

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ines Vedrina

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Mihajlo Firak, dipl. ing.

Student:

Ines Vedrina

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Mihajlu Firaku na pruženoj pomoći i potpori tijekom izrade rada.

Također se zahvaljujem svim profesorima i asistentima koji su mi omogućili stjecanje znanja potrebnih za izradu rada te općenito za buduću inženjersku karijeru.

Ines Vedrina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. Povijest.....	2
2.2. Osnove elektrolize	4
2.2.1. Kemijska teorija elektrolize vode.....	4
2.2.2. Termodinamičke osnove elektrolize.....	5
2.2.2.1.Reverzibilni napon.....	6
2.2.2.2.Termoneutralni napon.....	7
2.2.3. Otpori u procesu elektrolize.....	8
2.2.3.1.Električni otpor.....	9
2.2.3.2.Otpor uslijed transporta (fizički otpor).....	9
2.2.3.3.Otpor uslijed elektrokemijske reakcije.....	9
2.3. Faradayevi zakoni elektrolize.....	10
2.3.1. Prvi Faradayev zakon elektrolize.....	10
2.3.2. Drugi Faradayev zakon elektrolize.....	10
2.4. Kinetika elektroda.....	11
2.5. Matematički model izvedenog elektrolizatora.....	13
2.6. Matematički model elektrolizatora u razvoju.....	14
2.7. Učinkovitost elektrolizatora.....	15
2.7.1. Faraday – eva učinkovitost.....	15
2.7.2. Naponska učinkovitost	15
2.7.3. Energetska učinkovitost.....	16

3. ELEKTROLIZATOR.....	17
3.1. Alkalni elektrolizator.....	17
3.2. Vrste alkalnih elektrolizatora prema načinu spajanja na strujni krug.....	18
4. PRORAČUNI.....	20
4.1. Izmjereni podaci.....	20
4.2. Određivanje UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora pomoću matematičkog modela izvedenog elektrolizatora.....	21
4.3. Određivanje UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora pomoću matematičkog modela elektrolizatora u razvoju.....	23
4.3.1. Određivanje prenapona elektroda.....	23
4.4. Usporedba dobivenih UI – karakteristika postojećeg elektrolizatora pomoću različitih matematičkih modela.....	26
4.5. Određivanje UI – karakteristike elektrolizatora u razvoju pomoću UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora (UI – karakteristika dobivena modelom za postojeći elektrolizator).....	27
4.6. Određivanje UI – karakteristike elektrolizatora u razvoju pomoću UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora (UI – karakteristika dobivena modelom za elektrolizator u razvoju).....	28
4.7. Usporedba dobivenih UI – karakteristika elektrolizatora u razvoju pomoću različitih matematičkih modela.....	29
4.8. Proračun mase proizvedenog vodika postojećeg laboratorijskog elektrolizatora kod napona $U = 2,3 \text{ V}$	29
4.9. Proračun energetske učinkovitosti postojećeg elektrolizatora.....	30
4.10. Proračun mase proizvedenog vodika elektrolizatora u razvoju.....	31
5. KONSTRUKCIJA.....	32
5.1. Princip rada	32
5.2. Glavne komponente elektrolizatora i njihova uloga	32
5.2.1. Rubne ploče.....	34
5.2.2. Monopolarne i bipolarne ploče	35
5.2.3. Membrana	37
5.2.4. Brtve.....	38
5.2.5. Elektrode (Ni – metalna pjena).....	39
5.2.5.1. Određivanje površine metalne pjene.....	41

5.2.6. Keramički prsteni	42
6. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44
PRILOZI.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1.	Postrojenje za industrijsku elektrolizu vode.....	2
Slika 2.	Shematski prikaz elektrolize vode na jednostavnom elektrolitičkom članku.....	4
Slika 3.	Napon članka elektrolizatora za proizvodnju vodika elektrolizom vode kao funkcija temperature.....	8
Slika 4.	Shematski prikaz otpora u procesu elektrolize.....	8
Slika 5.	Tafelov dijagram za Ni pločicu.....	12
Slika 6.	UI - karakteristika elektrolizatora.....	13
Slika 7.	Monopolarni i bipolarni elektrolizator.....	18
Slika 8.	UI – karakteristika laboratorijskog elektrolizatora prema izmjerenim podacima...22	
Slika 9.	Tafelov dijagram za Ni – metalnu pjenu.....	24
Slika 10.	UI – karakteristika postojećeg laboratorijskog elektrolizatora dobivena pomoću matematičkog modela elektrolizatora u razvoju.....	25
Slika 11.	Dijagramski prikaz dobivenih UI – karakteristika postojećeg elektrolizatora pomoću različitih matematičkih modela.....	26
Slika 12.	Usporedba UI – karakteristika laboratorijskog elektrolizatora te elektrolizatora u razvoju (s jednim i tri članka).....	27
Slika 13.	Usporedba UI – karakteristika postojećeg elektrolizatora te elektrolizatora u razvoju (s tri članka).....	28
Slika 14.	Dijagramski prikaz dobivenih UI – karakteristika elektrolizatora u razvoju pomoću različitih matematičkih modela.....	29
Slika 15.	Crtež alkalnog bipolarnog elektrolizatora s označenim pozicijama.....	33
Slika 16.	Tehnički crtež početne rubne ploče.....	34
Slika 17.	Tehnički crtež krajnje rubne ploče.....	35
Slika 18.	Tehnički crtež monopolarne ploče.....	36
Slika 19.	Tehnički crtež bipolarne ploče.....	36
Slika 20.	Tehnički crtež membrane.....	37
Slika 21.	Tehnički crtež brtve.....	38
Slika 22.	Tehnički crtež metalne pjene.....	39
Slika 23.	Struktura Ni pjene.....	40
Slika 24.	Tehnički crtež keramičkog prstena.....	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mjereni podaci.....	21
Tablica 2. Ukupno izvješće mjerenja površine metalne pjene BET metodom.....	42
Tablica 3. Vrijednosti usporedbe aktivne površine Ni pjene i Ni pločice.....	42

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 01 Elektrolizator
- 01-1 Početna rubna ploča
- 01-2 Zavareni sklop monopolarna ploča i pločica za dovod struje
- 01-2-1 Monopolarna ploča
- 01-2-2 Pločica za dovod struje
- 01-3 Brtva
- 01-4 Membrana
- 01-5 Vijak
- 01-6 Vijak za pritezanje elektrolizatora
- 01-7 Bipolarna ploča
- 01-8 Metalna pjena
- 01-9 Krajnja rubna ploča
- 01-10 Keramički prsten
- 01-11 Postolje

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	[g/C]	atomska težina
A_e	[m ²]	kontaktna (aktivna) površina elektrode
A_t	[m ²]	tlocrtna površina elektrode
E°	[V]	standardni potencijal članka, elektromotorna sila
F	[As/mol]	Faraday-ova konstanta
ΔG_s	[kJ/mol]	promjena Gibbsove energije
$(H_d)_{H_2}$	[kJ/kg]	donja ogrjevna vrijednost vodika
ΔH_s	[kJ/mol]	promjena entalpije
i	[A/m ²]	gustoća električne energije
i_0	[A/m ²]	gustoća električne energije izmjene
I_{Ely}	[A]	radna struja elektrolizatora
P_{EL}	[W]	snaga električne energije
$(q_m)_{H_2}$	[kg/s]	masena proizvodnja vodika u vremenu
Q	[C]	električni naboj koji prolazi kroz elektrolit
r	[Ω m ²]	parametar Ohmskog otpora elektrolita
R	[kJ/molK]	plinska konstanta
R_{el}	[Ω]	Ohmski otpor elektrolita
ΔS	[J /mol K]	promjena entropije
s	[V]	koeficijent prenapona na elektrodama
t	[m ² / A]	koeficijent prenapona na elektrodama
t	[s]	vrijeme
T	[°C, K]	temperatura elektrolita
U	[V]	napon
U_{Ely}	[V]	radni napon elektrolizatora
U_{rev}	[V]	reverzibilni napon (pri uloženoj energiji ΔG)
U_{tn}	[V]	termoneutralni napon (pri uloženoj energiji ΔH)
z	[-]	broj elektrona koji sudjeluju u reakciji
z	[g/C]	elektrokemijski ekvivalent tvari koja se izlučuje na elektrodi
α	[-]	koeficijent prijenosa
η	[mV]	prenapon elektroda
η_a	[mV]	prenapon anode
η_c	[mV]	prenapon katode
η_E	[-]	energetska učinkovitost elektrolizatora
η_N	[-]	naponska učinkovitost elektrolizatora
η_F	[-]	Faraday – eva učinkovitost
v	[-]	valencija kemijskog elementa

SAŽETAK

Usljed stalnog povećanja cijena goriva, koje je potaknuto smanjenjem naftnih rezervi, smanjenjem proizvodnje i opskrbe gorivom, strahom od globalnog zatopljenja i promjene klime uslijed izgaranja fosilnih goriva, vodik je u posljednjih nekoliko godina postao vrlo zanimljiv. Zahvaljujući svojim mnogobrojnim prednostima vodik odnosno "gospodarstvo zasnovano na vodiku" bi u budućnosti moglo postati jedno od rješenja u ostvarivanju energetske održivosti.

Ovaj diplomski rad prikazuje dobivanje elementarno čistog vodika elektrolizom vode . U radu je dan detaljan pregled elektrolize s kemijskog i termodinamičkog aspekta, također je sklopu kinetike elektroda i otpora u procesu elektrolize dan uvid u osnove elektrokemije. Svu navedenu teoriju je bilo važno usvojiti kako bi se mogao razumjeti princip rada elektrolizatora. Osim teoretskog dijela ovaj rad daje pregled povijesnog razvoja elektrolize odnosno elektrolizatora, kao i opise poznatih tehničkih koncepata njihove izvedbe .

Tema ovog rada je proračun i konstrukcija elektrolizatora, konkretno alkalnog bipolarnog tipa. U petom poglavlju (5. Konstrukcija) prikazana je izvedba bipolarnog elektrolizatora s tri elektrolitička članka u serijskoj vezi s obzirom na električnu struju i paralelnoj vezi s obzirom na protok elektrolita s pripadajućom tehničkom dokumentacijom. Osim konstrukcije proračunata je i potencijalna proizvodnja vodika elektrolizatora pod pretpostavkom da pojedini članak radi s padom napona od 2,3 V.

Ključne riječi: vodik, elektroliza, elektrolizator, metalna pjena, matematički model elektrolizatora

SUMMARY

With ever increasing energy costs due to the decreasing of oil reserves, production and supply and concerns with global warming and climate change blamed on man-made carbon dioxide (CO₂) emissions associated with fossil fuel use, hydrogen has in recent years become very popular. Behalf its many advantages hydrogen may serve as one of the solutions to the sustainable energy supply and use puzzle in the long run, in so-called "hydrogen economy".

This thesis displays the production of hydrogen by water electrolysis. A detailed preview of the chemistry and thermodynamics of electrolysis is given, as well as electrochemistry basics through electrode kinetics and electrical resistances of electrolysis. All the theory referred to above must be perceived to be able to understand the way an electrolyser functions. Apart from the theoretical section of this thesis there is also a review of the historical development of electrolysis and alkaline electrolysers given and descriptions of the known technical concepts of their designs.

The subject matter of this thesis is the calculation and design of an alkaline bipolar electrolyser. In the fifth section, the design of the bipolar electrolyser with tri cells connected in a series, is shown with related technical documentation. An estimated calculation of hydrogen is also given, assuming that each cell operates with 2,3 V voltage decrease.

Key words: hydrogen, electrolysis, electrolyser, metal foam, mathematical model of electrolysers

1. UVOD

Elementarni vodik na Zemlji je vrlo rasprostranjen, ali u malim količinama. Nazočan je u atmosferi, zemnom plinu, vulkanskim plinovima, itd. Zbog toga što ga gravitacija teško može zadržati, vodik u gornjim dijelovima atmosfere izlazi u svemir. U obliku spojeva, ima ga u ogromnim količinama, ponajviše u obliku vode.

U kemijskom smislu, vodik nije izvor, već spremnik energije, jer ga u slobodnom elementarnom obliku u prirodi nema. Korištenje vodika kao gorivo ima niz prednosti:

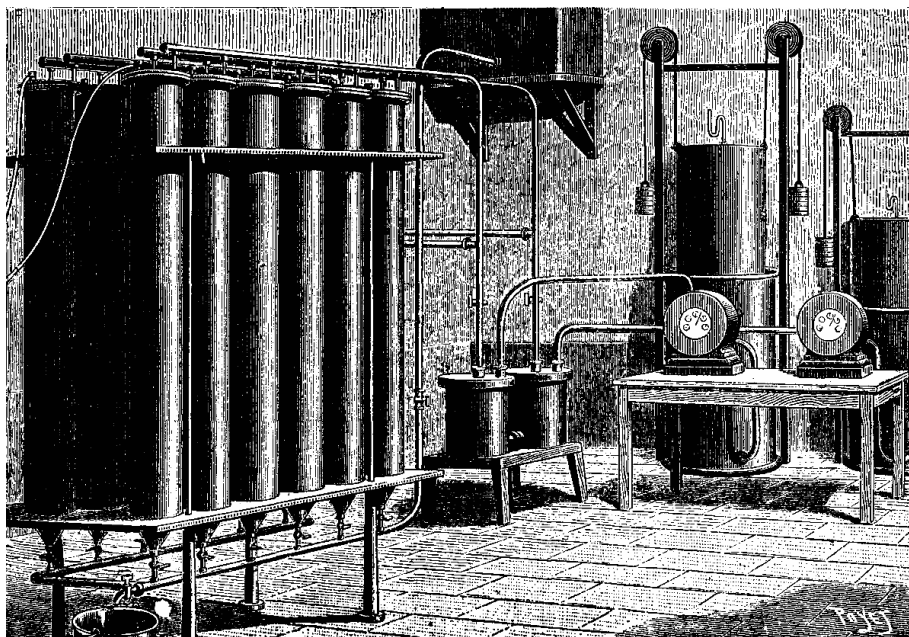
- visoka energetska vrijednost
- neograničene količine dostupne u spojevima
- izgaranjem daje kemijski čistu vodu
- cjevovodima se može razvoditi na daljinu
- lakše se skladišti i čuva nego električna energija

Vodik se smatra gorivom budućnosti. Budući da ga u slobodnom obliku u prirodi nema, u ovom radu se prikazuje i konkretizira njegova proizvodnja elektrolizom. U ovom radu prikazana je konstrukcija uređaja za razlaganje vode odnosno elektrolizatora. Elektrolizator je bipolarnog alkalnog tipa te koristi 25 % kalijevu lužinu kao tekući elektrolit. Elektrode su mu izrađene od metalne pjene, dimenzija Ø70 mm x 2 mm. Osim same konstrukcije prikazan je i okvirni proračun proizvodnje vodika elektrolizatora takve vrste.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Povijest [4, 8]

U posljednjih 200 godina bilježi se konstantan razvoj tehnologija koje uključuju elektrolizu vode odnosno uređaja koji sudjeluju u samom procesu – elektrolizatora. Nakon otkrića električne energije, J.R. Deiman i A.P. van Troostwijk 1789. izveli su eksperiment kojim su uspjeli stvoriti plin iz vode. U tom eksperimentu su pomoću elektrostatičkog generatora i zlatnih žica koje su uronili u posudu ispunjenu vodom uspješno izveli proces elektrolize vode. Nekoliko tjedana nakon što je Alessandro Volta izumio svoj članak 1800. godine, William Nicholson i Anthony Carlisle iskoristili su ga za razdvajanje vode. Kasnije se ustvrdilo da su ti plinovi vodik i kisik. Razvojem elektrokemije ustanovila se proporcionalna veza između utrošene električne energije i dobivene količine plinova, što je danas poznato kao Faradayavi zakoni elektrolize. Na taj način je koncept elektrolize konačno znanstveno definiran i opće prihvaćen. Izumom Gramme – ovog stroja 1869. elektroliza postaje ekonomična metoda za proizvodnju vodika. Do 1902. godine u funkciji je bilo više o 400 industrijskih elektrolizatora vode.



