pridobivanje vodika kot raztopina NaCl.
- Hipoteza 2: Uporaba destilirane vode bo povzročila hitrejše pridobivanje vodika kot voda iz pipe.
- Hipoteza 3: Uporaba močnejše baterije bo povzročila hitrejše izločanje vodika.
- Hipoteza 3: Pri reakciji se bo proizvedlo dvakrat več vodika kot kisika.
- Hipoteza 4: Večja količina elektrolita bo povzročila hitrejše izločanje vodika.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Osnovna načela elektrolize vode

Vodik (H_2) je vnetljiva plinasta snov brez barve, brez vonja in brez okusa, ki je najenostavnejši član družine kemijskih elementov. Atom vodika ima jedro, ki sestoji iz pozitivnega protona in negativnega elektrona. Pri običajnih pogojih je vodik v plinastem stanju, a ga lahko spravimo tudi v tekoče agregatno stanje pri zelo nizki temperaturi ($-252,87\text{ }^{\circ}\text{C}$). [3] Vodik je prisoten skoraj povsod na Zemlji, a največjo količino vodika nam predstavlja voda, ki ima kemično formulo H_2O . [3] Ena najbolj opaznih kemičnih lastnosti vodika je njegova reakcija s kisikom pri gorenju, pri čemer nastane voda. To reakcijo imenujemo tudi zgorevanje. Ime elementa izvira iz grških besed, ki pomenijo »tvorec vode«. Ker voda pokriva približno 71 % površine Zemlje, je glavni vir za pridobivanje vodika. [4]

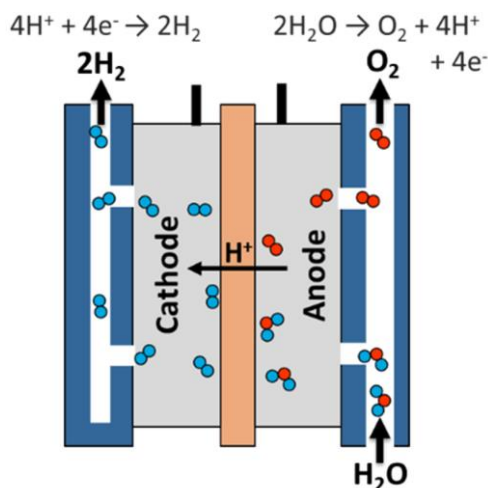


Slika 1: Shema vodikovega atoma

Vir: Ta slika je bila oblikovna s pomočjo DALL-E 3

Elektroliza je obetavna možnost za proizvodnjo vodika brez izpustov ogljika iz obnovljivih in jedrskih virov. Elektroliza je proces uporabe električne energije za razgradnjo vode na vodik in kisik. Ta reakcija poteka v napravi, ki se imenuje elektrolizer. Elektrolizerji se lahko po velikosti gibljejo od majhnih, velikosti gospodinjskih aparatov, ki so primerni za majhno merilo razpršene proizvodnje vodika, do obsežnih, osrednjih proizvodnih obratov, ki bi lahko bili neposredno povezani z obnovljivimi ali drugimi oblikami proizvodnje električne energije, ki ne

sproščajo toplogrednih plinov. Podobno kot gorivne celice so elektrolizerji sestavljeni iz anode in katode, ki ju ločuje elektrolit. Različni elektrolizerji delujejo na različne načine, predvsem zaradi različnih vrst materialov elektrolitov, ki so vključeni, in ionskih vrst, ki jih prevajajo. [5]



Slika 2: Delovanje elektrolizerja

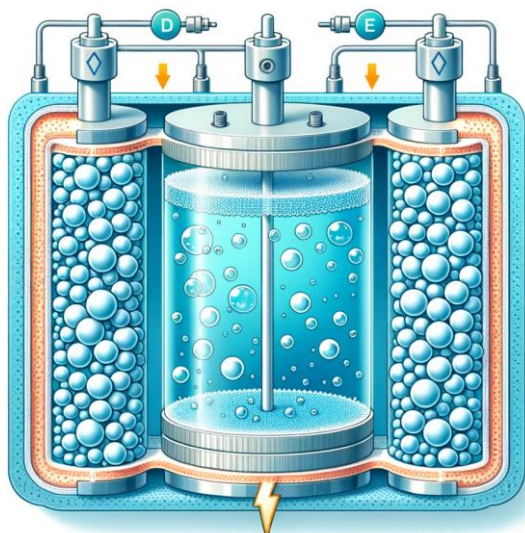
Vir: [5]

Voda reagira na anodi in tvori kisik ter pozitivno nabite vodikove ione (protoni). Elektroni tečejo skozi zunanje vezje, vodikovi ioni pa selektivno prehajajo čez PEM (Polimerna elektrolitska membrana) do katode. Na katodi se vodikovi ioni združijo z elektroni iz zunanjega vezja in tvorijo vodikov plin.

Reakcija na anodi: $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$

Reakcija na katodi: $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$. [5]

Tako kot gorivne celice so tudi elektrolizerji sestavljeni iz anode in katode, ločeni z elektrolitom. Različni elektrolizatorji delujejo na različne načine, predvsem zaradi različne vrste uporabljenega elektrolitskega materiala in ionskih vrst, ki jih prevajajo. Najpogosteje se uporabljajo tri vrste elektrolizerjev (membranski elektrolizerji s polimernim elektrolitom, alkalni elektrolizatorji in trdni oksidni elektrolizerji). [5]



Slika 3: Notranja zgradba elektrolizerja s polimerno elektronsko membrano

Vir: Ta slika je bila oblikovana s pomočjo DALL-E 3

Alkalni elektrolizerji delujejo s transportom hidroksidnih ionov (OH^-) skozi elektrolit od katode do anode, pri čemer se vodik proizvaja na strani katode. Elektrolizerji, ki uporabljajo tekočo alkalno raztopino natrijevega ali kalijevega hidroksida kot elektrolit, so komercialno dostopni že vrsto let. Novejši pristopi, ki uporabljajo trdne alkalne izmenjevalne membrane (AEM) kot elektrolit, kažejo obetajoče rezultate na laboratorijski ravni. Elektrolizerji s trdnim oksidom uporabljajo trdno keramično snov kot elektrolit, ki selektivno prevaja negativno nabite kisikove ione (O_2^-) pri povišanih temperaturah, proizvajajo vodik na nekoliko drugačen način [5]:

- Para na katodi se kombinira z elektroni iz zunanje vezja in tvori vodikov plin ter negativno nabite kisikove ione.
- Kisikovi ioni prehajajo skozi trdno keramično membrano in reagirajo na anodi, da tvorijo kisikov plin in proizvajajo elektrone za zunanje vezje.
- Elektrolizerji s trdnim oksidom morajo delovati pri temperaturah, ki so dovolj visoke, da trdne oksidne membrane pravilno delujejo (približno $700\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$, v primerjavi z elektrolizerji PEM, ki delujejo pri $70\text{--}90\text{ }^\circ\text{C}$, in komercialnimi alkalnimi elektrolizerji, ki običajno delujejo pri manj kot $100\text{ }^\circ\text{C}$).
- Napredni laboratorijski elektrolizerji s trdnim oksidom na osnovi keramičnih elektrolitov, ki prevajajo protone, kažejo obet za znižanje delovne temperature na $500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$. Elektrolizerji s trdnim oksidom lahko učinkovito uporabljajo toploto, ki je na voljo pri teh povišanih temperaturah (iz različnih

virov, vključno z jedrsko energijo), da zmanjšajo količino električne energije, potrebne za proizvodnjo vodika iz vode.

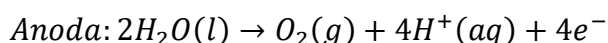
2.1.1 Vrste elektrolitov

Pri elektrolizi vode se uporabljajo različne vrste elektrolitov, ki se razlikujejo glede na vrsto elektrolizne celice. Glavne vrste elektrolitov so:

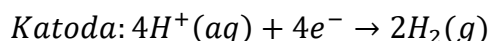
- **Alkalni elektroliti:** Običajno so to vodne raztopine natrijevega hidroksida (NaOH) ali kalijevega hidroksida (KOH). Alkalni elektrolizerji so bili prvi komercialno uporabljeni in so še vedno zelo razširjeni.
- **Polimerna elektrolitska membrana (PEM):** To so trdne polimerne membrane, ki prevajajo pozitivno nabite vodikove ione (protoni). Elektrolizerji PEM so znani po svoji sposobnosti, da delujejo pri relativno nižjih temperaturah in pod visokim tlakom.
- **Trdni oksidni elektroliti (SOE):** Uporabljajo trdno keramično elektrolitsko membrano, ki prevaja negativno nabite kisikove ione. Elektrolizerji SOE delujejo pri zelo visokih temperaturah, kar izboljša energetske učinkovitost, vendar pa so zahteve za material in vzdrževanje veliko strožje zaradi visokih delovnih temperatur.
- **Alkalne izmenjevalne membrane (AEM):** Podobne so membranam PEM, vendar prevajajo negativno nabite hidroksidne ione. Elektrolizerji AEM predstavljajo kompromis med alkalnimi in sistemi PEM, ki še vedno delujejo pri nižjih temperaturah, vendar z manj agresivnimi elektroliti.

2.1.2 Kemijski zapis elektrolize

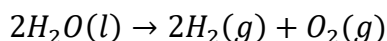
Na anodi poteka oksidacija vode, kjer se voda razgradi na kisik in vodikove ione, pri čemer se sproščajo elektroni:



Na katodi poteka redukcija, kjer vodikovi ioni pridobijo elektrone in tvorijo vodik v plinastem agregatnem stanju:



Ko se obe združita, dobimo celotno reakcijo elektrolize vode:

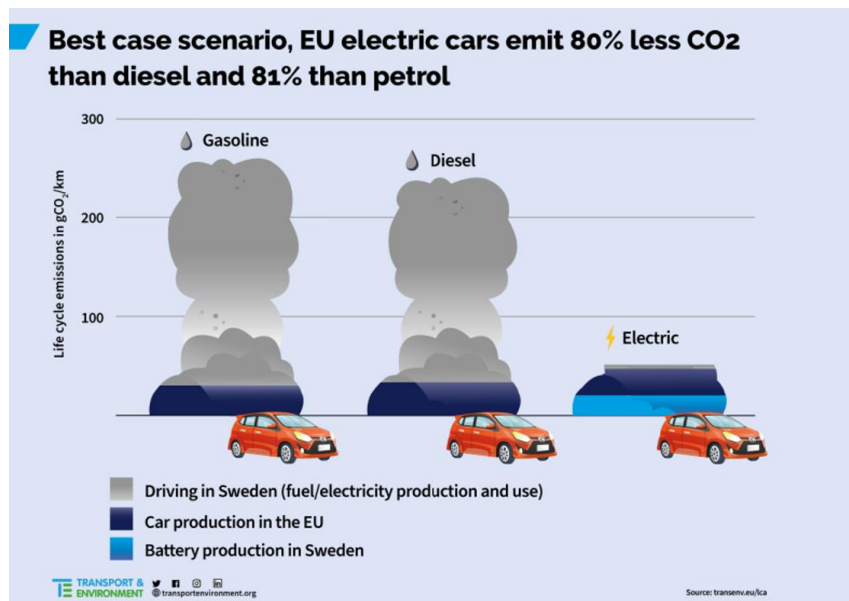


2.2 Pregled obstoječe literature in teorij na temo vodika kot pogonskega goriva

2.2.1 Emisije pogonskih goriv

Bencinski motorji proizvedejo 2,3 kg CO₂ na liter porabljenega bencina, kar je sicer boljše kot 2,7 kg CO₂ na liter porabljenega dizla, ampak še zmeraj preveč onesnažujoče za čas, ko na Zemlji prebiva približno 8 milijard ljudi, od katerih ima cestno vozilo, ki ni kolo, približno 1,4 milijarde ljudi. [6]

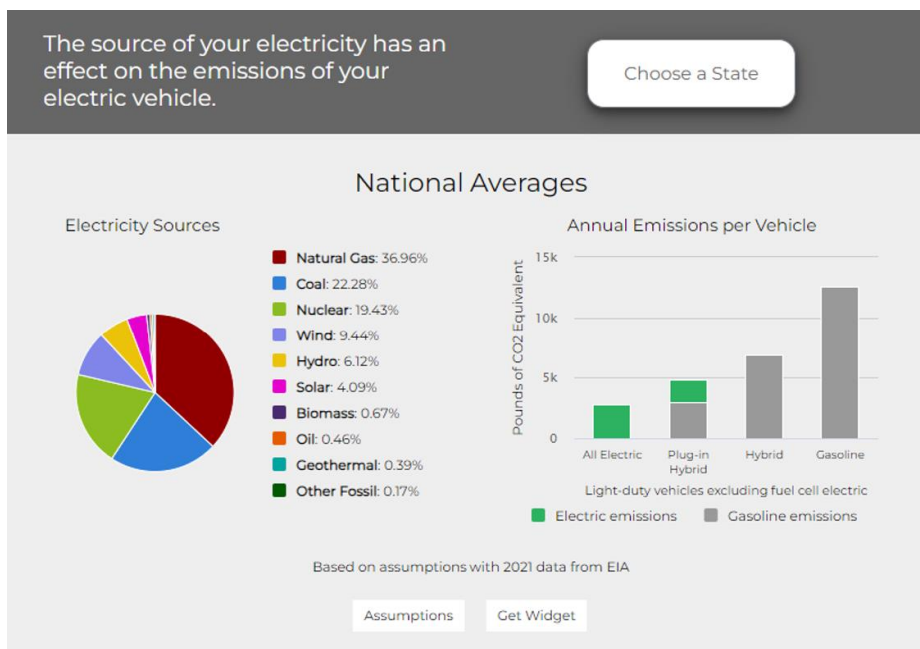
Električna vozila (EV) se nam sprva zdijo veliko bolj naravi prijazna, a je resnica daleč od tega. Kritiki hitrega uvajanja električnih vozil pravilno trdijo, da je njihova emisija pri vходу v tovarno (tj. CO₂, ki se sprošča med proizvodnjo) višja kot pri standardnih bencinskih in dizelskih avtomobilih. Nato je treba dodati emisije lokalnega električnega omrežja, ki polni električno vozilo. Toda številke za temi izračuni se nenehno spreminjajo. Eoin Bannon iz organizacije Transport and Environment opisuje ugotovitve njihovega novega orodja, ki uporablja ažurne podatke o celotnih emisijah EV. Orodje preučuje današnjo intenzivnost ogljika pri proizvodnji električne energije v različnih državah in hkrati napredek pri proizvodnji baterij z nizkimi emisijami. Tudi v najslabšem primeru zdaj električno vozilo, proizvedeno na Kitajskem in uporabljeno na Poljskem, oddaja 22 % manj CO₂ kot dizelsko gorivo in 28 % manj kot bencin. Na drugem koncu spektra električno vozilo in baterija, proizvedena na Švedskem in uporabljena na Švedskem, lahko oddajata do 80 % manj CO₂ kot dizelsko gorivo in 81 % manj kot bencin. Povprečno električni avtomobili v EU oddajajo skoraj trikrat manj CO₂. [7]



Slika 4: Emisije avtomobilov fosilnih goriv in elektrike

Vir: [7]

Električni avtomobili v Evropi oddajo v povprečju skoraj trikrat manj CO₂ kot enakovredni bencinski ali dizelski avtomobili. To je skladno z novim spletnim orodjem, ki ga je razvila organizacija T&E in javnosti omogoča primerjavo celotnih emisij EV z vozili na fosilna goriva. [7]



Slika 5: Slika prikazuje, koliko elektrike proizvedejo posamezne elektrarne

Vir: [8]

Zaradi njihove visoke učinkovitosti in delovanja z ničelnimi ali skoraj ničelnimi emisijami imajo vodik in gorivne celice potencial za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov v mnogih aplikacijah. Največji izziv pri proizvodnji vodika, še posebej iz obnovljivih virov, je zagotavljanje vodika po nizki ceni. [9]

2.2.2 Polnilna infrastruktura za vodik v Sloveniji

Na Petrolovem bencinskem servisu v Lescah stoji prva polnilnica s stisnjenim vodikom v Sloveniji. Projekt vodikove polnilnice je v današnji fazi še demonstracijskega značaja, zato je njeno delovanje primarno namenjeno pridobivanju izkušenj pri gradnji potrebne infrastrukture za javno oskrbo z vodikom v cestnem prometu. Partnerji tako pomagajo vzpostaviti učeče okolje za celotno državo in s tem oblikovati zakonodajni okvir za nadaljnjo gradnjo ter širitev novih tehnologij. Postavitev polnilnice, v vrednosti nekaj manj kot pol milijona evrov, je sofinancirana s sredstvi Evropskega sklada za regionalni razvoj. [1]



Slika 6: Vodikova polnilnica v Lescah

Vir: [1]

2.2.3 Avtomobili na vodik

Vozilo na vodikove gorivne celice (kratko HFCV) uporablja enak tip električnega motorja za vrtenje koles, kot ga uporabljajo baterijsko-električni avtomobili. Vendar ga ne poganja velika, težka baterija, temveč gorivni sklop, v katerem čisti vodik (H_2) prehaja skozi membrano, da se kombinira s kisikom (O_2) iz zraka, pri čemer proizvaja elektriko, ki poganja kolesa in poleg tega ustvarja vodno paro. Avtomobili

na vodik, čeprav enako, če ne bolj okolju prijazni kot avtomobili na elektriko, se niso tako razvili in zato obstaja le majhno število avtomobilskih podjetij, ki so se lotili tega izziva. Od leta 2015 so bila na prodaj ponujena tri vozila na vodikove gorivne celice od treh različnih avtomobilskih podjetij: Honda Clarity Fuel Cell, Hyundai Nexo SUV in Toyota Mirai. [10] Najnovejše in najrazvitejše podjetje na območju je NamX z najnovejšim prototipom NamX HUV. NamX HUV je bil prvič predstavljen maja 2022 v Italiji in oktobra na Pariškem avtomobilskem salonu 2022. HUV ima posebnost ponujanja zamenljivih vodikovih rezervoarjev. Šest zamenljivih vodikovih rezervoarjev je dodanih h glavnemu rezervoarju in zagotavlja doseg 800 kilometrov. Ta sistem omogoča enostavno zamenjavo šestih snemljivih rezervoarjev na postaji, brez ponovnega polnjenja glavnega rezervoarja, saj so servisne postaje za vodik redke. [11]



Slika 7: Avtomobil NamX HUV

Vir: [12]

3 EKSPERIMENTALNI DEL

V tem poglavju bom predstavil strukturo raziskave in postopek dela. Najprej bom opisal opremo, neodvisne spremenljivke in postopek eksperimenta.