Slika 1. Postrojenje za industrijsku elektrolizu vode [10]

Razdoblje između 1920 – 1970 smatra se "zlatnim razdobljem" razvoja tehnologije elektrolize vode. U tom razdoblju razvijena je većina koncepata za elektrolizu vode koji su danas već tradicionalno u uporabi. Jedan od tih koncepata uključuje primjenu membrane, koja ima dvostruku funkciju te istovremeno razdvaja nastale plinove i propušta ione. Tijekom razvoja ovog koncepta uspostavljeno je da je korist dobivena razdvajanjem plinova veća od gubitaka uslijed ohmskih otpora koji se javljaju na membrani. Prva komercijalna membrana bila je izrađena od azbesta koji kao materijal nije bio postojan na kemijsku koroziju uslijed izloženosti alkalnom mediju te povišenim temperaturama. Nakon otkrivanja izrazito negativnih posljedica azbesta na ljudsko zdravlje on je postepeno zamijenjen drugim materijalima (polimeri, metalni oksidi). Tijekom godina, također se veliki trud uložio u razvoj materijala od kojih su izrađene elektrode. U početku su se elektrode izrađivale od nehrđajućeg čelika zbog njegove niske cijene i niskog prenapona, ali zbog niske otpornosti na koroziju ubrzo se počeo zamjenjivati drugim materijalima. Neki od tih materijala koji se do danas koriste su nikal, platina te njihove legure. Posljednjih godina su se i oni počeli zamjenjivati učinkovitijim novo razvijenim materijalima kao što su metalni oksidi i metalne pjene.

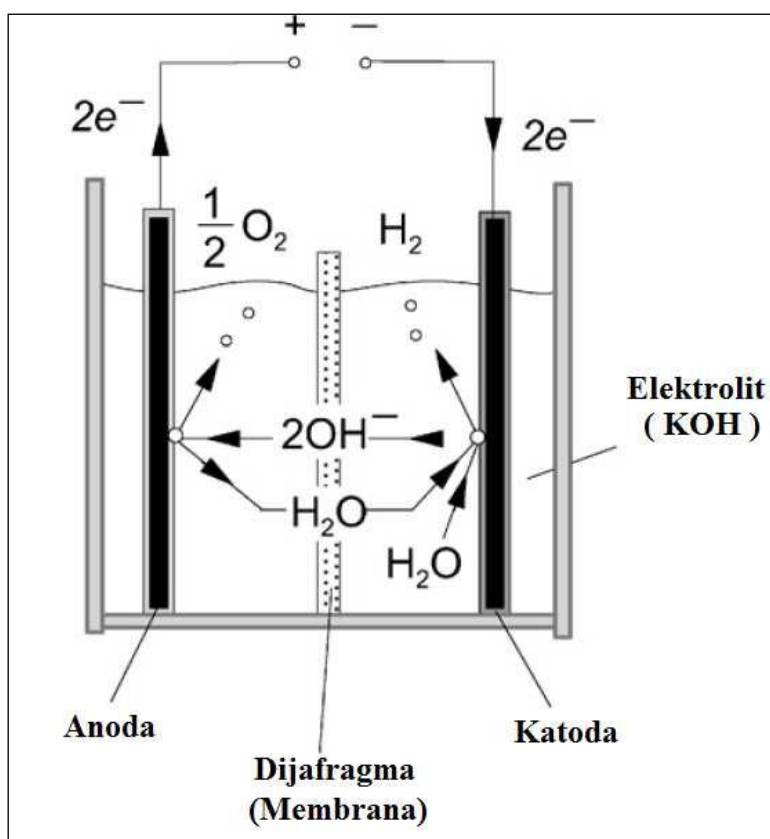
Velika potreba za gnojivom na bazi amonijaka započela je nagli razvoj postrojenja za elektrolizu vode u prvoj polovici dvadesetog stoljeća. Već dvadesetih godina u Kanadi kreće u pogon jedno takvo postrojenje za elektrolizu vode kapaciteta od 100 MW. Zdansky/Lonza 1948. uspjeli su proizvesti prvi industrijski elektrolizator pod tlakom. Aswan je uspješno instalirao 144 elektrolizatora, osamdesetih godina prošlog stoljeća, nominalne snage 162 MW (kapacitet proizvodnje vodika 32 400 m³/h).

Sami razvoj alkalnih sustava elektrolize započinju krajem 70 – tih godina, a današnje konstrukcije alkalnih elektrolizatora objašnjene su u ovom radu u poglavlju 3.

2.2. Osnove elektrolize

2.2.1. Kemijska teorija elektrolize vode

Elektroliza vode je elektrokemijski postupak kojim se voda (H_2O) razlaže na vodik (H_2) i kisik (O_2) uslijed djelovanja vanjskog izvora istosmjerne električne energije. Za razlaganje vode pomoću elektrolize potreban je takozvani elektrolitički članak koji se sastoji od dvije elektrode koje su spojene na vanjski strujni krug i uronjene u elektrolitsku otopinu. Po potrebi se može koristiti membrana koja ima ulogu razdvajanja nastalih plinova. Za bolje razumijevanje tematike ovog rada, kemijsku teoriju elektrolize je najbolje objasniti na jednostavnom shematskom prikazu koji prikazuje jednostavni elektrolitički članak (Slika 2).



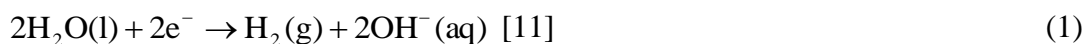
Slika 2. Shematski prikaz elektrolize vode na jednostavnom elektrolitičkom članku [6]

Na katodi odnosno negativnoj anodi se odvija redoks reakcija koja se naziva redukcija. Katoda oslobađa elektron kojeg prima vodikov kation iz molekule vode, pritom dolazi do

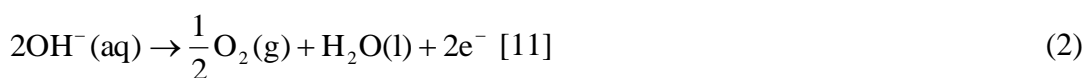
razlaganja molekule vode te nastaje atom vodika. Preostali hidroksidni ion, koji je negativno nabijen, putuje kroz elektrolit prema pozitivno nabijenoj elektrodi - anodi. Na anodi se odvija redoks reakcija pod nazivom oksidacija. Pritom hidroksidni ion otpušta elektron, te se oslobađa atom kisika i atom vodika. Budući da su atomi nemetala visoko reaktivni, oni se automatski vežu za druge slobodne atome. Zato je za ovu analizu najtočnije promatrati kemijsku reakciju četiri hidroksidna iona, gdje se oslobađanjem 4 elektrona stvara jedna stabilna molekula kisika te dvije molekule vode (molekule vode nastaju od preostala dva atoma kisika i četiri atoma vodika).

Kemijske reakcije elektrolize, odnosno polureakcije koje se odvijaju na elektrodama prikazane su u slijedećim jednažbama.

Na katodi se vrši redukcija i nastaje vodik (u plinovitom stanju):



a na anodi oksidacija pri kojoj nastaje kisik (također kao plin):



Konačni izraz za tu reakciju glasi:



2.2.2. Termodinamičke osnove elektrolize [6, 11]

Termodinamika daje okvir za opis energetske ravnoteže u reakcijama i toplinskih efekata koji se javljaju u elektrolizatoru i sličnim uređajima. Također, postavlja temelje za definiranje pokretačkih sila transporta kroz elektrolit i omogućuje definiranje njegovih značajki.

Moguće je uvesti nekoliko pretpostavka za reakcije razlaganja vode:

- 1) vodik i kisik su idealni plinovi
- 2) voda je nestlačivi fluid
- 3) plinovite i tekuće faze su odvojene

2.2.2.1. Reverzibilni napon

Da bi uspješno razdvojili vodu na vodik i kisik pomoću elektrolize potrebno je osigurati minimalni reverzibilni napon koji se također naziva elektromotorna sila.

Elektrokemijski članak je posuda s elektrolitom i dvije elektrode. Takav članak može funkcionirati kao elektrolitički članak (elektrolizator) kada se na elektrode dovodi struja iz izvora izvana pa se iz elektrolita proizvode tvari (u našem slučaju kisik i vodik). Isti elektrokemijski članak može funkcionirati i kao gorivni članak, tj. između elektroda se može uspostaviti elektromotorna sila (napon ako nema potrošača, napon i struja ako ima potrošača u el. krugu) ako se na jednu elektrodu dovede plin vodik, a na drugu plin kisik. Elektromotorna sila elektrokemijskog članka pri nultoj struji predstavlja teorijsku elektromotornu silu. Koristi se za računanje maksimalne električne energije, koja se može dobiti kemijskom reakcijom (gorivni članak); teorijski potrebna minimalna energija za pokretanje elektrolize (elektrolizator). Ova energija se često predstavlja kao električni rad i izražava se slijedećom jednačbom (4) [12] :

$$W_{\text{maks}} = W_{\text{električne}} = z \cdot F \cdot E^{\circ} \quad [12] \quad (4)$$

Poznato je da maksimalna količina rada koja se može dobiti iz elektrokemijskog članka predstavlja Gibbsovu energiju. Relacija između Gibbsove energije i minimalnog napona (elektromotorne sile) kod gorivnog članka prikazana je jednačbom (5).

$$\Delta G_s = z \cdot F \cdot E^{\circ} \quad [12] \quad (5)$$

Za elektrolizu vode potrebno je najmanje 237,13 kJ ulazne električne energije da bi se rastavio jedan mol vode. Budući da svaki mol vode treba dva mola elektrona, to znači da je potrebno najmanje 118,57 kJ/mol ($7,4 \times 10^{23}$ eV/mol).

Iz tog slijedi:

Reverzibilni napon

$$U_{\text{rev}} = \frac{\Delta G_s}{z \cdot F} = \frac{237,000\text{J}}{2 \cdot 96,485\text{C}} = 1,23\text{V} \quad (6)$$

2.2.2.2. Termoneutralni napon

Ukupni iznos energije potreban za proces razlaganja vode jednak je promjeni entalpije. Ukupna promjena entalpije je razlika entalpija između produkata (vodika i kisika) i reaktanata (voda) što se također odnosi i na ukupnu promjenu entropije. Promjena Gibbsove energije izražava se prema izrazu

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (7)$$

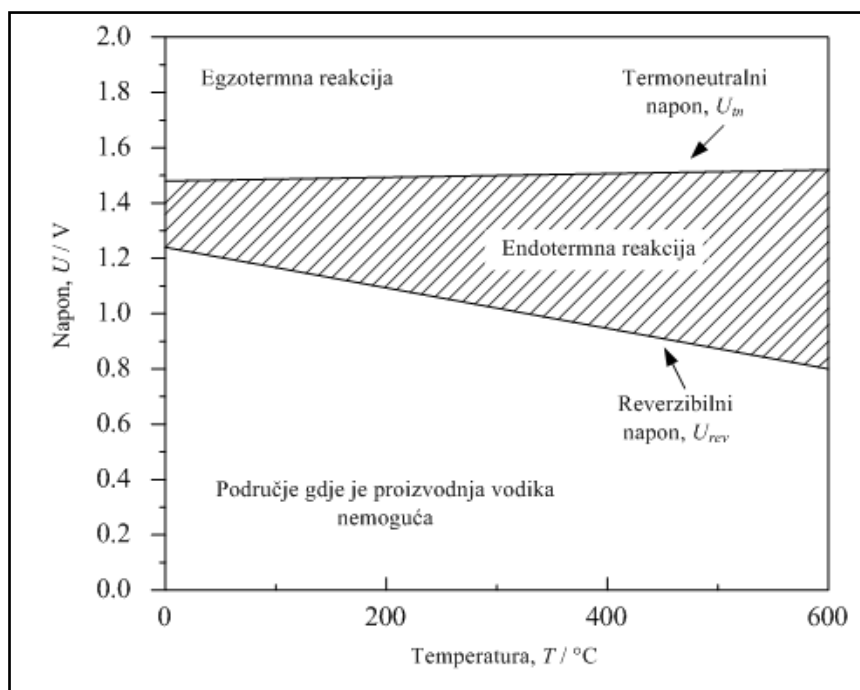
U praksi za postizanje elektrolize potreban je ukupan iznos energije koji je jednak promjeni entalpije ΔH s. Jednadžbom (7) možemo izraziti termoneutralni napon:

$$U_{\text{tn}} = \frac{\Delta H_{\text{s}}}{z \cdot F} = \frac{286,000\text{J}}{2 \cdot 96,485\text{C}} = 1,48\text{V} \quad (8)$$

Pojednostavljeno možemo reći da su U_{rev} i U_{tn} ustvari vrijednosti ΔG i ΔH izražene u voltima.

Gornji iznosi potrebnih napona daju samo teorijske okvire za potrebnom energijom. U praksi, naponi članka viši su i kreću se u granicama $U = 1.8 - 2.2 \text{ V}$.

Na Slici 3. prikazana je veza između napona elektrolizatora i radnih temperature. Linije reverzibilnog i termoneutralnog napona dijele dijagram na tri područja. Reverzibilni napon predstavlja minimalni napon kod kojeg teoretski dolazi do početka elektrolize. U području ispod linije U_{rev} nije moguća elektroliza. Na dijagramu je također vidljivo da se U_{rev} smanjuje s povećanjem radne temperature. U_{tn} predstavlja minimalni napon koji se mora dovesti elektrolizatoru ispod kojeg će reakcija elektrolize biti endotermna, a iznad kojeg će biti egzotermna.

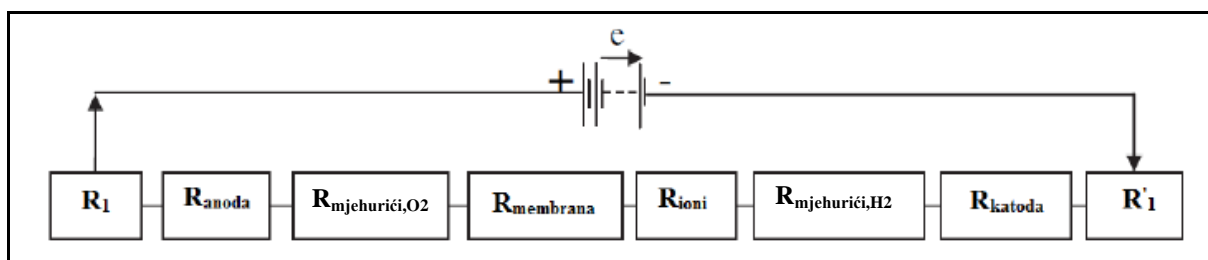


Slika 3. Napon članka elektrolizatora za proizvodnju vodika elektrolizom vode kao funkcija temperature [1]

2.2.3. Otpori u procesu elektrolize [4]

Da bi se omogućila elektrokemijska reakcija određene prepreke se moraju prevladati, za što je potrebna dovoljna količina el. energije. Spomenute prepreke uključuju električni otpor strujnog kruga, minimalnu el. energiju potrebnu za pokretanje elektrokemijske reakcije na površini elektroda, dostupnost površine elektroda uslijed njihovog prekrivanja mjehurićima nastalih plinova te otpor gibanja iona unutar otopine elektrolita.