3.1 Opis opreme in neodvisnih spremenljivk

Raziskovalna naloga temelji na eksperimentiranju z elektrolizo ob spreminjanju različnih spremenljivk. Za raziskovalno nalogo sem tako uporabil opremo, katere opis podajam v nadaljevanju.

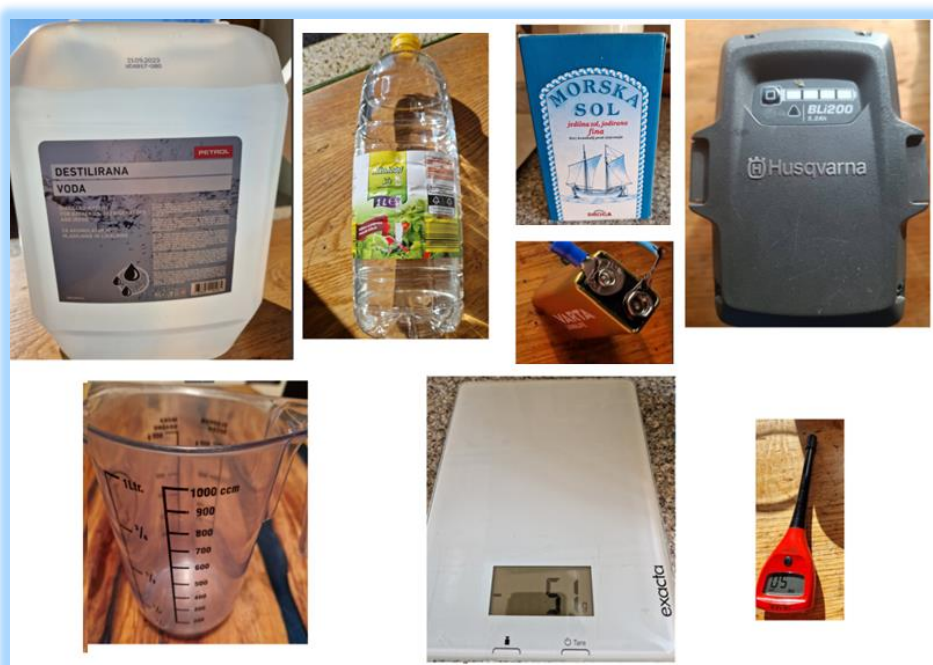
Najprej sem pripravil posodo, v kateri bom izvedel eksperiment. Posodo sem pripravil sam tako, da sem z vrtalnikom najprej v dno izvrtal dve luknji, v kateri sem namestil (in zalepil s sekundnim lepilom) dve grafitni palčki. Grafitni palčki sem kupil v trgovini s pisarniškim materialom. Gre za debelejšše (2 mm) »minice« za svinčnik. Ko sem grafitni palčki vstavil in ju zalepil ter tako preprečil tudi iztekanje tekočine, sem poskrbel, da sta palčki na dnu posode gledali ven, da sem lahko potem na njiju pritrdil žici, ki sta povezani z virom napetosti. Vse to skupaj je predstavljalo prvi del priprave eksperimenta.

Za izvedbo eksperimenta sem potreboval še vodo iz pipe in destilirano vodo, elektrolit (9 % alkoholni kis in sol), vir energije (36 V baterija in 9 V baterija), merilno posodo in tehtnico ter pH-meter. Na naslednjem kolažu slik (združene slike) prikazujem elemente, potrebne za izvedbo eksperimenta.



Slika 8: Osnovni pripomočki za pripravo posode

Vir: Lasten vir



Slika 9: Potrebni elementi za pripravo elektrolita in izvedbo eksperimenta

Vir: Lasten vir

V okviru eksperimenta sem tako uporabil naslednje materiale in reagente:

- Voda iz pipe: Uporabljena kot primarni vir za elektrolizo.
- Destilirana voda: Za preverjanje vpliva vrste vode na učinkovitost elektrolize.
- Grafitne elektrode: Služijo kot anoda in katoda v elektroliznem procesu.
- Dve žici: Služita za povezovanje vira napetosti in grafitnih minic.
- Alkoholni kis (9 % očetna kislina): Uporabljen kot ena izmed vrst elektrolitov.
- Morska sol (NaCl): Druga vrsta elektrolita za primerjavo učinkovitosti.
- 9-voltna in 36-voltna baterija: Kot viri energije za elektrolizo.
- pH-meter: Za merjenje vrednosti pH-raztopine.
- Injekcijske brizge: Za zajem in merjenje volumna proizvedenega vodika in kisika (uporabil sem tri različne velikosti, za čim natančnejše meritve manjših količin).
- Merilna posoda: Za določanje količine tekočin.
- Tehnica: Za natančno tehtanje soli pri pripravi elektrolize raztopine.

Z uporabo teh materialov in reagentov sem izvedel vrsto eksperimentov za pridobivanje vodika z elektrolizo, pri čemer sem spreminjal različne parametre, kot so vrsta vode, vrsta in koncentracija elektrolita ter moč uporabljene baterije.

Na naslednji fotografiji prikazujem, kako sem sestavil vse omenjene materiale in reagente.



Slika 10: Postavitev sistema za eksperiment

Vir: Lasten vir

3.2 Opis postopkov za pridobivanje vodika

Najprej sem vzel plastično posodo in vanjo z vrtalnim strojem zvrtil dve luknji. Potem sem v luknji vstavil dve grafitni elektrodi. Grafitni elektrodi sem za tem zlepil s posodo in s tem preprečil odtekanje vode. Ko se je lepilo posušilo, sem v posodo najprej nalil 1,5 litra vode iz pipe (vodovod) in si pripravil injekcijske brizge (ki sem jih na vrhu zalepil, da plin ne bi uhajal) za ujemanje vodika in kisika. Preden sem v injekcijski brizgi zajel vodo (ker če tega ne bi storil, bi bil v brizgi zrak iz okolice, tako pa sem zajel vodo z elektrolitom, ki ga je potem plin izpodrival), sem moral v posodo dodati elektrolit, ki je bil v prvem poskusu kis (9 % očetna kislina). Prvič sem dodal 150 ml in drugič 300 ml. Potem sem vse skupaj zmešal, v injekcijski brizgi zajel zmes vode in kisa in ju položil čez elektrodi tako, da zraven ni prišel kak drugi plin. Nato sem izmeril pH in nazadnje priključil na grafitni elektrodi 9-voltno baterijo. Vodik se je nabiral na negativno nabiti elektrodi (katodi) in kisik na pozitivno nabiti (anodi).



Slika 11: Nabiranje vodika (na desni) in kisika (na levi)

Vir: Lasten vir

Meritve sem izvajal 10 minut, in sicer tako, da sem v intervalih po 2,5 minut zapisal v tabelo. Zatem sem zamenjal 9-voltno baterijo za 36-voltno in kar hitro naletel na problem s prostornino brizge za vodik, ki se je nabiral »prehitro«, zato sem uporabil večjo injekcijsko brizgo. Postopek sem tako ponavljal, le da sem spreminjal vrsto vode, elektrolit in njegovo količino.

4 REZULTATI Z RAZPRAVO

Cilj naloge je povezan s pridobivanjem vodika s pomočjo elektrolize vode in različnih elektrolitov. Tako bom v okviru tega poglavja najprej predstavil rezultate eksperimentalnega dela, nato pa bom predstavil rezultate pregleda prihodnjega razvoja uporabe vodika kot pogonskega sredstva.

4.1 Rezultati ekstrakcije vodika

V nadaljevanju podajam rezultate najprej v tabeli 1, nato pa v grafih. V tabeli 1 prikazujem podatke za pridobivanje vodika in kisika s pomočjo elektrolize.