Slika 4. prikazuje otpore odnosno prepreke koji se javljaju u tipičnom sustavu za elektrolizu vode.



Slika 4. Shematski prikaz otpora u procesu elektrolize

Ukupni otpor procesa elektrolize vode prikazan je slijedećom jednadžbom:

$$R_{UK} = R_1 + R_{anode} + R_{mjehurići, O_2} + R_{ioni} + R_{membrana} + R_{mjehurići, H_2} + R_{katode} + R_1' \quad (9)$$

Ovi otpori unutar sustava elektrolize mogu biti podijeljeni u tri skupine, i to na ukupne električne otpore, otpori uslijed elektrokemijske reakcije te otpori uslijed transporta odnosno fizički otpori. Važno je da se svi ovi otpori analiziraju unutar termodinamičkih i kinetičkih načela.

Električni otpori te otpori uslijed gibanja uzrokuju oslobađanje topline prema Joule-ovom zakonu što pri tom smanjuje ukupnu učinkovitost elektrolizatora.

2.2.3.1. Električni otpor

Električni otpor unutar sustava za elektrolizu vode može se izračunati koristeći Ohm-ov zakon

$$R = \frac{U}{I} \quad (10)$$

Električni otpor obuhvaća otpore R_1 i R_1' iz gornje jednadžbe, a podrazumijeva el. otpor vanjskog strujnog kruga odnosno otpor na električnim vodičima te na spojevima katode i anode.

2.2.3.2. Otpor uslijed transporta (fizički otpor)

To su otpori koji se javljaju uslijed nakupljanja mjehurića nastalih plinova na površinama elektroda te unutar elektrolita, otpori uslijed gibanja iona te otpori nastali uslijed upotrebe membrane za odvajanje nastalih plinova. To su $R_{mjehurići, O_2}$, R_{ioni} , $R_{membrana}$, $R_{mjehurići, H_2}$ iz jednadžbe (9).

2.2.3.3. Otpor uslijed elektrokemijske reakcije

Otpor elektrokemijske reakcije nastaje uslijed potrebnog prenapona elektroda, koje je potrebno dovesti iznad reverzibilnog teoretskog napona kako bi se započeo proces akumuliranja vodika odnosno kisika. Ti otpori svojstveni su elektrokemijskoj reakciji odnosno vrsti materijala od kojeg su izrađene elektrode. Otpori elektrokemijske reakcije su R_{anode} i R_{katode} .

2.3. Faradayevi zakoni elektrolize [2, 9]

Istraživanja Michaela Faradaya (1791 - 1867) dovela su do otkrića kvantitativnih odnosa između količine elektriciteta koja prolazi otopinom i količina proizvoda materije koja reagira na elektrodama. Ti odnosi su izraženi u dva zakona imenovana prema njemu.

2.3.1. Prvi Faradayev zakon elektrolize

Količina strujom izdvojene ili otopljene tvari na elektrodama m proporcionalna je količini proteklog elektriciteta Q , tj. jačini struje I , vremenu provođenja struje t i elektrokemijskom ekvivalentu z koji ovisi o tvari izdvojenoj na elektrodi. Konkretno u ovom slučaju, to bi značilo da je količina izlučenog vodika na elektrodama izravno proporcionalna količini elektriciteta koji je prošao kroz otopinu.

$$m_{\text{H}_2} = z \cdot Q \quad (11)$$

gdje je:

$$z = 0,00001036 \text{ [g/C]}$$

$$Q = I \cdot t \quad (12)$$

Iz tog slijedi:

$$m_{\text{H}_2} = z \cdot I \cdot t \text{ [6]} \quad (13)$$

2.3.2. Drugi Faradayev zakon elektrolize

Drugi Faradayev zakon formulira temeljni odnos između količina različitih tvari koje reagiraju na elektrodama uz istu količinu elektriciteta. Elektrokemijski ekvivalenti različitih kemijskih elemenata (z) direktno su proporcionalni atomskim težinama (A), a obrnuto proporcionalni valencijama (v). Drugi Faradayev zakon izražen je jednadžbom (14).

$$z_1 : z_2 = \frac{A_1}{v_1} : \frac{A_2}{v_2} \text{ [9]} \quad (14)$$

2.4. Kinetika elektroda [1, 2, 4]

Brzina elektrokemijske reakcije koja je obilježena gustoćom struje ovisi o svojstvima te o prethodnoj obradi površine elektroda. Osim toga, ovisi i o sastavu elektrolita uz samu elektrodu.

Da bi bolje razumjeli kinetiku elektrode potrebno je najprije analizirati dvije vrlo važne stavke elektrokemije Butler- Volmerovu jednadžbu te Tafelov dijagram.

Butler – Volmerova jednadžba

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T} \right] - \exp \left[\frac{-\alpha \cdot z \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T} \right] \right\} \quad [1] \quad (15)$$

Ova jednadžba predstavlja relaciju koja povezuje gustoću struje izmjene i i prenapon elektroda. Gustoća struje izmjene i_0 u ovom slučaju predstavlja struju kod reverzibilne (teoretske) reakcije razdvajanja vode.

Reakcija redukcije se usporava povećanjem prenapona dok se reakcija oksidacije pri istim uvjetima ubrzava tako da se pri vrlo visokim prenaponima reakcija redukcije može zanemariti. U tom slučaju Butler – Volmerova jednadžba prelazi u oblik:

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T} \right] \right\} \quad (16)$$

Kada se jednadžba logaritmiri i preuredi, ona prelazi u oblik:

$$\eta = \frac{-2,303 \cdot R \cdot T}{z \cdot F \cdot (1-\alpha)} \log i_0 + \frac{-2,303 \cdot R \cdot T}{z \cdot F \cdot (1-\alpha)} \log i \quad [1] \quad (17)$$

Jednadžba (17) predstavlja Tafelovu jednadžbu koja se još može zapisati u pojednostavljenom obliku:

$$\eta = a + b \log i \quad (18)$$

gdje je:

a – Tafelov odsječak,

b – Tafelov nagib.

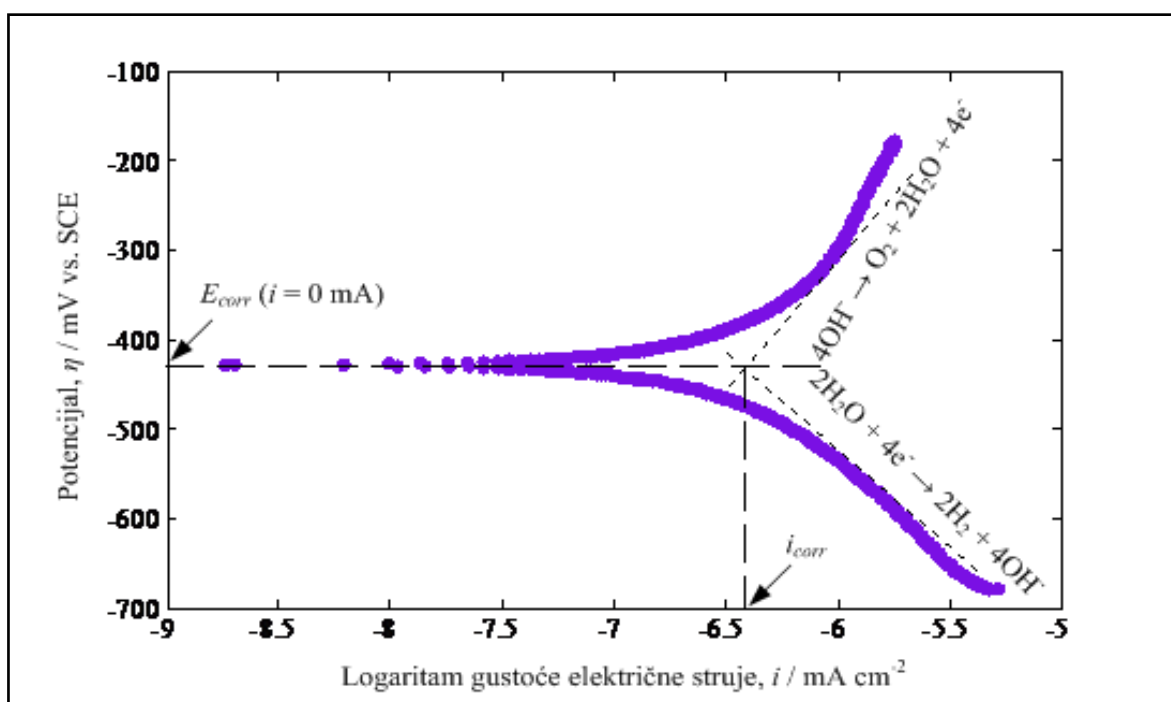
Linearna veza između prenapona η i logaritma gustoće struje određena je nagibom b i gustoćom struje izmjene i_0 .

Kod elektrolizatora razlikujemo prenapon anode i prenapon katode jer se na svakoj od elektroda odvija različita elektrokemijska reakcija.

$$\eta_a = a_a + b_a \log i \quad (19)$$

$$\eta_c = a_c + b_c \log i \quad (20)$$

Određivanje kinetičkih parametara elektroda danas provode elektrokemičari elektrokemijskim metodama s istosmjernom strujom i to anodnom i katodnom polarizacijom (Tafelova polarizacija). Primjer takvog ispitivanja Ni pločice možemo vidjeti na Slici 5.



Slika 5. Tafelov dijagram za Ni pločicu [1]

Već je bilo spomenuto da brzina proizvodnje vodika ovisi o struji odnosno gustoći struje, ali bitno je naglasiti da brzina reakcije također ovisi o prenaponu elektroda. Nadalje prenapon je ovisan o aktivacijskoj energiji te vrsti materijala.

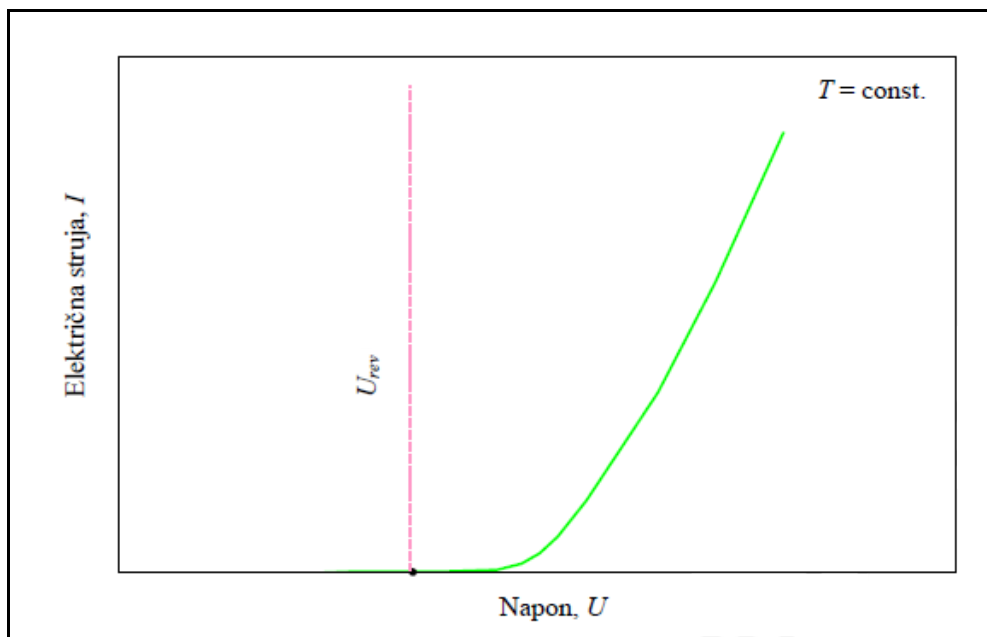
2.5. Matematički model izvedenog elektrolizatora [3]

Osnovni uvriježeni matematički model koji opisuje UI - karakteristiku elektrolizatora za određenu temperaturu predložili su Griesshaber i Sick (1991), a glasi:

$$U_{\text{Ely}} = U_{\text{rev}} + \frac{r}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} + s \cdot \log \left(\frac{t}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} + 1 \right) \quad [3] \quad (21)$$

Treba naglasiti da se ovaj matematički model može primijeniti samo za modeliranje UI - karakteristika već postojećih elektrolizatora na temelju izmjerenih podataka. Najprije je potrebno odrediti koeficijente, koji se razlikuju za svaki elektrolizator.

Grafički prikaz UI - karakteristike elektrolizatora, odnosno jednadžbe matematičkog modela prema jednadžbi (21) možemo vidjeti na Slici 6.



Slika 6. UI - karakteristika elektrolizatora [1]

Na prikazanoj UI karakteristici bi u idealnim uvjetima svaka njena pripadajuća točka (par napona i struje) bila na konstantnoj temperaturi elektrolita koja je na slici i označena sa $T = \text{const}$. No, u realnim uvjetima teško je ostvariti snimanje UI karakteristike pri konstantnoj temperaturi. U stvarnom elektrolizatoru temperatura elektrolita na ulazu niža je od temperature elektrolita na izlazu, dakle postoji određeni temperaturni profil elektrolita u vremenu uz konstantni napon i električnu struju. [1]

U svrhu točnijeg modeliranja temperature ovisnosti ukupnog prenapona, jednadžba (21) se može premodelirati u detaljniju UI karakteristiku koja uzima u obzir temperaturnu ovisnost ohmskih otpora elektrolita i koeficijenata prenapona na elektrodama, prema autoru Ulleberg (1997.). Poboljšana jednadžba (21) ima oblik:

$$U_{\text{Ely}} = U_{\text{rev}} + \frac{(r_1 + r_2 T)}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} + s \cdot \log \cdot \left(\left[\frac{\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2} \right)}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} \right] + 1 \right) \quad [3] \quad (22)$$

2.6. Matematički model elektrolizatora u razvoju

U odjeljku 2.5 smo izložili postojanje matematičkog modela za već izvedene elektrolizatore. No, jasno je da se taj model ne može primijeniti na elektrolizatore koji još nisu konstruirani odnosno na onim kod kojih još nisu izvršena mjerenja. Da bismo izračunali UI - karakteristiku nekog elektrolizatora koji je još u razvoju moramo krenuti od nekih osnovnih zakonitosti kao što su Tafelova jednadžba, teoretski reverzibilni napon i ukupni otpori koji se javljaju u elektrolizatoru. Sve te zakonitosti su detaljnije pojašnjene u prethodnim poglavljima, te se one javljaju u jednadžbi za određivanje UI – karakteristike elektrolizatora u razvoju:

$$U_{\text{Ely}} = U_{\text{rev}} + \frac{r}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} + \eta_a + \eta_c \quad [1] \quad (23)$$

Ovaj prikladniji matematički model elektrolizatora omogućava da se u njega uvrste svi utjecajni parametri na UI karakteristiku budućeg (u fazi projektiranja) elektrolizatora dobiveni u nezavisnim elektrokemijskim eksperimentima u laboratorijskim uređajima na malim uzorcima [1].

2.7. Učinkovitost elektrolizatora [3, 4, 5]

Učinkovitost možemo općenito izraziti kao odnos između dobivene energije i dovedene energije. U tom bi slučaju na primjeru elektrolizatora, dobivena energija predstavljala energiju sadržanu u proizvedenom vodik, a dovedena energija bi bila električna energija dovedena elektrolizatoru kojom je taj vodik proizveden.

Kod elektrolize se međutim definira nekoliko vrsta učinkovitosti:

2.7.1. Faraday – eva učinkovitost

$$\eta_F = \frac{V_{H_2}}{(V_{H_2})_{\text{proračunska}}} [5] \quad (24)$$

Neki autori Faraday – evu učinkovitost nazivaju strujnom učinkovitosti. Ona predstavlja omjer stvarno proizvedene količine vodika i proračunske količine vodika proizvedenog pri istoj struji.

2.7.2. Naponska učinkovitost

$$\eta_N = \frac{U}{U_{\text{rev}}} [5] \quad (25)$$

Predstavlja omjer minimalnog napona kod kojeg dolazi do nastajanja mjehurića plina i reverzibilnog napona.

2.7.3. Energetska učinkovitost

U literaturi postoje različiti načini na koje se izražava energetska učinkovitost elektrolizatora. Ovdje je navedeno nekoliko primjera:

Ohta u svojem radu prikazuje energetska učinkovitost kao umnožak Faraday – eve i naponske učinkovitosti:

$$\eta_E = \eta_F \cdot \eta_N \quad [5] \quad (26)$$

Autori Zeng i Zhang prikazuju energetska učinkovitost dolje navedenom jednačbom:

$$\eta_E = \frac{U_m}{U} \quad [4] \quad (27)$$

Jednačba (27) predstavlja odnos između termoneutralnog napona potrebnog za razlaganje molekula vode putem elektrolize i stvarno potrebnog napona. Energetska učinkovitost je u mogućnosti biti veća od 1 odnosno 100% jer je sustav u mogućnosti apsorbirati toplinu iz okoline ako se radna točka nalazi u endotermnom području dijagrama na Slici 3., odnosno ispod linije U_m .

Kada se govori o energetska učinkovitosti najtočnije bi bilo promatrati energetski odnos tj. odnos između dobivene energije koju sadrži vodik i utrošene energije za dobivanje te količine vodika. Međutim iz praktičnih razloga računa se kvocijent snaga kao prema jednačbi (28):

$$\eta_E = \frac{(q_m)_{H_2} \cdot (H_d)_{H_2}}{P_{EL}} \quad (28)$$

Snaga vodika se računa kao umnožak mase proizvedenog vodika u jedinici vremena [kg/s] i donje ogrijevne vrijednosti vodika [kJ/kg] pa je ukupno brojnik gornje jednačbe u jedinicama za snagu [J/s] = [W]. Utrošena energija se onda također mora dovesti u toj istoj jedinici vremena pa u nazivniku mora biti snaga električne energije utrošene za proizvodnje te količine vodika u [W], prema jednačbi (29):

$$P_{EL} = U \cdot I \quad (29)$$

3. ELEKTROLIZATOR

Elektrolizator je uređaj, a u širem smislu sustav za razdvajanje vode na njene sastavne plinove: vodik i kisik. Elektrolizatori se mogu sastojati od više članaka u kojima se odvija proces elektrolize. Broj članaka odnosno dimenzije elektrolizatora ovisne su o željenoj količini proizvedenog vodika. Sami proces elektrolize je detaljno objašnjen u poglavlju 2.2. Osnove elektrolize. Članak elektrolizatora sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova neovisno o tipu elektrolizatora ili vrsti elektrolita, a to su elektrode (katoda i anoda) te membrana. Osim tih standardnih dijelova, za odvijanje procesa elektrolize potrebno je dovesti istosmjernu struju na elektrode uz pomoć izvora. Također je članku potrebno dovesti otopinu elektrolita. Elektrolizatoru možemo dovoditi dvije vrste elektrolita: lužine ili kiseline. Lužina se najčešće koristi kod elektrolizatora kako bi se izbjegla korozija uslijed korištenja kiselina te kako bi se poboljšala električna vodljivost otopine jer sadrži visoko (mobilne) pokretne ione. Elektrolizator koji za proces elektrolize koristi lužinu zove se alkalni elektrolizator.

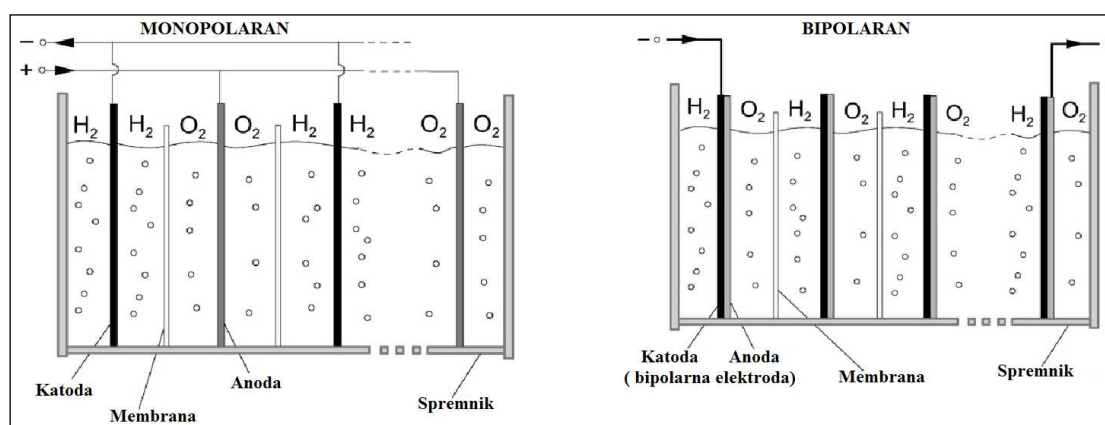
3.1. Alkalni elektrolizator

Alkalni elektrolizatori predstavljaju današnju temeljnu tehnologiju za elektrolizu vode. Kao elektrolit najčešće koriste otopinu kalijevog hidroksida (KOH) u vodi odnosno otopinu natrijevog hidroksida (NaOH) u vodi - natrijeva lužina. Energetska iskoristivost alkalnih elektrolizatora kreće se od 60 % do 90 %. Konvencionalni alkalni elektrolizatori najvišu iskoristivost postižu pri radnim temperaturama od 60 °C do 90 °C i tlaku približno jednakom tlaku okoline. Naponi pri kojima rade su od 1,8 V do 2,2 V pri čemu su gustoće električne struje ispod 0,4 A/cm². Za razliku od konvencionalnih, napredni alkalni elektrolizatori rade pri relativno niskim naponima od 1,6 V uz visoke gustoće električne struje i do 2 A/cm². Rasponi proizvodnje vodika u alkalnim elektrolizatorima kreću se od 0,01 m³/h do 10 m³/h s tim da velike jedinice dostižu i proizvodnju između 10 i 100 m³/h [1].

Alkalni elektrolizatori se također razlikuju prema načinu spajanja na strujni krug odnosno vanjski izvor električne energije.

3.2. Vrste alkalnih elektrolizatora prema načinu spajanja na strujni krug:

1. Bipolarni elektrolizator – članci su povezani u seriju i u geometrijskom i u električnom smislu. Ista elektroda ima ulogu i anode i katode.
2. Monopolarni elektrolizator - članci su povezani u seriju u geometrijskom, a u električnom smislu u paralelu. Jedna elektroda ima ulogu anode, a druga katode.



Slika 7. Monopolarni i bipolarni elektrolizator [6]

Većina današnjih komercijalnih elektrolizatora su bipolarni. Njihova prednost je što su kompaktniji od monopolarnih što za posljedicu ima manju udaljenost koju električna struja mora prijeći kroz ožičenje i elektrode (elektrode su veoma blizu u odnosu jedna na drugu i membrana je vrlo tanka). To smanjuje gubitke koji se javljaju uslijed unutarnjih električnih otpora što povećava njegovu iskoristivost. Nedostatak ovakvog koncepta je što zahtijeva sofisticiranu i kompleksnu konstrukciju zbog kompaktnosti i visokih tlakova koji vladaju u elektrolizatoru kako bi se spriječilo curenje plinova i elektrolita između članaka. Za razliku od bipolarnih, monopolarni elektrolizatori su jednostavni za izgradnju, no velike jakosti električne struje uz male iznose napona uzrokuju velike električne gubitke [6].

Bitna karakteristika koja razlikuje ova dva tipa elektrolizatora je ukupan potrební napon koji se mora primijeniti za pokretanje elektrokemijskih reakcija:

- a) bipolarni – iznosi napona koji se primjenjuju na pojedine članke (isti iznos napona za svaki članak) zbrajaju se kako bi se dobio ukupan potrební napon
- b) monopolarni – ukupan potrební napon za pokretanje reakcija je jednak naponu jednog članka

Konfiguracija elektrolizatora uključuje i udaljenosti između elektroda pojedinih članaka. Manje udaljenosti uzrokuju manje otpore pri transportu iona što znači da se za isti nametnuti napon dobiva veća jakost električne struje. Potrebno je naglasiti da udaljenosti ne smiju biti premale kako se ne bi pojavila električna iskra i prouzrokovala eksploziju [7].

4. PRORAČUNI

Cilj diplomskog rada je da se na temelju raspoloživih podataka konstruira elektrolizator i izračuna njegov kapacitet proizvodnje vodika. Raspoloživi podaci su UI - karakteristika eksperimentalnog laboratorijskog elektrolizatora, njegova konstrukcija i materijal elektroda, izmjerene elektrokemijske karakteristike materijala elektrode, unaprijed zadani promjer okruglih elektroda i zadani broj članaka (znači parova elektroda).

Potrebni proračun (formiranje jednadžbe UI - karakteristike budućeg elektrolizatora) se može izvesti na dva načina.

Prvi je da se eksperimentalno snimljena UI - karakteristika postojećeg laboratorijskog elektrolizatora, koji sadrži jedan članak, aproksimira jednadžbom (21) putem neke od metoda aproksimacije raspoložive u programu "Matlab", zatim da se ta jednadžba preračuna uzevši u obzir veću površinu elektroda (tlocrtna površina elektrode raste s 25 cm^2 na $38,5 \text{ cm}^2$) i zatim po naponu pomnoži s 3 (jer ima tri članka u seriji).

Drugi način je da se koristi jednadžbe (19), (20) i (23), izmjerene elektrokemijske karakteristike materijala elektrode (Ni-pjene) i zadani promjer elektrode $\varnothing 7 \text{ cm}$ da se dobije UI - karakteristika za jedan članak. Zatim bi se također kao u prvom pristupu, ova jednadžba po naponu množila s 3 čime bi se dobila tražena UI - karakteristika budućeg elektrolizatora.

4.1. Izmjereni podaci

Svi korišteni podaci u ovom poglavlju dobiveni su mjerenjem koje se provelo u Laboratoriju za energetska postrojenja na FSB – u na postojećem sustavu za provedbu elektrolize. Sustav, među ostalim, uključuje alkalni elektrolizator koji se sastoji od jednog članka čije su elektrode izrađene od Ni – metalne pjene. Samo mjerenje trajalo je pola sata (1800 s).

Mjerenje se provodilo na način da se na elektrolizatoru narinuo određeni napon te se u vremenu taj napon ciljano povećavao. Cilj takvog mjerenja je bio izmjeriti popratnu struju pri određenom naponu, odnosno ustanoviti UI – karakteristiku postojećeg elektrolizatora. Osim napona i struje, u vremenu su se mjerili i drugi parametri. Svi mjereni parametri su navedeni u Tablici 1.

Tablica 1. Mjereni podaci

t [s]	T _{izH₂} [°C]	T _{ulH₂} [°C]	T _{izO₂} [°C]	T _{ulO₂} [°C]	I _{Ely} [A]	U _{Ely} [V]
0,004	81,461	46,921	65,416	53,073	15,07	2,8
1,099	81,351	46,977	65,57	53,069	15,1	2,8
2,169	81,183	46,771	65,467	52,973	15,1	2,8
3,24	81,251	46,731	65,552	53,123	15,09	2,8
4,311	81,134	46,473	65,592	52,827	15,07	2,8
5,382	81,238	46,322	65,601	53,137	15,04	2,8
6,452	80,927	46,64	65,626	52,856	15,03	2,8
7,523	81,04	47,28	65,667	53,079	15,05	2,8
.
.
.
1794,371	50,673	36,854	47,787	37,02	0,2	1,501
1795,441	50,626	37,03	47,856	37,176	0,2	1,501
1796,512	50,632	36,913	47,754	37,056	0,2	1,501
1797,583	50,598	37,037	47,821	37,192	0,2	1,501
1798,653	50,556	36,973	47,697	37,113	0,2	1,501
1799,724	50,547	37,095	47,789	37,249	0,2	1,501
1800,794	50,517	36,998	47,698	37,131	0,2	1,501
1801,865	50,507	37,117	47,766	37,264	0,2	1,501

Ekspérimentom su se pratile promjene četiri temperature u vremenu, to su ulazna i izlazna temperatura elektrolita na vodikovoj te ulazna i izlazna temperatura elektrolita na kisikovoj strani. Tijekom obrade podataka odnosno proračuna uzimala se u obzir njihova srednja vrijednost.

$$T_{sr} = \frac{T_{izH_2} + T_{ulH_2} + T_{izO_2} + T_{ulO_2}}{4} \quad (30)$$

4.2. Određivanje UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora pomoću matematičkog modela izvedenog elektrolizatora

U poglavlju 2.5. Matematički model izvedenog elektrolizatora, objašnjeno je da se izmjereni podaci na realnim elektrolizatorima mogu aproksimirati pomoću jednadžbe matematičkog modela elektrolizatora:

$$U_{\text{Ely}} = U_{\text{rev}} + \frac{r}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} + s \cdot \log \left(\frac{t}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} + 1 \right) \quad (21)$$

Da bi to bilo moguće, najprije je potrebno odrediti tri koeficijenta koje jednačba sadrži (r, s, t). U ovom slučaju koeficijenti su izračunati Curve fitting alatom u računalnom programu "Matlab". Pritom vrijednosti U_{Ely} i I_{Ely} su vrijednosti podataka iz mjerenja, a $U_{\text{rev}} = 1,23 \text{ V}$ i $A_e = 3,5 \text{ m}^2$.