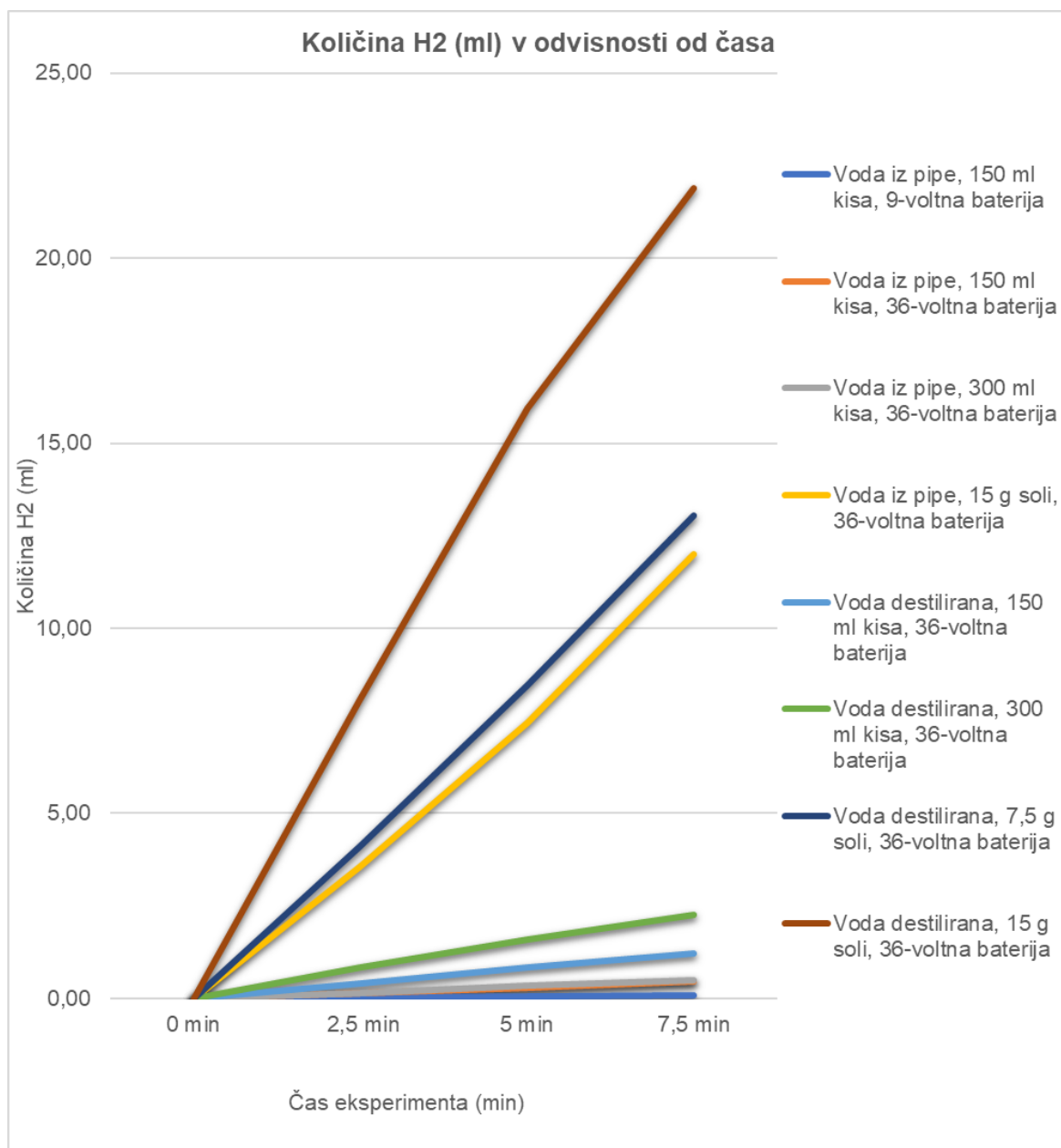
Tabela 1: Rezultati eksperimenta

	H ₂ (ml)	H ₂ (ml)	H ₂ (ml)	H ₂ (ml)	O ₂ (ml)	O ₂ (ml)	O ₂ (ml)	O ₂ (ml)
	2,5 min	5 Min	7,5 min	10 min	2,5 min	5 Min	7,5 min	10 min
Voda iz pipe, 150 ml kisa, 9- voltna baterija	0,02	0,05	0,07	0,09	0,01	0,02	0,02	0,03
Voda iz pipe, 150 ml kisa, 36- voltna baterija	0,15	0,3	0,45	0,63	0,05	0,13	0,15	0,28
Voda iz pipe, 300 ml kisa, 36- voltna baterija	0,15	0,35	0,5	0,65	0,1	0,15	0,17	0,3
Voda iz pipe, 15 g soli, 36-voltna baterija	3,57	7,45	12	15,08	1,95	3,9	6	7,7
Voda – destilirana, 150 ml kisa, 36-voltna baterija	0,39	0,83	1,2	1,6	0,22	0,41	0,58	0,79
Voda – destilirana, 300 ml kisa, 36-voltna baterija	0,85	1,59	2,25	3,22	0,35	0,62	0,98	1,32
Voda – destilirana, 7,5 g soli, 36-voltna baterija	4,1	8,46	13,05	17	2,4	4,17	6,6	8,56

Voda – destilirana, 15 g soli, 36-voltna baterija	8,1	15,95	21,9	32,17	3,8	7,99	12,3	16,34
--	-----	-------	------	-------	-----	------	------	-------

* Pri zelo majhnih vrednostih sem vrednost ocenil glede na velikost mehurčka (za meritve tako majhnih količin namreč nisem imel opreme), ostale meritve sem zaokrožil v odvisnosti od velikosti (in natančnosti) injekcijske brizge.

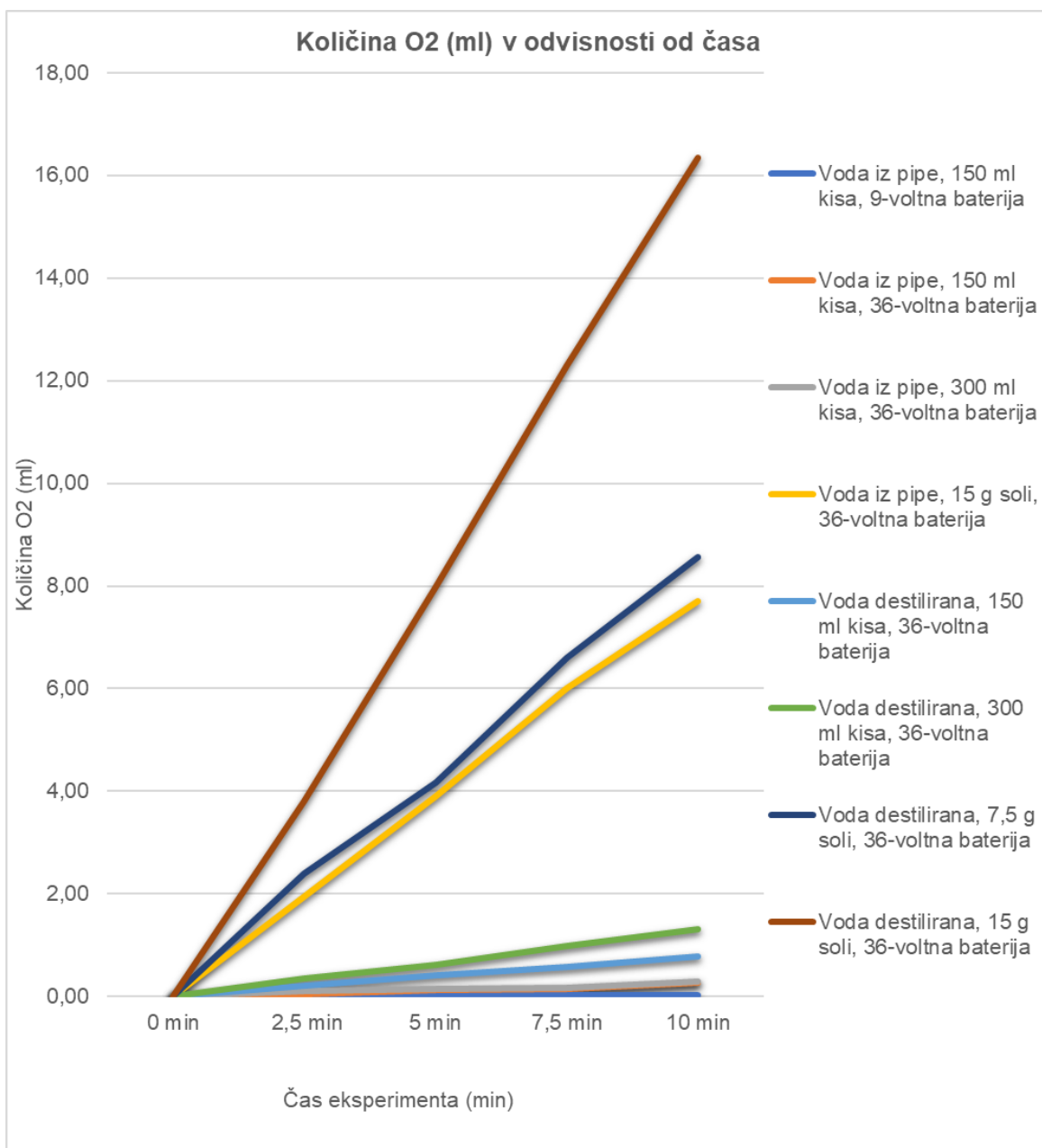
Na grafu 1 prikazujem rezultate pridobivanja vodika v odvisnosti od časa. Največ vodika v 10 minutah se je izločilo iz destilirane vode, v katero sem dodal 15 g soli ob uporabi 36-voltna baterije (32,17 ml). Sledita mu destilirana voda s 7,5 g soli s prej omenjeno baterijo (17,00 ml) in voda iz pipe, v katero sem dodal 15 g soli z uporabo 36-voltna baterije (15,08 ml vodika). Najmanjšo količino vodika pa je proizvedla voda iz vodovoda, z dodanim 150 ml kisa in 9-voltno baterijo (v 10 minutah le 0,09 ml vodika). Iz grafa lahko razberemo tudi, da se je največ vodika proizvedlo pri snoveh, ki so za elektrolit uporabljale kuhinjsko sol (NaCl). Kot na primer pri vodi iz pipe s 300 ml kisa s 36 V baterijo, kjer se je izločilo 95,7 % vodika manj kot pri raztopini vode iz pipe s 15 g soli in z enako baterijo. S tem lahko potrdimo, da je sol boljši elektrolit za pridobivanje vodika kot kis (ocetna kislina). Vrednost pH na pridobivanje vodika ni imela večjega vpliva, saj so bili veliko pomembnejši dejavniki: vrsta elektrolita, koncentracija elektrolita, vrsta vode in moč baterije.



Graf 1: Količina H₂ (ml) v odvisnosti od časa

Na grafu 2 je prikazano pridobivanje kisika v odvisnosti od časa. Največ kisika v 10 minutah je pridobljenega iz raztopine destilirane vode s 15 g soli in 36-voltno baterijo, in sicer 16,34 ml, najmanj pa iz vode iz pipe s kisom kot elektrolitom in 9-voltno baterijo, kjer se je izločilo 0,03 ml kisika (kar je 99,82 % manj). Iz grafa 2 lahko razberemo, da je najpomembnejši dejavnik za pridobivanje kisika vrsta vode, saj lahko vidimo, da je destilirana voda z manjšo količino soli (npr. iz destilirane vode s 7,5 g soli se je izločilo 8,56 ml kisika v 10 minutah) proizvedla več kisika kot voda

iz pipe z večjo koncentracijo soli (npr. iz vode iz pipe s 15 g soli z isto baterijo se je izločilo 7,70 ml kisika v 10 minutah; kar je 10 % manj) in isto baterijo.



Graf 2: Količina O₂ (ml) v odvisnosti od časa

Iz grafa 3 lahko primerjamo pridobljeno količino vodika in kisika po preteklih 10 minutah. Največ vodika in kisika se je izločilo iz destilirane vode s 15 g soli (vodika 32,17 ml; kisika 16,43 ml) in 36-voltno baterijo. Najmanj pa pri vodi iz pipe s 150 ml kisa in 9-voltno baterijo, kjer se je v 10 minutah izločilo 0,09 ml vodika in 0,03 ml kisika.

Iz grafov je tudi razvidno, da količina izločenega vodika in kisika raste z višjo koncentracijo soli in večjo napetostjo baterije. Pri uporabi destilirane vode s 15 g soli in s 36-voltno baterijo je bila proizvedena največja količina vodika (32,17 ml) in kisika (16,34 ml). To je smiselno, saj višja koncentracija soli poveča prevodnost raztopine in tako omogoča večji tok, kar posledično poveča količino izločenega plina pri elektrolizi. Prav tako večja napetost pomeni večjo silo, ki prav tako spodbuja večjo produkcijo plina.

Destilirana voda sama po sebi ima zelo nizko prevodnost, ker ne vsebuje ionov, ki bi omogočali prenos električnega toka. Z dodatkom soli ali kisa se prevodnost poveča, kar omogoča učinkovitejšo elektrolizo. Voda iz pipe običajno vsebuje različne minerale in soli, ki že prispevajo k prevodnosti, zato lahko pričakujemo, da bo pri enakih pogojih dala drugačne rezultate elektrolize kot destilirana voda.

V primerih, kjer je bila uporabljena nižja napetost (9-voltna baterija), je bila količina izločenega plina precej manjša, kar potrjuje, da je napetost pomemben faktor pri elektrolizi. Kot primer navajam edini primerljiv proces, in sicer pri vodi iz pipe s 150 ml kisa se je pri uporabi 9 V baterije izločilo 0,09 ml vodika in 0,03 ml kisika, pri uporabi 36 V baterije pa se je izločilo 0,63 ml (7-krat več) vodika in 0,28 ml (9-krat več) kisika.

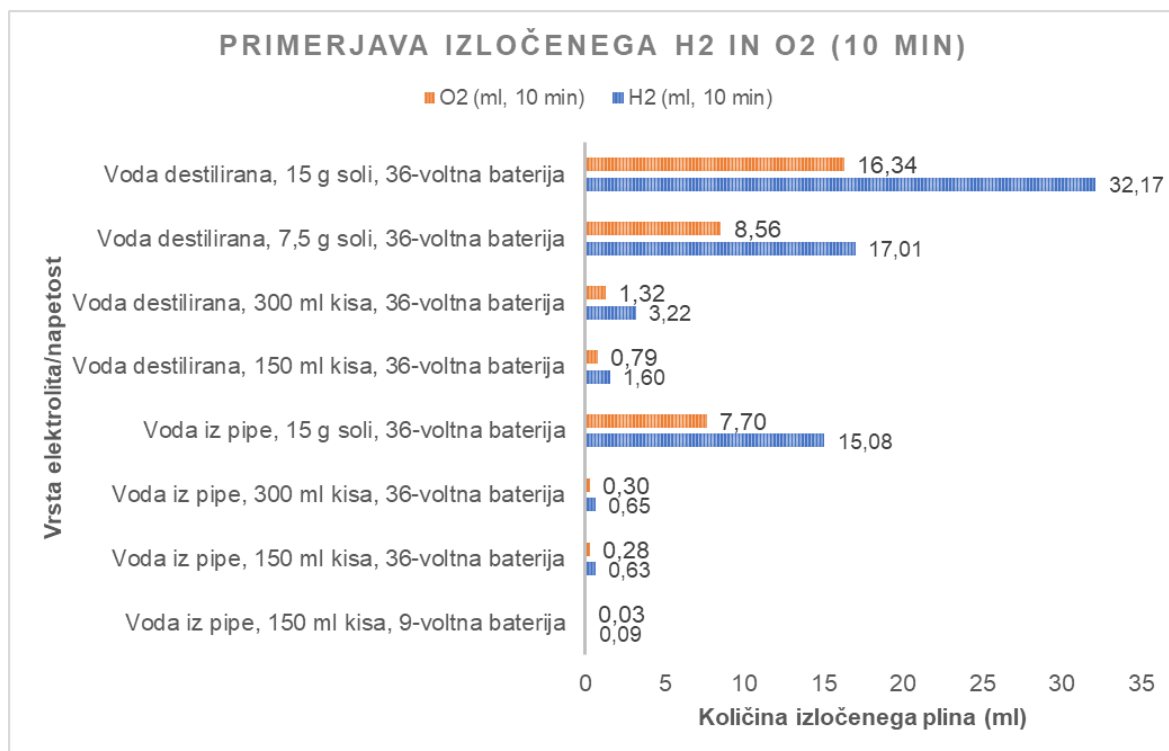
Pri poteku elektrolize je iz teoretičnih spoznanj znano, da se proizvede 2-krat več vodika kot kisika. Iz teoretičnega vidika bi pri elektrolizi vode pričakovali, da bo v razmerju prostornin izločeno dvakrat več vodika kot kisika. To je zato, ker vodna molekula vsebuje dva vodikova atoma in en kisikov atom (H_2O). Ko se voda razgradi z elektrolizo, se kisik in vodik sprostita kot plina v molekularni obliki (O_2 in H_2) v razmerju 1 : 2.

Na podlagi rezultatov, podanih v grafu 3, je razvidno, da se v večini primerov dejansko sprosti približno dvakrat več vodika kot kisika, kar je v skladu s teoretičnimi pričakovanji. Vendar pa obstajajo nekatere izjeme, kjer se zdi, da je razmerje nekoliko drugačno. Poudariti moramo eno izjemo, in sicer raztopino vode iz pipe s

150 ml kisa in 9 V baterijo, kjer je bila količina izločenega vodika trikrat večja od količine kisika. To bi lahko bilo zaradi več razlogov, vključno z učinkovitostjo elektrod, koncentracijo in vrsto soli v vodi, napetostjo in čistostjo vode. Pomemben razlog je lahko tudi posledica merilne napake, saj je šlo za zelo male količine, ki so bile okvirno določene.

Prav tako se zdi, da uporaba vode iz pipe v primerjavi z destilirano vodo povzroči nekoliko drugačne rezultate. Voda iz pipe s 150 ml kisa in 36 V baterijo na primer povzroči izločanje 0,63 ml vodika in 0,28 ml kisika v 10 minutah, kar je skoraj 60 % manj kot v primeru uporabe destilirane vode z enakimi elektroliti in baterijo (1,6 ml vodika in 0,79 ml kisika). To bi lahko bilo zato, ker ima voda iz pipe prisotne minerale in druge nečistoče, kar lahko vpliva na proces elektrolize.

Na splošno rezultati kažejo, da je osnovno teoretično razmerje med vodikom in kisikom pri elektrolizi vode dokaj dobro podprto, vendar je za natančnejšo analizo treba upoštevati tudi druge dejavnike.



Graf 3: Izločena količina vodika in kisika

4.2 Prihodnost elektrolize in vodika kot pogonskega sredstva

Raziskovalni del naloge bom nadgradil s pregledom modernih pristopov elektrolize in uporabo ter potencialom vodika v industriji in prometu. Na ta način bom podal predloge rešitev težav, ki sem jih tudi sam zaznal pri tem eksperimentu.