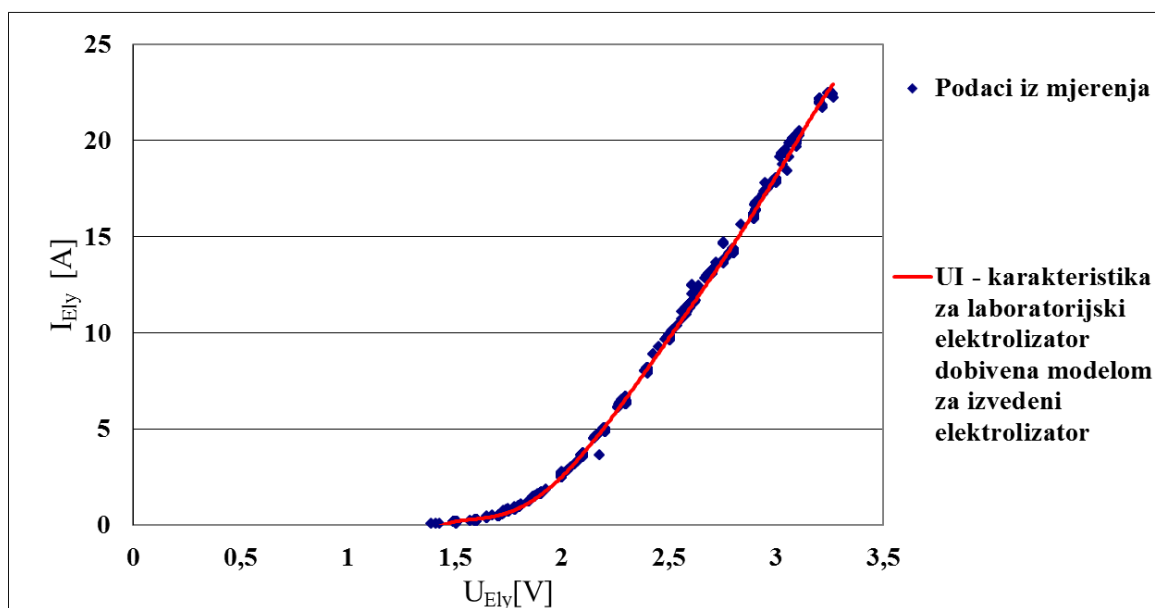
Dobivene vrijednosti koeficijenata su:

$$r = 0,1609 \Omega \text{ m}^2$$

$$s = 0,1462 \text{ V}$$

$$t = 111,8 \text{ m}^2/\text{A}$$

Na slijedećem dijagramu prikazani su podaci iz mjerenja te UI – karakteristika elektrolizatora koja je određena pomoću računalnog programa "Matlab".



Slika 8. UI – karakteristika postojećeg laboratorijskog elektrolizatora dobivena pomoću matematičkog modela elektrolizatora u razvoju

Iz dijagrama na Slici 8. vidljivo je da krivulja dobivena matematičkim modelom točno aproksimira izmjerene podatke.

4.3. Određivanje UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora pomoću matematičkog modela elektrolizatora u razvoju

Proračun se radio prema jednadžbama (23), (19) i (20):

$$U_{\text{Ely}} = U_{\text{rev}} + \frac{r}{A_e} \cdot I_{\text{Ely}} + \eta_a + \eta_c \quad (23)$$

gdje su :

$$U_{\text{rev}} = 1,23\text{V}$$

$$r = 0,1609 \Omega \text{ m}^2$$

$$A_e = 3,5 \text{ m}^2$$

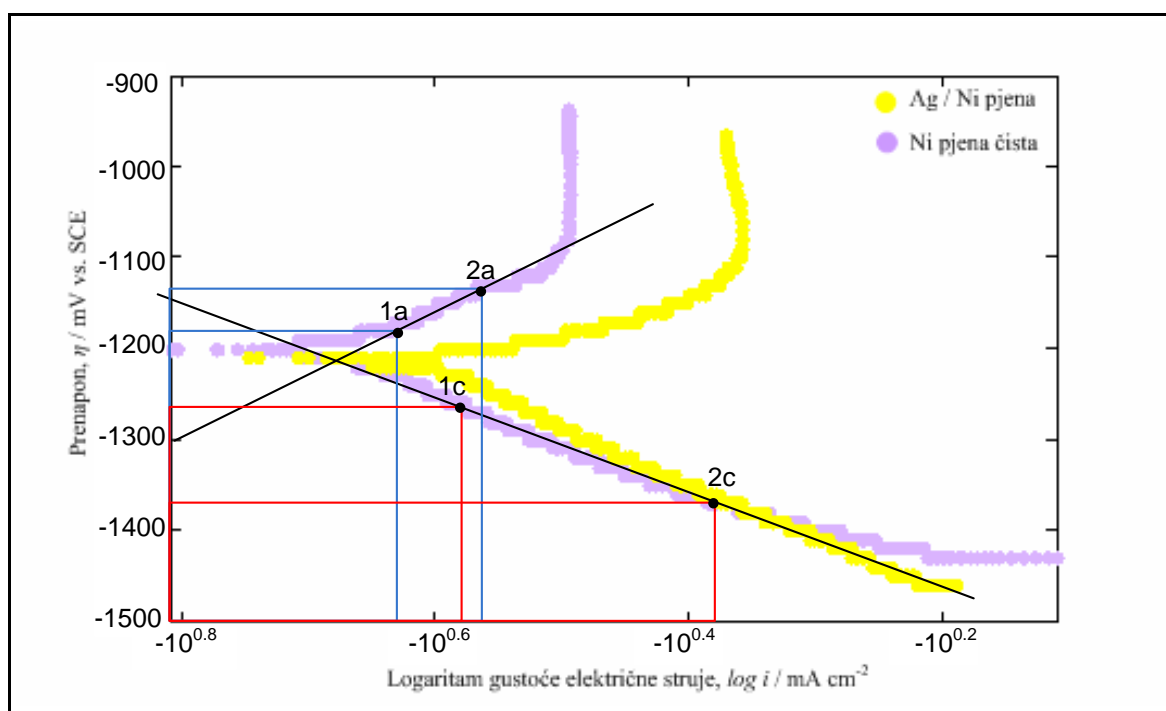
I_{Ely} [A] – vrijednosti iz provedenog mjerenja

$$\eta_a = a_a + b_a \log i \quad (19)$$

$$\eta_c = a_c + b_c \log i \quad (20)$$

4.3.1. Određivanje prenapona elektroda

Za određivanje prenapona elektroda bilo je potrebno elektrokemijsko ispitivanje metalne pjene. Mjerenje se vršilo u Laboratoriju za zaštitu materijala na FSB – u. Za elektrokemijska ispitivanja elektroda, odnosno određivanje elektrokemijskih (kinetičkih) parametara reakcije razvijanja vodika (eng. hydrogen evolution reaction, HER) koristile su se elektrokemijske metode s istosmjernom strujom (eng. DC methods) i to anodna i katodna polarizacija (Tafelova polarizacija). Rezultati mjerenja su prikazani na Slici 9. Na dijagramu su rezultati mjerenja za Ni – metalnu pjenu prikazani u odnosu na Ni – metalnu pjenu poboljšanu srebrom.



Slika 9. Tafelov dijagram za Ni – metalnu pjenu [1]

Tafelove jednadžbe za elektrode od Ni - pjene (η_c , η_a) dobivene su iz dijagrama na Slici 9.

Najprije se iz Tafelovih pravaca za katodu i anodu trebalo izračunati a – Tafelove odsječke, b – Tafelove nagibe.

Izračunate vrijednosti za:

Točke 1a i 2a

$$a_a = -879,55$$

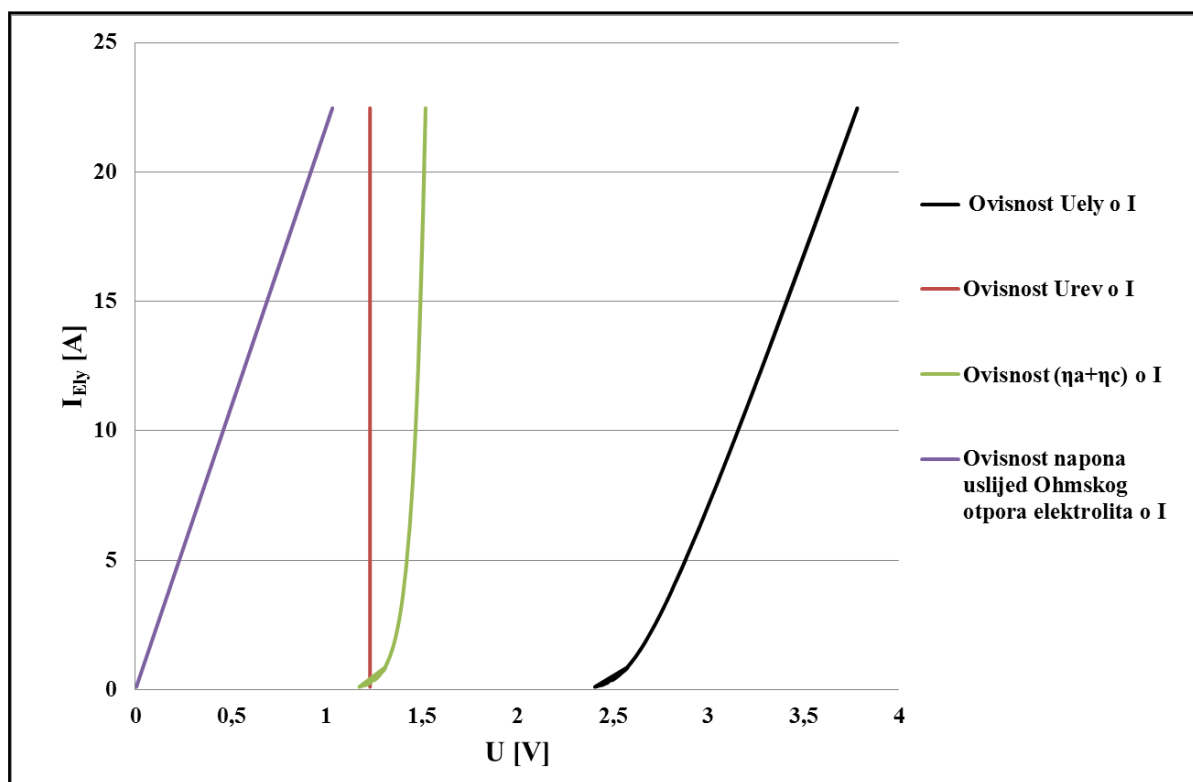
$$b_a = 67,598$$

Točke 1c i 2c

$$a_c = -1573,92$$

$$b_c = -82,924$$

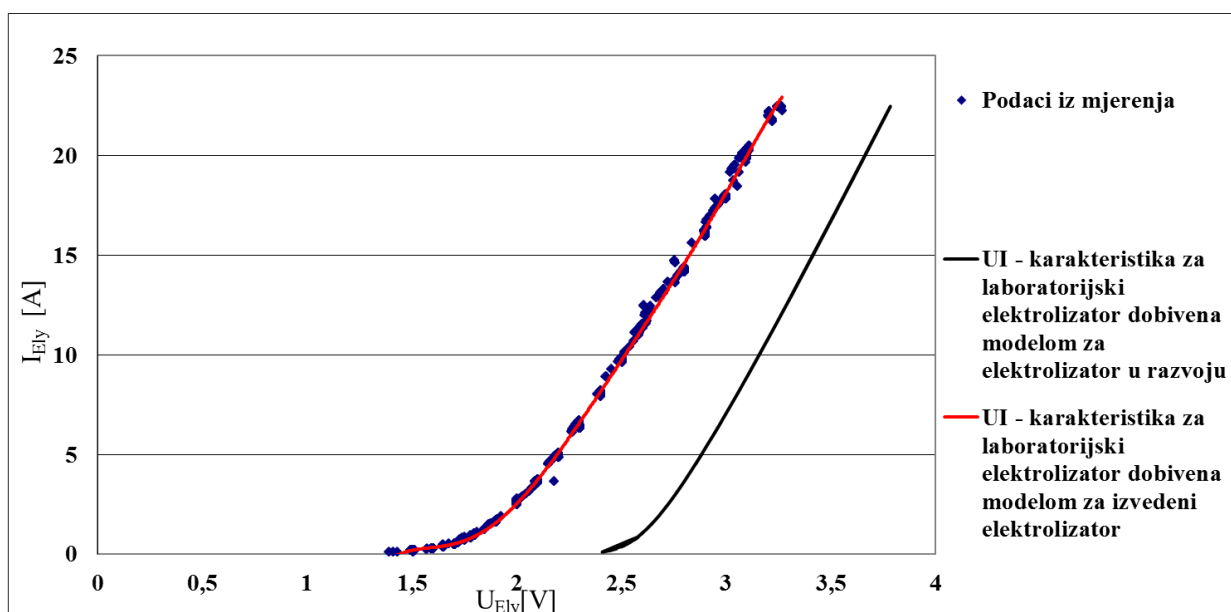
Rezultati proračuna prikazani su dijagramski na Slici 10. Osim ukupnog napona U_{Ely} , prikazani su pojedinačni članovi (U_{rev} , U_{ohm} , $\eta_a + \eta_c$) jednadžbe matematičkog modela u ovisnosti o I_{Ely} .



Slika 10. UI – karakteristika postojećeg laboratorijskog elektrolizatora dobivena pomoću matematičkog modela elektrolizatora u razvoju

4.4. Usporedba dobivenih UI – karakteristika postojećeg elektrolizatora pomoću različitih matematičkih modela

Slika 11. prikazuje UI – karakteristike koje su izračunate za postojeći elektrolizator pomoću dva različita matematička modela (za izvedeni elektrolizator i elektrolizator u razvoju), iz istih podataka dobivenih mjerenjem. Vidljivo je da je model za izvedeni elektrolizator dobro aproksimirao izmjerene vrijednosti. Dok se vrijednosti kod modela za elektrolizator u razvoju prilično razlikuju od izmjerenih vrijednosti. U idealnom slučaju te bi se dvije krivulje trebale poklapati. Iz ove slike je jasno vidljiva greška u pokušaju aproksimacije UI – karakteristike pomoću matematičkog modela elektrolizatora u razvoju. Daljnja detaljna istraživanja, neovisna o ovom radu, bi se trebala posvetiti ovoj problematici te bi trebala otkriti koji su točno faktori utjecali na sraz kod dobivenih UI – karakteristika.



Slika 11. Dijagramski prikaz dobivenih UI – karakteristika postojećeg elektrolizatora pomoću različitih matematičkih modela

4.5. Određivanje UI – karakteristike elektrolizatora u razvoju pomoću UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora (UI – karakteristika dobivena modelom za postojeći elektrolizator)

Sada poznatu UI – karakteristiku postojećeg elektrolizatora možemo preračunati kako bi dobili UI – karakteristiku elektrolizatora u razvoju (novog elektrolizatora).

Najprije je potrebno izračunati omjera tlocrtnih površina dvaju elektrolizatora:

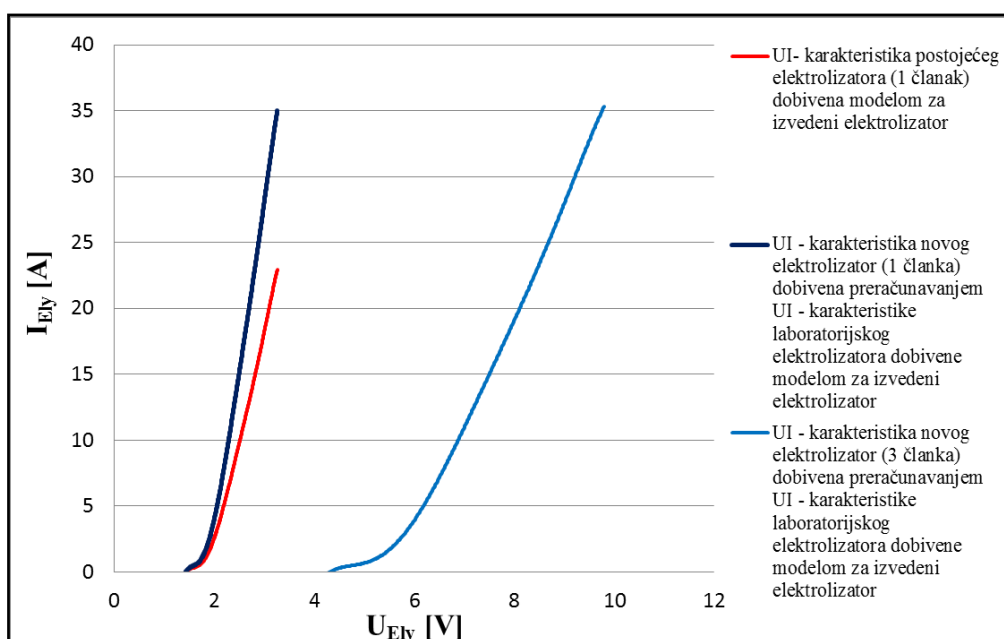
$$\frac{A_{t1}}{A_t} = 1,54 \quad (31)$$

gdje je:

$$A_{t1} = \frac{0,07^2 \cdot \pi}{4} = 0,003848\text{m}^2 \quad (32)$$

$$A_t = 0,05 \cdot 0,05 = 0,0025\text{m}^2 \quad (33)$$

Iz toga slijedi da za isti ulazni napon U dobivamo 1,54 puta veću apsolutnu struju novog članka. Zaključno, novi elektrolizator s tri članka bi radio pri 3x većem naponu i 1,54x većoj struji nego postojeći elektrolizator. Prikaz navedenih UI - karakteristika dan je u dijagramu na Slici 12.