4.2.1 Moderni pristopi elektrolize

Napredne metode elektrolize, kot sta membranska elektroliza (PEM) in visokotlačna alkalna elektroliza, lahko ponudijo večje učinkovitosti zaradi boljšega nadzora nad proizvodnjo in čistostjo vodika. PEM uporablja trdno polimerno membrano, ki deluje kot elektrolit in omogoča delovanje pri višjih gostotah toka, kar pomeni večjo proizvodnjo vodika na enoto površine. Visokotlačna alkalna elektroliza pa omogoča proizvodnjo vodika pod tlakom, kar zmanjšuje stroške stiskanja vodika po elektrolizi. [13]

Vpliv kakovosti vode na elektrolizo: Izvajajo se poglobljene analize, kako različne stopnje čistosti vode vplivajo na hitrost in učinkovitost proizvodnje vodika in kisika. Kakovost vode ima namreč pomemben vpliv na proces elektrolize. Destilirana voda, ki je skoraj popolnoma brez mineralov in nečistoč, ima nizko električno prevodnost, kar pomeni, da sama po sebi ni učinkovita pri elektrolizi brez dodajanja elektrolita, kot je sol. Nasprotno pa ima voda iz pipe naravno prisotne ione, ki izboljšajo prevodnost in lahko posledično izboljšajo hitrost in učinkovitost proizvodnje vodika in kisika. Vendar pa lahko nečistoče v vodi iz pipe prav tako povzročijo korozijo elektrod ali zmanjšajo učinkovitost zaradi oblikovanja usedlin na elektrodah. [14]

Uporaba alternativnih elektrolitov: V nadaljevanju sledita pregled in diskusija o uporabi različnih vrst elektrolitov, njihovih lastnostih in o tem, kako bi lahko ti vplivali na proizvodnjo plinov pri elektrolizi. Izbor elektrolita pri elektrolizi vode pomembno vpliva na učinkovitost proizvodnje vodika. Čeprav se je tradicionalno uporabljala tehnologija membranske elektrolize s protonsko izmenjavo (PEM), so raziskovali alternativne elektrolite za izboljšanje procesa. Poleg tega so raziskovali trdne

kislinske elektrolizne celice za proizvodnjo vodika z elektrolizo pare, kar kaže na potencial za visoko učinkovitost pretvorbe energije in prilagodljivo delovanje, primerno za izkoriščanje obnovljive energije. Nadalje je uporaba ionskih tekočin kot elektrolitov, kot je 1-metil-3-(2,6-(S)-dimetilokt-2-en)-imidazol tetrafluoroborat (MDI-BF₄), pokazala obetajoče rezultate pri prevajanju električnega toka ne glede na koncentracijo vode, kar jo dela potencialni elektrolit za proizvodnjo vodika z elektrolizo vode. [15] Poleg tega so raziskovali uporabo nanofluida celuloze kot elektrolita, kar kaže na izboljšane učinkovitosti v proizvodnji vodika z elektrolizo vode. Prav tako so preučevali uporabo kalijevega hidroksida kot elektrolita, pri čemer se je izkazalo, da je koncentracija elektrolitne raztopine ključen parameter za vzdrževanje visoke učinkovitosti proizvodnje vodika. [16]

Vpliv temperature na elektrolizo: Temperatura pomembno vpliva na elektrolizo vodika, vpliva na učinkovitost in kinetiko procesa. Na delovanje elektrokatalizatorjev med elektrolizo vode opazno vpliva temperatura elektrolita. [17] Z naraščanjem temperature se transferni koeficient zmanjša, kar vodi do izboljšane učinkovitosti elektrolize. [18] Poleg tega je bila identificirana visokotemperaturna elektroliza (HTE) kot obetaven pristop za proizvodnjo vodika na veliko, ki ponuja višjo učinkovitost v primerjavi s konvencionalnimi metodami elektrolize. [19]

Iz zapisanega lahko torej ugotovim, da je prihodnost elektrolize vode in s tem pridobivanje vodika svetla. Še veliko bo treba raziskati, da bomo lahko vodik uspešneje pridobivali in ga uvedli v vsakodnevno življenje.

4.2.2 Potencial vodika v prihodnosti

Potencial vodika v industriji je pomemben, saj vodik ponuja rešitve za različne izzive, povezane z zmanjševanjem ogljičnega odtisa in s prehodom na obnovljive vire energije. Vodik se lahko uporablja kot čist vir energije za procese, ki zahtevajo visoke temperature (npr. v jeklarni in cementarni). Prav tako lahko služi kot surovina v kemični industriji, na primer pri proizvodnji amonijaka in metanola. Poleg tega je vodik ključen za razvoj zelenih tehnologij, kot so gorivne celice in skladiščenje energije. Industrije prav tako raziskujejo uporabo vodika kot alternativnega goriva

za zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv in za doseganje ciljev trajnostnega razvoja.

Pričakuje se, da bo vodik igral ključno vlogo kot vsestranski in trajnostni nosilec energije, prispevajoč k prehodu na obnovljive in trajnostne energetske sisteme. Eno od ključnih področij prihodnje uporabe je v transportnem sektorju, kjer se predvideva uporaba vodika kot čistega goriva za vozila, zlasti v vozilih na gorivne celice (FCEV) in kot potencialni medij za shranjevanje energije iz vetrne energije. Poleg tega se pričakuje, da bosta letalska in pomorska industrija sprejeli vodik in tehnologijo gorivnih celic, kar ponuja potencialne uporabe v teh sektorjih. Poleg tega se pričakuje obsežna uporaba vodika v industrijskih procesih, vključno s hidrogenacijo sestavin jedilnih olj, proizvodnjo petrokemičnih surovin in katalitsko hidrogenacijo za proizvodnjo finih kemikalij in v okoljskih industrijah. Prav tako se pričakuje nadaljnja uporaba vodika kot kriogenega goriva¹ v raketah in kot dvigalnega plina v vremenskih balonih v letalski industriji. Poudarjen je tudi potencial vodika za prispevanje k dekarbonizaciji industrijskih procesov, z njegovo uporabo pri zmanjševanju CO₂ z molekularnimi katalizatorji in njegovo vlogo pri razvoju obnovljivih energetskega sistemov z več energijami. Poleg tega naj bi vodik igral ključno vlogo pri razvoju čistih procesov redukcije z vodikom, ki ponujajo potencialne uporabe v različnih industrijskih okoljih. Poleg tega se pričakuje, da bo razvoj senzorjev in detekcijskih sistemov za vodik bistven za zagotavljanje varnosti in spremljanje procesov, povezanih z vodikom, v različnih industrijskih aplikacijah, kot je zaznavanje vodika v prehrabni industriji in razvoj brezžičnih pametnih senzorjev za vodik. Na splošno naj bi bila prihodnja uporaba vodika v industriji raznolika (v transportu, industrijskih procesih, obnovljivih energetskega sistemih in spremljanju varnosti), kar odraža njen potencial za prispevek k trajnostni in nizkoogljični prihodnosti. [20]

Na koncu bi še poudaril, da imamo tudi v Sloveniji podjetje, ki razvija vozila na vodik. Podjetje Pipistrel razvija letala na vodik. Načrtujejo razvoj 19-sedežnega hibridnega

¹ Kriogeno gorivo v raketah se nanaša na uporabo zelo hladnih tekočih goriv in oksidantov pri izjemno nizkih temperaturah, običajno pri temperaturah pod -150°C . Primeri kriogenih goriv vključujejo tekoči vodik in tekoči kisik, ki se pogosto uporabljata skupaj. Ko se ti dve kriogeni tekočini zmešata in vžgeta, sprostita ogromno količino energije, ki je potrebna za pogon raket v vesolje.

letala, ki bo poganjano z gorivnimi celicami na vodik in baterijami. Ta model, imenovan Miniliner, naj bi opravljal kratke točkovne storitve med mesti, kar bi izboljšalo povezljivost za premalo oskrbovana mesta ali tako imenovane »mikrohranilne« lete v večja letališča. Letalo bi lahko imelo doseg do 1000 kilometrov in bi bilo sposobno vzletati s stez dolžine manj kot en kilometer. Cilj je, da bi Miniliner vstopil v komercialno uporabo pred koncem tega desetletja. Razvoj tega letala poteka v sodelovanju z Univerzo v Delftu na Nizozemskem in Politecnico di Milano v Italiji kot del EU-financiranega projekta UNIFIER19. [21]

5 ZAKLJUČEK

V nalogi sem podrobno raziskal uporabo vodika kot alternativnega pogonskega goriva. V teoretičnem delu sem se osredotočil na osnovna načela elektrolize vode, različne vrste elektrolitov in varnostne ukrepe pri ravnanju z vodikom. Predstavil sem tudi trenutno stanje in perspektive uporabe vodika v avtomobilski industriji.

V eksperimentalnem delu sem s pomočjo elektrolize vode raziskoval proizvodnjo vodika. Uporabil sem različne elektrolite in moči baterij, da bi ugotovil njihov vpliv na učinkovitost elektrolize.

Rezultati so pokazali, da vrsta elektrolita in moč baterije vplivata na hitrost pridobivanja vodika. Ugotovil sem, da uporaba močnejše baterije in večja količina elektrolita povzročata hitrejšo izločanje vodika. Prav tako sem potrdil, da se pri elektrolizi proizvede več vodika kot kisika.

Zastavil sem si naslednje hipoteze, ki jih bom sedaj potrdil ali ovrzel. Prva hipoteza se je glasila: »Uporaba ocetne kisline kot elektrolita bo povzročila hitrejšo pridobivanje vodika kot raztopina NaCl.« To hipotezo lahko ovržem. V vseh raztopinah s kuhinjsko soljo kot elektrolitom se je proizvedlo veliko več vodika in kisika kot v raztopinah s kisom (ob isti uporabi vode in napetosti). Na to kažejo naslednji rezultati eksperimenta (po 10 minutah):

- Voda iz pipe, 150 ml kisa, 36-voltna baterija; 0,63 ml vodika in 0,28 ml kisika;
- Voda iz pipe, 300 ml kisa, 36-voltna baterija; 0,65 ml vodika in 0,3 ml kisika;
- **Voda iz pipe, 15 g soli, 36-voltna baterija; 15,08 ml vodika in 7,70 ml kisika;**
- Destilirana voda, 150 ml kisa, 36-voltna baterija; 1,60 ml vodika in 0,79 ml kisika;
- Destilirana voda, 300 ml kisa, 36-voltna baterija; 3,22 ml vodika in 1,32 ml kisika;
- **Destilirana voda, 7,5 g soli, 36-voltna baterija; 17,01 ml vodika in 8,56 ml kisika;**

- **Destilirana voda, 15 g soli, 36-voltna baterija; 32,17 ml vodika in 16,43 ml kisika.**

Glede na moje eksperimentalne rezultate in zastavljeno hipotezo o uporabi očetne kisline kot elektrolita v primerjavi z raztopino NaCl za hitrejšo pridobivanje vodika, je torej moja ugotovitev, da je kuhinjska sol (NaCl) boljši elektrolit kot očetna kislina, podkrepljena z opaznimi razlikami v količini proizvedenega vodika in kisika. Ta ugotovitev je v skladu s splošno elektrokemijsko teorijo, ki poudarja pomen ionov v elektrolitu za učinkovitost elektrolize.

Razlika med očetno kislino in NaCl kot elektroliti je lahko posledica več dejavnikov. Očetna kislina je šibka kislina, kar pomeni, da ne disociira popolnoma v vodni raztopini, zaradi česar je njena ionska prevodnost nižja v primerjavi z močnejšimi elektroliti, kot je NaCl. NaCl se v vodi popolnoma disociira (kemični proces, pri katerem se molekule soli, kislin ali baz razgradijo na svoje sestavne ione, ko so raztopljene v vodi) na natrijeve in kloridne ione, ki izboljšajo prevodnost raztopine in posledično povečajo učinkovitost elektrolize.

Poleg tega ima koncentracija elektrolita pomemben vpliv na hitrost elektroliznih reakcij. Višja koncentracija soli v raztopini poveča število prostih ionov, ki lahko prenašajo električni tok, s čimer se izboljšata hitrost in učinkovitost pridobivanja vodika.

Moja druga hipoteza je bila: »Uporaba destilirane vode bo povzročila hitrejšo pridobivanje vodika kot voda iz pipe.« To lahko dokažem s prikazom rezultatov eksperimenta:

- Voda iz pipe, 15 g soli, 36-voltna baterija, kjer se je v 10 minutah izločilo 15,08 ml vodika in 7,70 ml kisika;
- Destilirana voda, 15 g soli, 36-voltna baterija, kjer se je v 10 minutah izločilo 32,17 ml vodika in 16,43 ml kisika.

Iz tega sledi, da se je v primeru uporabe destilirane vode s 15 g soli v 10 minutah izločilo približno 53 % več vodika in kisika kot v primeru uporabe vode iz pipe (z isto količino soli).

Moja druga hipoteza, ki navaja, da bo uporaba destilirane vode povzročila hitrejše pridobivanje vodika kot voda iz pipe, je podkrepljena z rezultati mojega eksperimenta, ki kažejo na pomembno razliko v proizvodnji vodika in kisika pri uporabi teh dveh vrst vode. Ta ugotovitev je v skladu z osnovnimi elektrokemijskimi načeli, ki poudarjajo vpliv kakovosti vode na elektrolizo.

Destilirana voda je skoraj popolnoma brez mineralov in nečistoč, zaradi česar ima zelo nizko električno prevodnost. To pomeni, da brez dodatka elektrolita, kot je sol, destilirana voda sama po sebi ni učinkovita pri elektrolizi. Ko pa ji dodamo elektrolit, se njena prevodnost znatno izboljša, kar omogoča učinkovitejšo elektrolizo. V mojem primeru je dodatek soli v destilirani vodi povečal prevodnost, kar je omogočilo hitrejšo proizvodnjo vodika in kisika v primerjavi z vodo iz pipe.

Po drugi strani ima voda iz pipe naravno prisotne ione, ki izboljšujejo njeno prevodnost. Vendar pa lahko prisotnost nečistoč v vodi iz pipe, kot so minerali ali druge snovi, privede do korozije elektrod ali zmanjša učinkovitost zaradi oblikovanja usedlin na elektrodah. To lahko razloži, zakaj sem opazil manjšo proizvodnjo vodika in kisika pri uporabi vode iz pipe v primerjavi z destilirano vodo.

Raziskave na tem področju poudarjajo, da je kakovost vode ključnega pomena za učinkovitost in čistost proizvodnje vodika z elektrolizo. Visoka čistost vode in zatiranje nezaželenih reakcij sta bistvena za učinkovito in čisto proizvodnjo vodika. To potrjuje tudi moja hipoteza, da uporaba čistejše, destilirane vode vodi do boljših rezultatov pri elektrolizi, saj zmanjšuje možnost neželenih reakcij in korozije, kar prispeva k učinkovitejšemu procesu.

Hipoteza 3 se glasi: »Uporaba močnejše baterije bo povzročila hitrejše izločanje vodika.« Ta hipoteza je v celoti potrjena. Eksperiment je namreč pokazal sledeče:

- Voda iz pipe, 150 ml kisa, 9-voltna baterija; v 10 minutah se je izločilo 0,09 ml vodika in 0,03 ml kisika;
- Voda iz pipe, 150 ml kisa, 36-voltna baterija; v 10 minutah se je izločilo 0,63 ml vodika in 0,28 ml kisika.

Zaključim torej lahko, da moja hipoteza, da bo uporaba močnejše baterije povzročila hitrejše izločanje vodika, je bila v celoti potrjena. Ta ugotovitev je skladna s temeljnimi elektrokemičnimi načeli, ki kažejo, da je napetost ključni faktor pri elektrolizi. Ko uporabljamo višjo napetost, se poveča električni potencial med elektrodami v elektrolitski celici, kar pomeni, da so elektroni, ki se premikajo med elektrodami, bolj energijski. Ta povečana energija prispeva k hitrejši in učinkovitejši razgradnji molekul vode (H_2O) na vodik (H_2) in kisik (O_2). Rezultati mojega eksperimenta torej kažejo, da se je ob uporabi 36-voltna baterije v primerjavi z 9-voltno baterijo izločilo sedemkrat več vodika in devetkrat več kisika.

Pomembno je tudi omeniti, da večja napetost lahko vodi do drugih elektrokemijskih reakcij poleg želenih. Pri previsoki napetosti lahko na primer pride do stranskih reakcij, kot je razgradnja elektrolitov ali korozija elektrod, kar lahko vpliva na čistost pridobljenega vodika in na dolgoročno vzdržnost elektrolitske celice. Vendar pa moji rezultati kažejo, da je bila izbrana napetost ustrezna za izvedbo elektrolize brez očitnih neželenih učinkov (razen v določenih, omenjenih primerih). Ta ugotovitev ima pomembne implikacije za oblikovanje in optimizacijo sistemov za elektrolizo v praksi. Prikazuje, da je izbor prave napetosti ključen za doseganje visoke učinkovitosti pri proizvodnji vodika in kisika, kar je še posebej pomembno v industrijskih in komercialnih aplikacijah, kjer je učinkovitost proizvodnje kritičnega pomena.

Hipoteza 4 se je glasila: »Pri reakciji se bo proizvedlo dvakrat več vodika kot kisika.« Hipotezo lahko potrdim z izjemo rezultata pri eni meritvi. Rezultati eksperimenta so bili namreč naslednji:

- **Voda iz pipe, 150 ml kisa, 9-voltna baterija; 0,09 ml vodika in 0,03 kisika.**
Tukaj razmerje ni dvakratno, temveč trikratno, kar lahko tudi pomeni, da je pri eksperimentu prišlo do merilne napake, ker so vrednosti tako majhne.

- Voda iz pipe, 150 ml kisa, 36-voltna baterija; 0,63 ml vodika in 0,28 kisika (vodika je 2,25-krat več kot kisika);
- Voda iz pipe, 300 ml kisa, 36-voltna baterija; 0,65 ml vodika in 0,3 kisika (vodika je 2,25-krat več kot kisika);
- Voda iz pipe, 15 g soli, 36-voltna baterija; 15,08 ml vodika in 7,70 kisika (vodika je 2,17-krat več kot kisika);
- Destilirana voda, 150 ml kisa, 36-voltna baterija; 1,60 ml vodika in 0,79 kisika (vodika je 2,02-krat več kot kisika);
- Destilirana voda, 300 ml kisa, 36-voltna baterija; 3,22 ml vodika in 1,32 kisika (vodika je 2,44-krat več kot kisika);
- Destilirana voda, 7,5 g soli, 36-voltna baterija; 17,01 ml vodika in 8,56 kisika (vodika je 1,99-krat več kot kisika);
- Destilirana voda, 15 g soli, 36-voltna baterija; 32,17 ml vodika in 16,43 kisika (vodika je 1,97-krat več kot kisika).

Moja četrta hipoteza, ki pravi, da se bo pri reakciji proizvedlo dvakrat več vodika kot kisika, temelji na teoretičnih osnovah elektrolize vode. Vodna molekula (H_2O) vsebuje dva vodikova atoma in en kisikov atom. Med elektrolizo se vodna molekula razgradi, pri čemer se vodik in kisik sprostita kot plina v molekularni obliki (H_2 in O_2). Teoretično bi torej pričakovali, da bo v razmerju prostornin izločeno dvakrat več vodika kot kisika. Opazil sem, da se je v večini primerov izločilo približno dvakrat več vodika kot kisika, kar je v skladu s teoretičnimi pričakovanji. Ta ugotovitev potrjuje osnovno razumevanje procesa elektrolize vode in kaže na točnost naših eksperimentalnih metod kljub manjšim odstopanjem, ki so verjetno posledica zgoraj omenjenih dejavnikov. Rezultati mojega eksperimenta so torej v večini primerov skladni s to teoretično predpostavko, čeprav obstajajo nekatere izjeme, kot je moja prva meritev z 9-voltno baterijo, kjer je bilo razmerje tri proti ena. To bi lahko bilo posledica merilne napake, kar je še posebej verjetno pri majhnih količinah plina, kjer so morebitne napake pri merjenju izrazitejše.