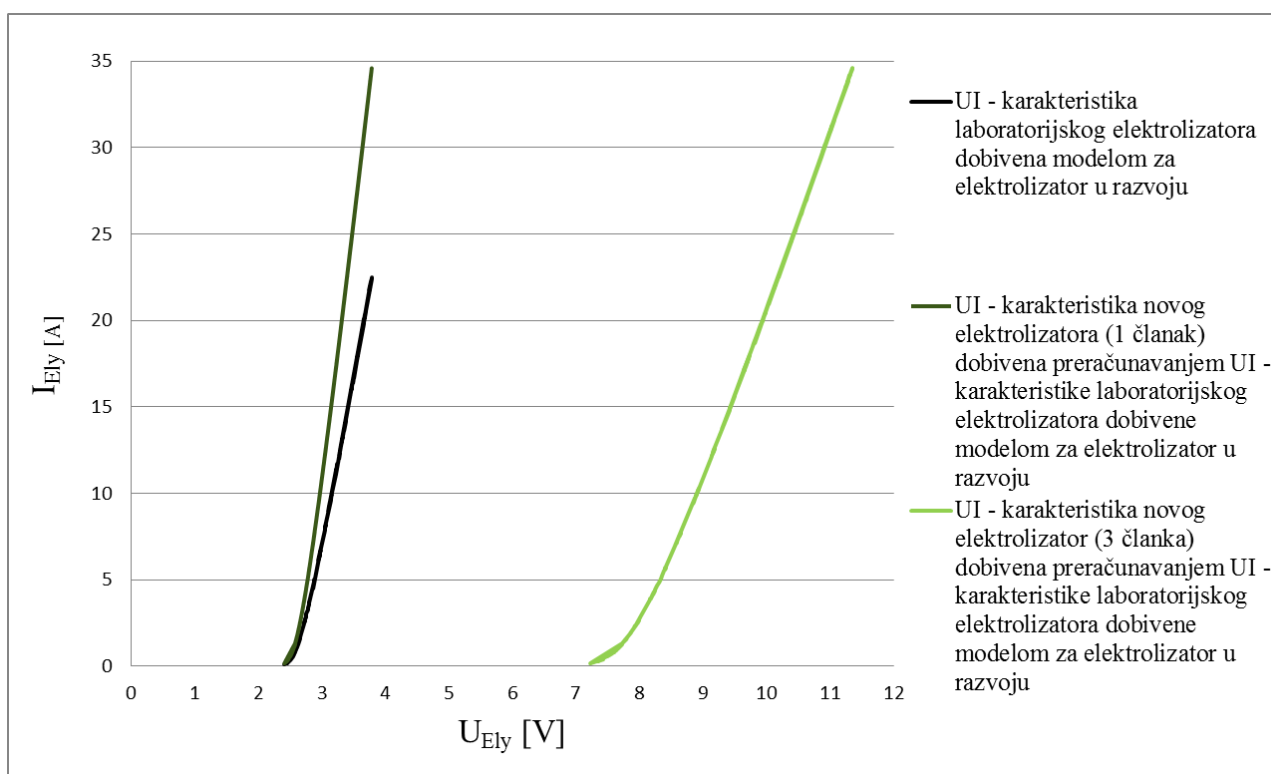
Slika 12. Usporedba UI – karakteristika laboratorijskog elektrolizatora te novog elektrolizatora u razvoju (s jednim i tri članka)

4.6. Određivanje UI – karakteristike elektrolizatora u razvoju pomoću UI – karakteristike postojećeg laboratorijskog elektrolizatora (UI – karakteristika dobivena modelom za elektrolizator u razvoju)

Sada poznatu UI – karakteristiku postojećeg elektrolizatora možemo preračunati kako bi dobili UI – karakteristiku elektrolizatora u razvoju (novog elektrolizatora).

Isto kao kod proračuna 4.5. množimo struju s omjerom tlocrtnih površina dvaju elektrolizatora, a napon množimo s tri kako bi dobili podatke za novi elektrolizator s tri članka i većom kontaktnom površinom.

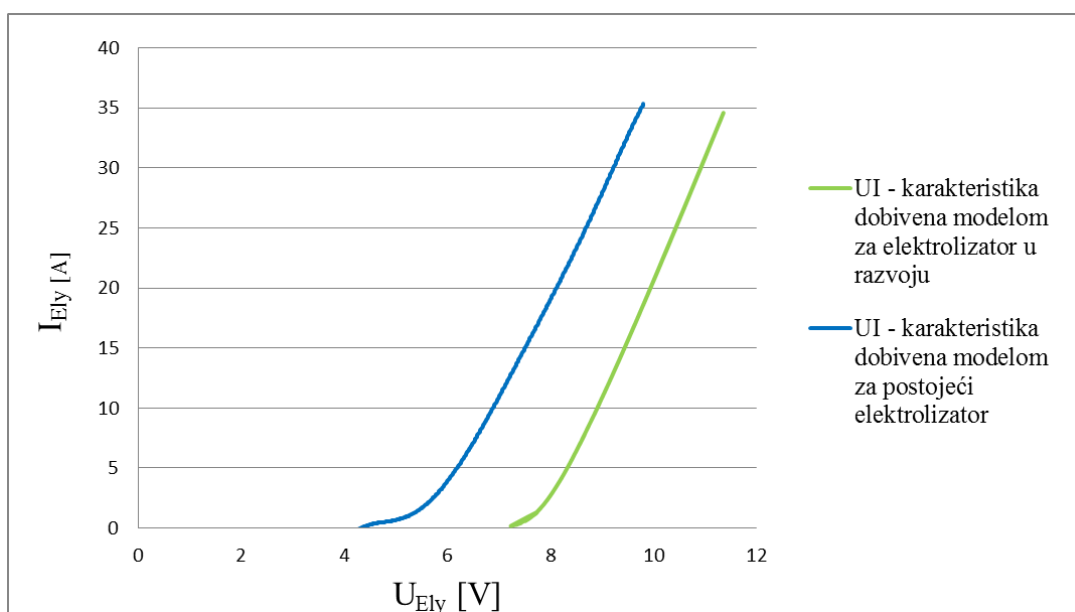
Prikaz navedenih UI - karakteristika dan je u dijagramu na Slici 13.



Slika 13. Usporedba UI – karakteristika postojećeg elektrolizatora te elektrolizatora u razvoju (s tri članka)

4.7. Usporedba dobivenih UI – karakteristika elektrolizatora u razvoju pomoću različitih matematičkih modela

Slika 14. prikazuje UI – karakteristike za elektrolizator u razvoju koje su dobivene preračunavanjem izračunatih karakteristika postojećeg elektrolizatora. Budući da su karakteristike dobivene preračunavanjem ustanovljen je jednaki sraz među karakteristikama kao i u poglavlju 4.4.



Slika 14. Dijagramski prikaz dobivenih UI – karakteristika elektrolizatora u razvoju pomoću različitih matematičkih modela

4.8. Proračun mase proizvedenog vodika postojećeg laboratorijskog elektrolizatora kod napona $U = 2,3$ V

Masu proizvedenog vodika računamo prema 1. Faradayevom zakonu, jednadžba (11). Ako je struja promjenjiva u vremenu onda se količina proizvedenog vodika izračunava na sljedeći način, jednadžba (34):

$$m_{\text{H}_2} = z \cdot \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad (34)$$

U ovom slučaju struja je konstantna pa masu proizvedenog vodika računamo prema jednadžbi (13):

$$m_{\text{H}_2} = z \cdot I \cdot t \quad (13)$$

gdje je:

$$z = 0,00001036 \text{ [g/C]}$$

Iz izmjerenih podataka vidljivo je da je elektrolizator radio u vremenu od $t = 33,2$ s pri naponu od $U = 2,3$ V uz pripadajuću struju od $I = 6,61$ A.

Iz navedenih podataka i jednadžbe slijedi:

$$m_{\text{H}_2} = 0,0000022724 \text{ kg}_{\text{H}_2} \Rightarrow (q_m)_{\text{H}_2} = 0,000246503 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{h}}$$

Zaključak ovog proračuna je da postojeći elektrolizator koji sadrži samo jedan članak, čija tlocrtna površina elektrode iznosi $A_t = 0,05 \times 0,05 = 0,0025 \text{ m}^2$, a kontaktna površina iznosi $A_e = 3,5 \text{ m}^2$ proizvodi $(q_m)_{\text{H}_2} = 0,000246503 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{h}}$ kod napona 2,3 V i struje 6,61 A.

4.9. Proračun energetske učinkovitosti postojećeg elektrolizatora

Energetska učinkovitost će se računati prema jednadžbi (28).

$$\eta_E = \frac{(q_m)_{\text{H}_2} \cdot (H_d)_{\text{H}_2}}{P_{\text{EL}}} \quad (28)$$

gdje je:

$$(q_m)_{\text{H}_2} = 0,000246503 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{h}} = 0,000000068473 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{s}}$$

$$(H_d)_{\text{H}_2} = 119617 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_{\text{EL}} = U \cdot I$$

Energetska učinkovitost postojećeg laboratorijskog elektrolizatora iznosi:

$$\eta_E = \frac{0,000000068473 \cdot 119617}{15,20156 \cdot 10^{-3}} = 0,5388$$

4.10. Proračun mase proizvedenog vodika elektrolizatora u razvoju

Ako uzmemo u obzir izračunate podatke iz prethodnog proračuna možemo preko omjera aproksimirati proizvodnju vodika elektrolizatora u razvoju.

Elektrolizator u razvoju ima tlocrtnu površinu elektrode $A_{t1} = 0,003848\text{m}^2$ odnosno kontaktnu površinu $A_{e1} = 5,388\text{m}^2$.

Omjer proizvodnje vodika i kontaktne površine za jedan članak:

$$\frac{A_e}{(q_m)_{\text{H}_2}} = \frac{3,5}{0,000246503} = \frac{5,388}{[(q_m)_{\text{H}_2}]_1} \Rightarrow [(q_m)_{\text{H}_2}]_1 = 0,0003795 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{h}}$$

Prema tome elektrolizator prezentiran u ovom radu s 3 članka i kontaktnom površinom elektrode $A_{e1} = 5,388\text{m}^2$ bi proizvodio $\Rightarrow [(q_m)_{\text{H}_2}]_1 = 3 \cdot 0,0003795 = 0,001138 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{h}}$ uz istu struju i 3 puta veći napon (u odnosu na postojeći laboratorijski elektrolizator).

5. KONSTRUKCIJA

5.1. Princip rada

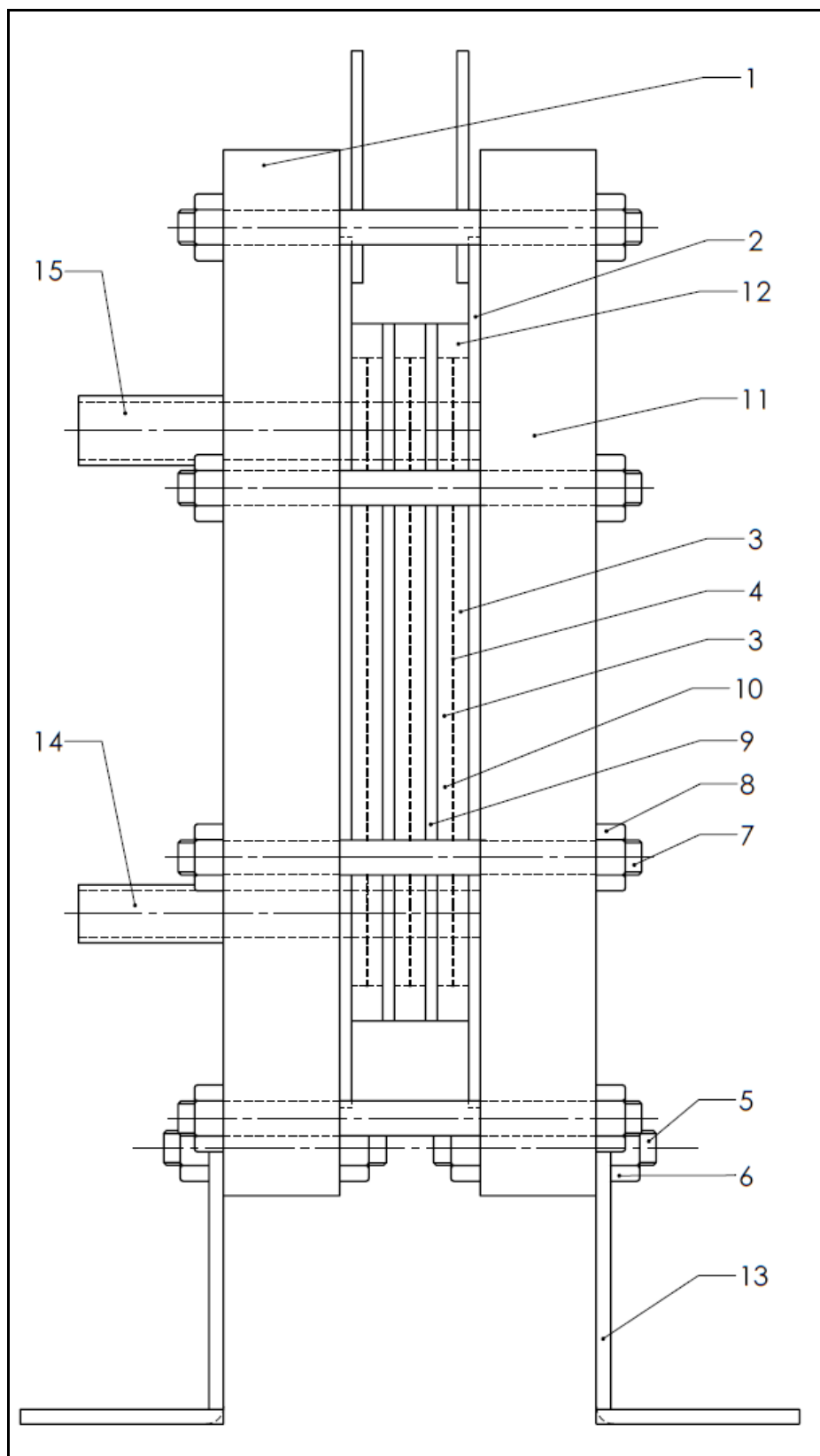
Elektrolizator predstavljen u ovom projektu zamišljen je kao bipolaran. Sastoji se od tri članaka koji su povezani u seriju. Elektrolizator je spojen na strujni krug na prvoj i posljednjoj elektrodi između kojih se javlja pad napona. Između svakog članka nalazi se bipolarna ploča koja ima ulogu anode s jedne strane i katode s druge strane.