Zadnja hipoteza se je glasila: »Večja količina elektrolita bo povzročila hitrejše izločanje vodika«. Tudi to trditev lahko potrdim. Koncentracija elektrolita je pomembna za to reakcijo, ker bi brez njega reakcija trajala dlje in proizvedla manj

plinov, kar lahko podkrepim z naslednjo primerjavo (ostalih ni mogoče direktno primerjati zaradi drugih kriterijev): Voda iz pipe, 150 ml kisa, 36-voltna baterija in voda iz pipe, 300 ml kisa, 36-voltna baterija. Pri večji koncentraciji elektrolita (kisa) se je proizvedlo malo več vodika in kisika kot pri manjši koncentraciji (pri uporabi 300 ml kisa se je proizvedlo 7 % več kisika kot pri uporabi 150 ml kisa; pri uporabi 300 ml kisa se je proizvedlo 3 % več vodika kot pri uporabi 150 ml kisa).

Moja zadnja hipoteza, da bo večja količina elektrolita povzročila hitrejšo izločanje vodika, je potrjena z rezultati, ki sem jih podal. Ta ugotovitev je logična, saj višja koncentracija elektrolita v raztopini poveča njeno električno prevodnost, kar je ključnega pomena za elektrolizo. Ko namreč dodam več elektrolita, kot je sol, v vodo, se poveča število prostih ionov v raztopini. Ti ioni so bistveni za prenos električnega toka med elektrodami, kar je nujno potrebno za potek elektrolizne reakcije. Višja prevodnost omogoča večji tok, kar posledično poveča hitrost in učinkovitost elektrolize, kar se kaže v večjem izločanju vodika in kisika.

Med raziskovanjem sem pridobili dragocene izkušnje in ugotovitve, ki prispevajo k boljšemu razumevanju in potencialni uporabi vodika kot pogonskega goriva.

Izboljšave, ki bi jih lahko naredil v svojem eksperimentu, se navezujejo na predloge prihodnjih raziskav, ki sem jih podal v podpoglavju 4.2. Res pa je, da v domačem okolju težko izvedem tako zahtevne eksperimente, kot so na primer membranska elektroliza, visokotlačna alkalna elektroliza, uporaba alternativnih elektrolitov (ki mi niso dostopni) in visokotemperaturna elektroliza. Zato bom te raziskave prepustil znanstvenikom, specializiranim na tem področju, njihov napredek in rezultate pa bom z zanimanjem spremljal.

Na koncu bi rad podal še pomisleke glede prihodnosti pogonskih sredstev pri avtomobilih. Električni avtomobili se nam mogoče zdijo kot avtomobili prihodnosti, vendar se pojavlja kar nekaj vprašanj v zvezi z njihovo varnostjo baterij, načinom pridobivanja električne energije (ali elektrika prihaja iz vetrnih elektrarn ali iz termoelektrarn), veliko porabo naravnih virov (na primer: litij in druge redke kovine), prepočasnim polnjenjem, pa vse do težav z dometi baterije.

Avtomobili na vodik imajo tako kot vsi ostali avtomobili svoje prednosti in slabosti. Med glavne prednosti sodijo veliki dosegi, hitro polnjenje, tiho delovanje, dolgotrajnost, obnovljiva proizvodnja vodika in nizke do ničelne emisije. Ne glede na to, da imajo avtomobili na vodik toliko prednosti pred drugimi avtomobili, imajo v tem času še več slabosti. Postavljajo se vprašanja o varnosti avtomobilov (vodik je zelo reaktiven in eksploziven), shranjevanju in transportu vodika, infrastrukturi za polnjenje, stroških proizvodnje vodika, trajnosti (vodik velikokrat pridobijo s pomočjo fosilnih goriv kot energetskega viroma in vodik se lahko s trenutno tehnologijo pridobi le iz čiste sladke vode, ki pa je ponekod tako ali tako že primanjkuje) pa vse do težav z recikliranjem.

6 SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] Petrol, „Petrol,“ b. d. [Elektronski]. Available: <https://www.petrol.si/poslovne-resitve/resitve/vodik>. [Poskus dostopa: 1. november 2023].
- [2] European Commission, „European Commission,“ 28. oktober 2022. [Elektronski]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_6462.
- [3] W. L. Jolly, Britannica, 23. oktober 2023. [Elektronski]. Available: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>.
- [4] Britannica, Britannica - Science & Tech,“ Hydrogen, 10. januar 2024. [Elektronski]. Available: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>. [Poskus dostopa: 3. februar 2024].
- [5] HYDROGEN AND FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE, „Energy.gov,“ b.d.. [Elektronski]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>. [Poskus dostopa: 2. november 2023].
- [6] AutoSmart, „AutoSmart,“ Learn the facts: Emissions from your vehicle, b.d.. [Elektronski]. Available: https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_9_e.pdf. [Poskus dostopa: 2. november 2023].
- [7] E. Bannon, „energypost.eu,“ Latest data shows lifetime emissions of EVs lower than petrol, diesel, 12. maj 2020. [Elektronski]. Available: <https://energypost.eu/latest-data-shows-lifetime-emissions-of-evs-lower-than-petrol-diesel/>. [Poskus dostopa: 2. november 2023].
- [8] U.S. department of energy, „U.S. department of energy,“ Alternative Fuels Data Center, b. d. [Elektronski]. Available: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_emissions.html. [Poskus dostopa: 2. november 2023].
- [9] S. Satyapal, „Energy.gov,“ Hydrogen: A Clean, Flexible Energy Carrier, 21. februar 2017. [Elektronski]. Available:

<https://www.energy.gov/eere/articles/hydrogen-clean-flexible-energy-carrier>.

[Poskus dostopa: 3. november 2023].

- [10] J. Voelcker, „Car and driver,“ Hydrogen Fuel-Cell Vehicles: Everything You Need to Know, 26. september 2022. [Elektronski]. Available: <https://www.caranddriver.com/features/a41103863/hydrogen-cars-fcev/>.
- [11] Wikipedia, „Wikipedia,“ NamX HUV, b.d. [Elektronski]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/NamX_HUV. [Poskus dostopa: 3. november 2023].
- [12] S. Bell, „Carscoop,“ NAMX HUV Is A Pininfarina-Designed SUV With Swappable Hydrogen Bottles Heading To Production, 17. oktober 2022. [Elektronski]. Available: <https://www.carscoops.com/2022/10/namx-reveals-pininfarina-designed-hydrogen-powered-suv-with-removable-fuel-tanks/>.
- [13] Linkdin in S. Jahagirdar, „Linkdin: Detailed Analysis of PEM and Alkaline Hydrogen Electrolyzers,“ 11. november 2023. [Elektronski]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/detailed-analysis-pem-alkaline-hydrogen-electrolyzers-sanjeev-rfhsf>. [Poskus dostopa: 3. februar 2024].
- [14] W. Zang, T. Sun, T. Yang, S. Xi, M. Waqar, Z. Kou in S. Pennycook, „Efficient hydrogen evolution of oxidized ni-n3 defective sites for alkaline freshwater and seawater electrolysis,“ *Advanced Materials*, 2020.
- [15] Â. Oliveira, D. Melo, H. Macedo, R. Medeiros, R. Campos, P. Ferreira in T. Araújo, „Synthesis and characterization of the ionic liquid 1-methyl-3-(2,6-(s)-dimethyloct-2-ene)-imidazol tetrafluoroborate,“ *Research Society and Development*, 2021.
- [16] I. Hamidah, A. Solehudin, A. Setiawan, L. Hasanah, B. Mulyanti in A. Nandiyanto, „Surface of aisi 316 as electrode material for water electrolysis under potassium hydroxide for hybrid car application,“ *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, pp. 58863-58873, 2018.
- [17] F. Duan, X. Wei, Y. Huang, Y. Yang, B. Liu, B. Jia in H. He, „Performance evolution of typical electrocatalysts with electrolyte temperature during alkaline water electrolysis,“ *The Journal of Physical Chemistry*, pp. 88041-8047, 20023.

- [18] Y. Li, M. Nagao, K. Kobayashi, Y. Jin in T. Hibino, „A cellulose electrolysis cell with metal-free carbon electrodes,” *Catalysts*, 2020.
- [19] J. O'Brien, M. McKellar, C. Stoots, J. Herring in G. Hawkes, „Parametric study of large-scale production of syngas via high-temperature co-electrolysis,” *International Journal of Hydrogen Energy*,, str. 4216–4226, 2009.
- [20] Scite, „Assistant by Scite,” b. d. [Elektronski]. Available: <https://scite.ai/assistant>. [Poskus dostopa: 3. februar 2024].
- [21] D. Perry, „Pipistrel nears launch of new hydrogen-powered 19-seater,” 16. februar 2021. [Elektronski]. Available: <https://www.flightglobal.com/air-transport/pipistrel-nears-launch-of-new-hydrogen-powered-19-seater/142438.article>. [Poskus dostopa: 3. februar 2024].