Elektrolit se dovodi pumpama u pojedine članke s donje strane elektrolizatora. Tada prolazi kroz Ni-metalne pjene u kojima se generiraju vodik na katodi odnosno kisik na anodi. Na gornjoj strani elektrolizatora postoje otvori kroz koje izlazi mješavina elektrolita i vodika na jednoj strani, a mješavina elektrolita i kisika na drugoj strani.

5.2. Glavne komponente elektrolizatora i njihova uloga

Pozicije na Slici 15.:

- 1) početna rubna ploča – temeljna ploča za pričvršćenje s priključcima za elektrolit i plinove
- 2) zavareni sklop monopolarne ploče i pločica za dovod struje
- 3) brtve – sprječava curenje elektrolita, te plinova
- 4) membrana - odvaja plinove i propušta ione
- 5) vijci za pričvršćivanje pločica za dovod struje
- 6) matice za pričvršćivanje pločica za dovod struje
- 7) vijci za pritezanje elektrolizatora
- 8) matice za pritezanje elektrolizatora
- 9) bipolarne ploče – služe ujedno kao anode i katode
- 10) Ni- metalna pjena – elektroda, generira plinove
- 11) krajnja rubna ploča – temeljna ploča za pričvršćenje
- 12) keramički prsten – služe za osiguravanje minimalnog razmaka između monopolarnih i bipolarnih ploča
- 13) postolje
- 14) priključak za dovod i odvod elektrolita
- 15) priključak za dovod i odvod mješavine elektrolita i plinova



Slika 15. Crtež alkalnog bipolarnog elektrolizatora s označenim pozicijama

Potrebno je naglasiti da u članke ne ulazi samo elektrolit već mješavina elektrolita i plinova što je posljedica lošeg odvajanja plinova u separatorima. To automatski utječe na korisnost elektrolizatora.

5.2.1. Rubne ploče

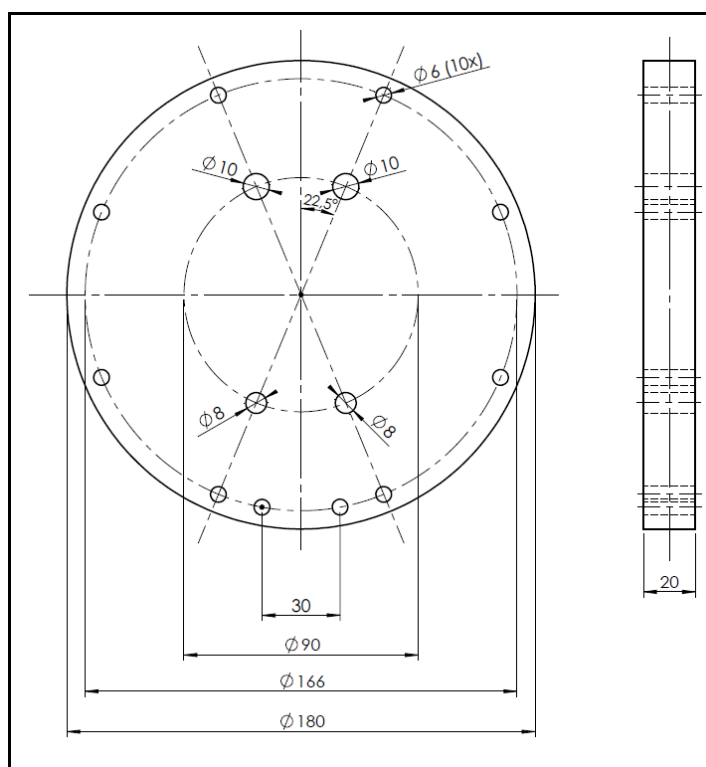
Rubne ploče izrađene su od pleksiglasa. Pleksiglas je odabran zbog svoje otpornosti na koroziju i krutosti, ali i zbog nekoliko drugih razloga:

- otporan je na vremenske utjecaje i starenje
- obrada je jednostavna; koriste se alati za obradu metala i drveta; moguće ga je bušiti, piliti, tokariti, glodati
- pokazao se adekvatnim u širokom rasponu primjena.

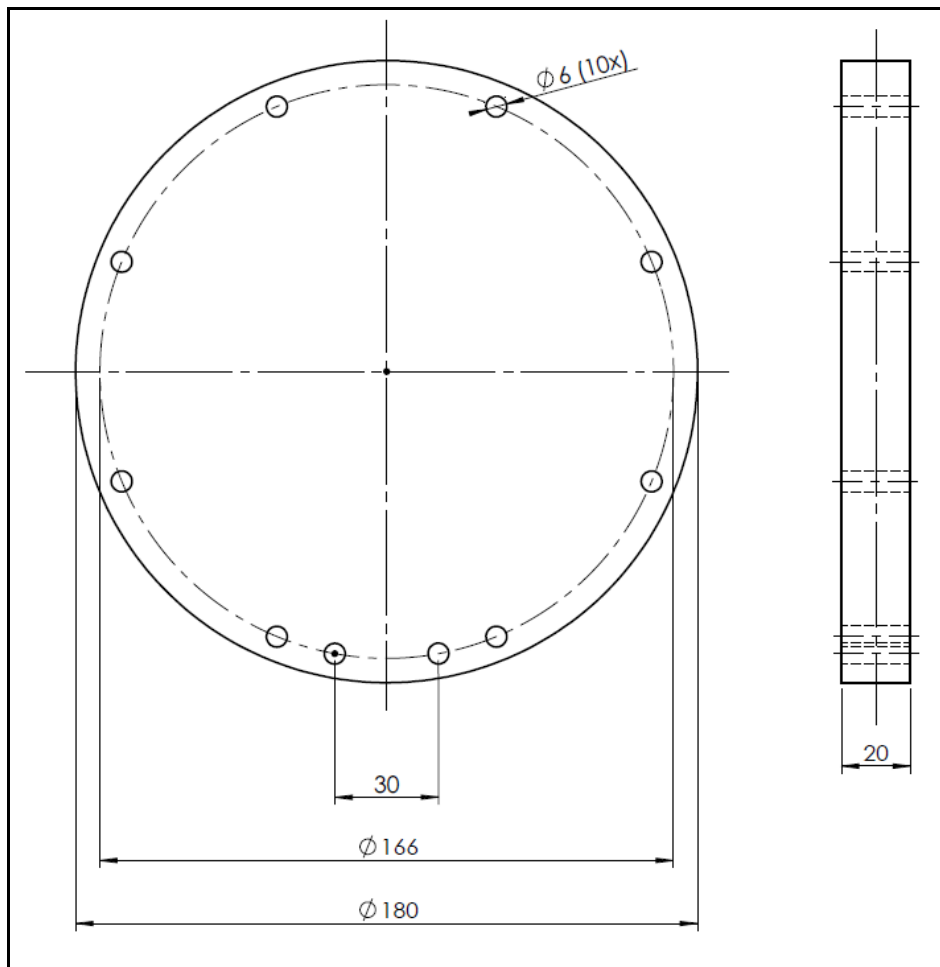
Kao što je vidljivo na Slici 15. postoje početna i krajnja rubna ploča, razlika je u tome što na početnoj rubnoj ploči postoje priključci za elektrolit i plinove.

Gornja dva priključka su za odvod plinova (odnosno mješavine plinova i elektrolita), a donja dva su za dovod elektrolita.

Rubne ploče, te ujedno cijela konstrukcija je pritegnuta uz pomoć osam M6 vijaka i matica.



Slika 16. Tehnički crtež početne rubne ploče



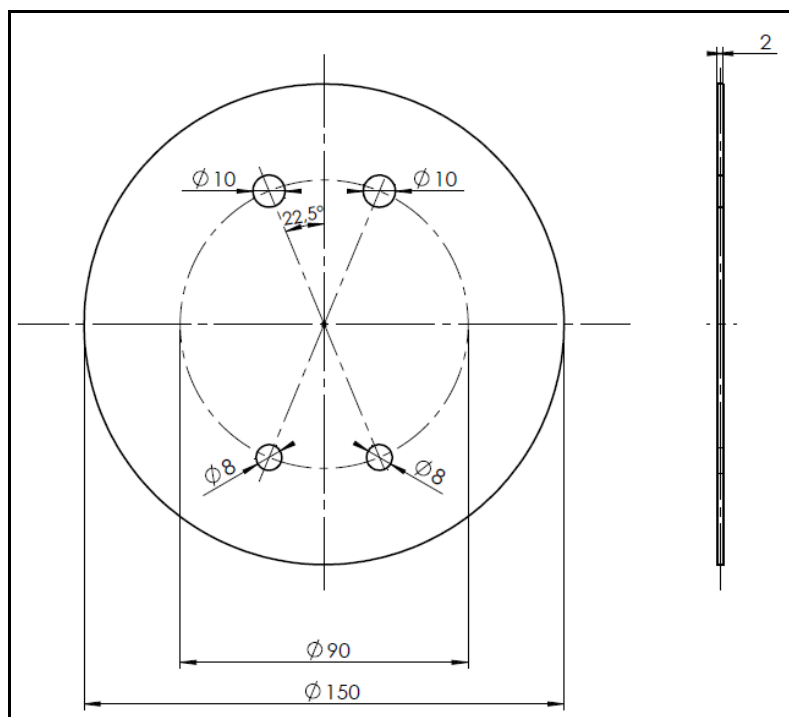
Slika 17. Tehnički crtež krajnje rubne ploče

5.2.2. Monopolarne i bipolarne ploče

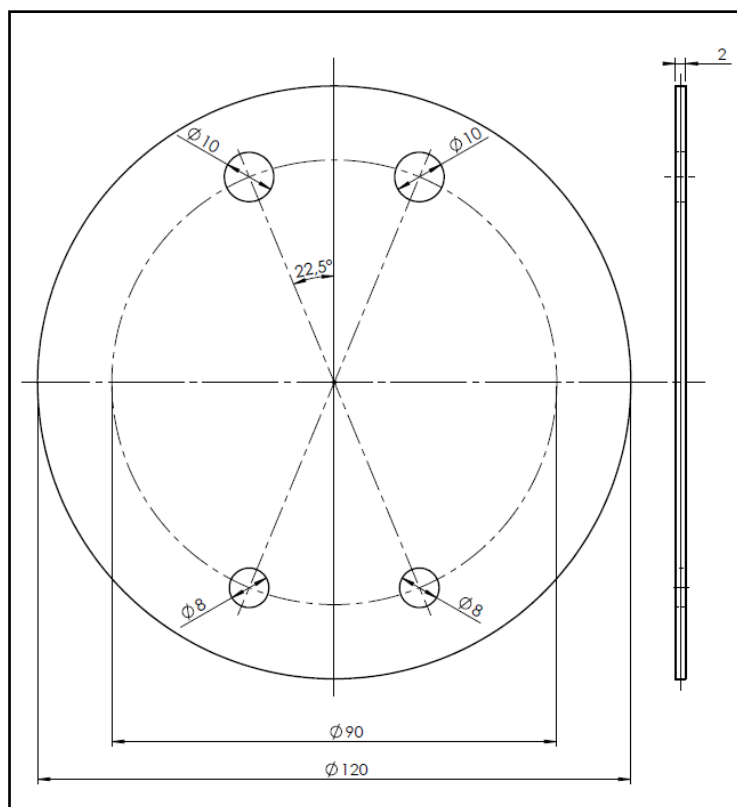
Obje vrste ploča su izrađene od nehrđajućeg čelika SS 316.

Monopolarne ploče su povezane priključcima za struju na vanjski strujni krug. Prva monopolarna ploča (na koju se dovodi struja) predstavlja pozitivnu elektrodu odnosno anodu, dok zadnja predstavlja katodu.

Bipolarne ploče se postavljaju između dva članka te imaju dvostruku ulogu. S jedne strane predstavljaju katodu, a s druge anodu.



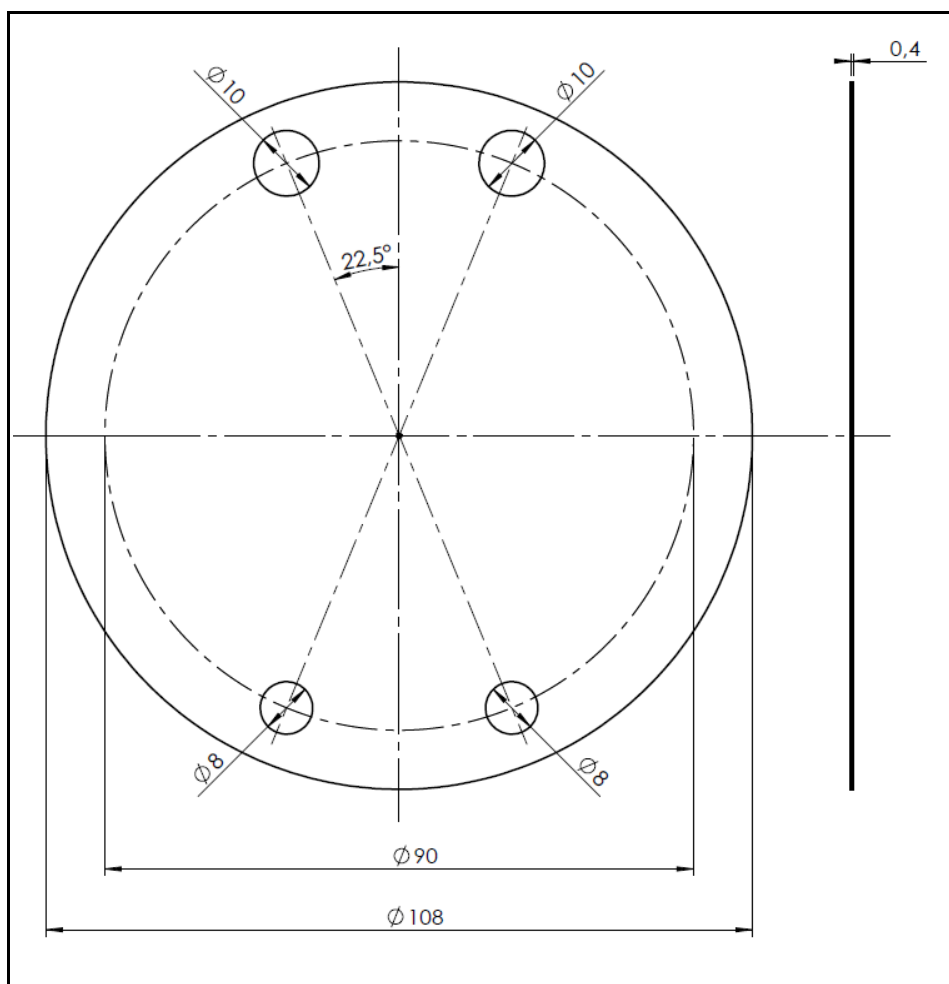
Slika 18. Tehnički crtež monopolarne ploče



Slika 19. Tehnički crtež bipolarne ploče

5.2.3. Membrana

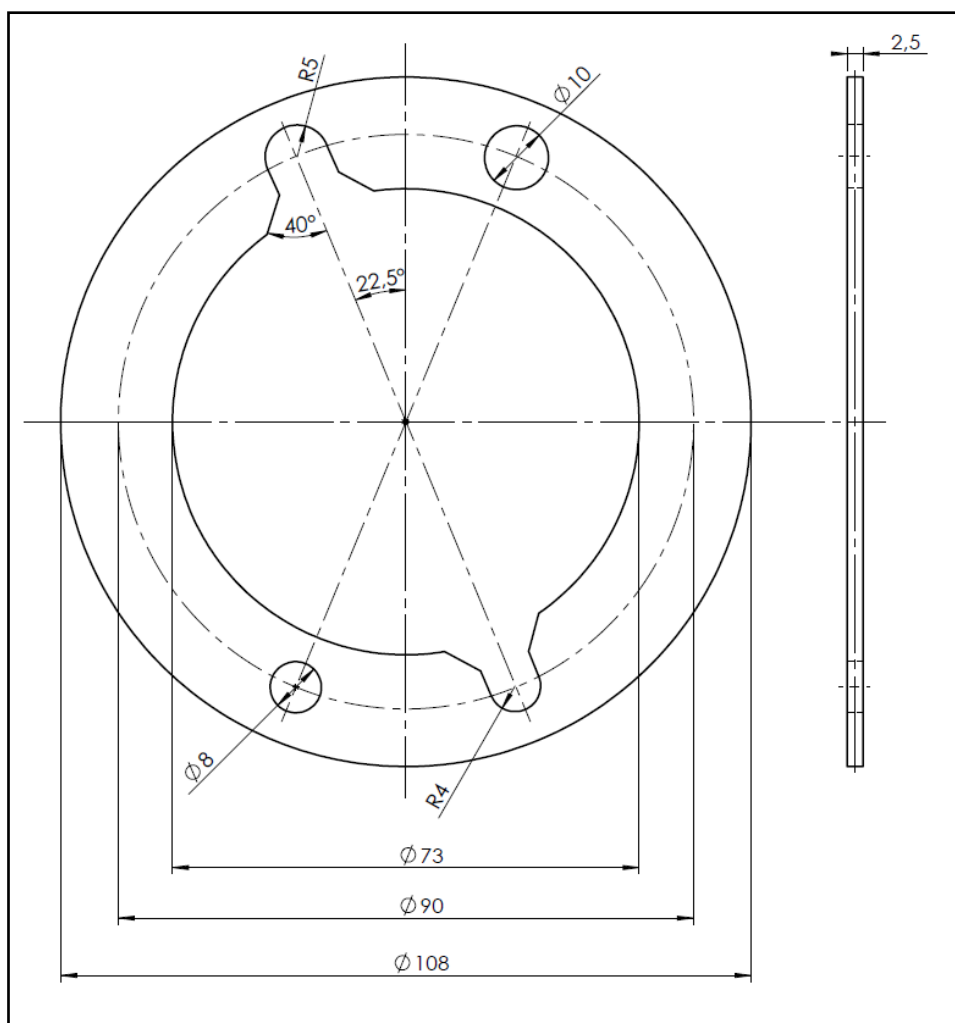
Materijal membrane je Zirfon[®] proizvođača Vito, Flemish Institute for Technological Research iz Belgije. Zirfon[®] je kompozitni materijal simetrično obložen polisulfonskom mrežom i cinkovim oksidom (ZnO) kao anorganskom ispunom. Osnovne značajke Zirfona[®] su: trajna vlažnost u vodi i elektrolitu, dimenzionalno je stabilan - bez efekta skupljanja, vrlo je robustan - ojačan tkaninom, stabilan je u jako lužnatom radnom mediju, dostupan je za različite temperature te ima niski ionski otpor. Osnovna uloga membrane je da onemogući miješanje nastalih plinova, ali pritom mora biti propusna za ione.



Slika 20. Tehnički crtež membrane

5.2.4. Brtve

Brtva se nalazi na katodnoj i anodnoj strani članka između bipolarnih (odnosno monopolarnih) ploča. Između dvije brtve jednog članka postavljena je membrana. Svrha brtve je onemogućavanje istjecanja elektrolita odnosno istjecanja plinova u okolinu. Također imaju svrhu usmjeravanja plinova odnosno elektrolita kroz elektrolizator. Sve brtve su izrađene od gume.



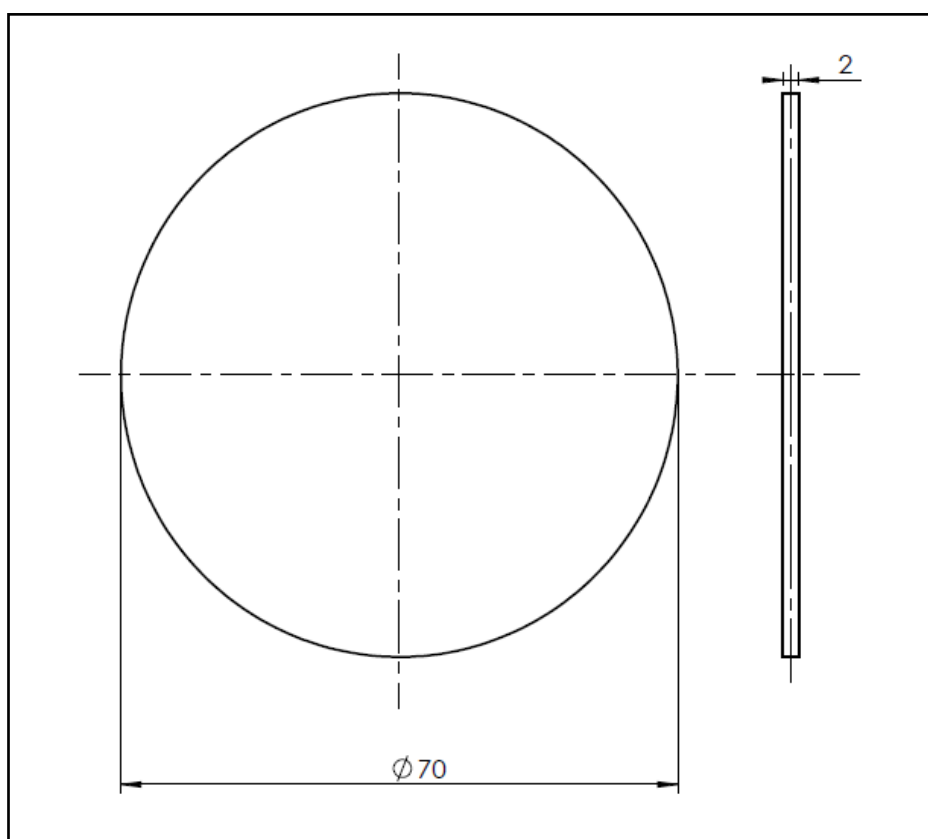
Slika 21. Tehnički crtež brtve

5.2.5. Elektrode (Ni – metalna pjena)

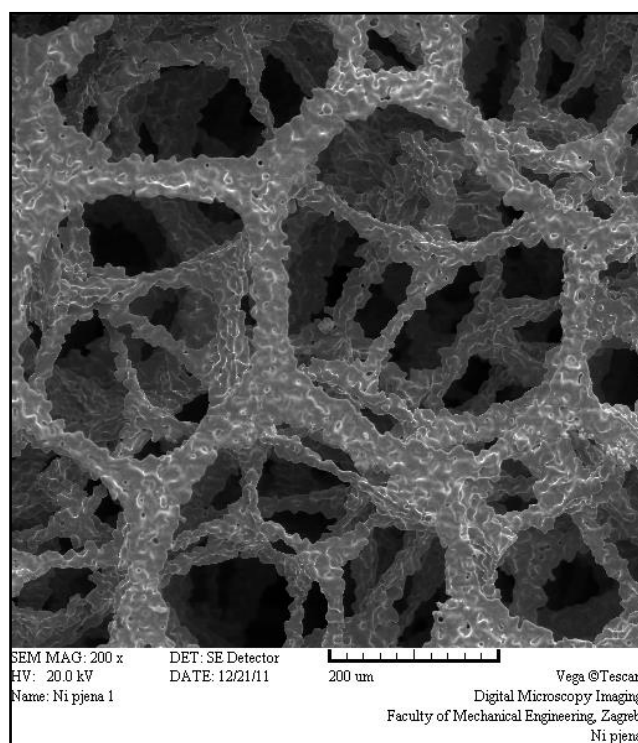
Elektrode imaju vrlo važnu ulogu u elektrolizatoru prilikom pretvaranja molekule vode u plinove i zato su vrlo bitna njena elektrokemijska svojstva. Ovisno o elektrokemijskim svojstvima elektrode ovisi koliko će se vodika proizvesti, o čemu u konačnici ovisi učinkovitost samog elektrolizatora. Materijal od koje je izrađena elektroda mora biti elektrokemijski vrlo aktivan, odnosno njegova površina. Za što veću proizvodnju vodika potrebna je što veća aktivna površina elektroda. Ostala bitna svojstva su dostupnost i što niža cijena. Najčešće korišteni materijali za izradu elektroda su platina, nikal i nehrđajući čelik.

Za materijal elektroda je zbog njezinih naprednih svojstva izabrana Ni – metalna pjena.

Porozitet Ni pjene korišten u izradi opisanog alkalnog elektrolizatora je 95 % do 97 %, nazivnog promjera pora od 600 μm , proizvođača Mitsubishi Materials Corporation iz Japana.



Slika 22. Tehnički crtež metalne pjene



Slika 23. Struktura Ni pjene [1]

Prednosti korištenja Ni - metalne pjene u odnosu na druge materijale:

- a. Uslijed svoje poroznosti metalne pjene imaju puno veću reaktivnu površinu nego uobičajeno korištene elektrode kao npr. pločice od nehrđajućeg čelika ili nikla
- b. Za razliku od elektroda izrađenih od krutih materijala na kojima se odvija dvodimenzionalno (2D) kruženje elektrolita, metalna pjena zbog svoje poroznosti omogućava trodimenzionalno (3D) kruženje elektrolita na elektrodama. To znači da se odvajanje proizvedenih plinova vodika, odnosno kisika odvija po cijeloj površini i u unutrašnjosti elektrode.
- c. Manja gustoća odnosno masa u odnosu na konvencionalne elektrode u obliku pločica.
- d. Korištenjem poroznog materijala s velikom reakcijskom površinom možemo smanjiti dimenzije elektrolizatora što u konačnici smanjuje troškove izrade.

5.2.5.1. Određivanje površine metalne pjene [1]

Površina poroznog materijala zahtijeva posebnu tehniku određivanja aktivne površine koja sudjeluje u procesu elektrolize. Metoda koja je primijenjena za određivanje površine Ni pjene je BET metoda. Primjena se temelji na adsorpciji određenog plina (u ovom slučaju je to bio dušik, N₂) na površinu. BET metoda obuhvaća kombinaciju eksperimentalnog mjerenja i matematički proračun te zahtijeva posebnu aparaturu. Pripremljeni uzorci Ni pjene bili su dimenzija 5 x 5 x 2 mm ukupne mase $m = 1$ g. Uređaj koji se koristio za mjerenje je Micromeritis, Asap 2000. Rezultati su prikazani u Tablici 2.

Tablica 2. Ukupno izvješće mjerenja površine metalne pjene BET metodom [1]

Tip izmjerene površine metalne pjene	Površina [m ² /g]
BET	1,9710
Jedna točka na P / Po 0,2002	0,8095
BJH kumulativna adsorpcija pora između promjera od 17 do 300000 nm	1,1083
BJH kumulativna desorpcija pora između promjera od 1,7 do 300000 nm	1,1488

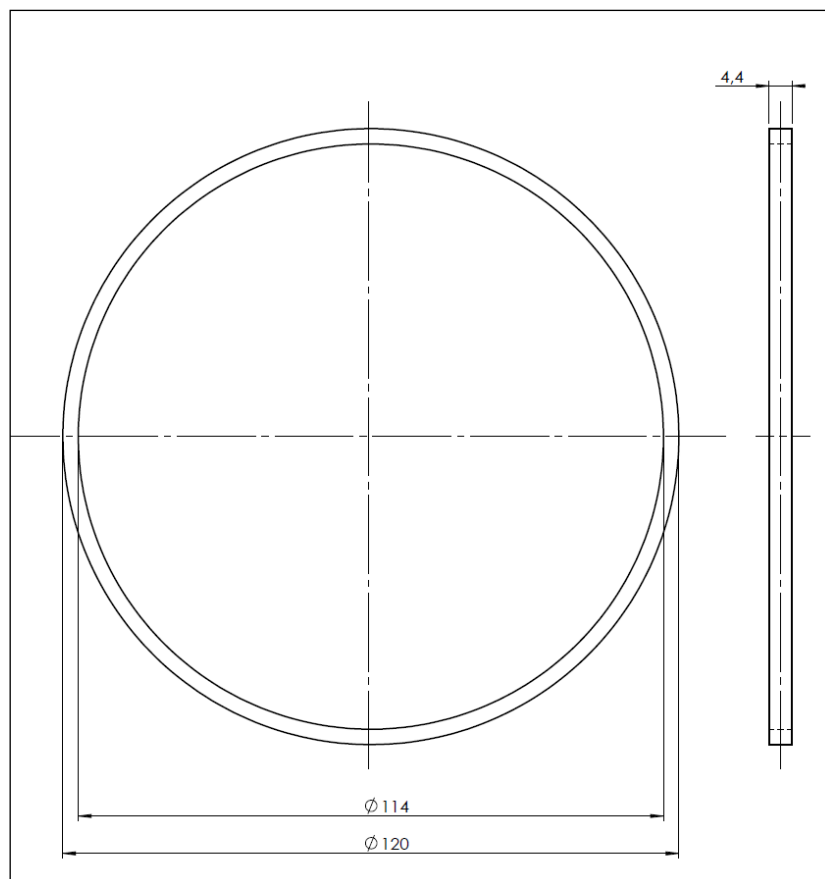
Referentni uzorak bila je Ni pločica. Dobiveni rezultati eksperimentalnih mjerenja i proračunate aktivne površine govore da je aktivna površina Ni pjene cca 1500x veća u odnosu na referentnu aktivnu površinu Ni pločicu (Tablica 3.). Usporedba je provedena za tlocrtnu površinu od 1 x 1 x 0,2 cm.

Tablica 3. Vrijednosti usporedbe aktivne površine Ni pjene i Ni pločice [1]

Elektrodni materijal	Geometrija elektroda [cm]	Aktivna površina elektroda [cm ²]
Ni pjena	1 x 1 x 0,2	1509,5
Ni pločica	1 x 1 x 0,2	1,0

5.2.6. Keramički prsteni

Ovo su dijelovi elektrolizatora koji ne sudjeluju u proizvodnji vodika već imaju funkciju osiguravanja konstrukcijske stabilnosti elektrolizatora. Prstenovi se postavljaju između bipolarnih odnosno monopolarnih ploča kako bi osigurale potrebni razmak između njih. U suprotnom bi moglo doći do prezatezanja vijaka odnosno cijele konstrukcije elektrolizatora. U tom slučaju bi došlo do zatajenja brtvljenja te istjecanja elektrolita odnosno proizvedenih plinova. Prstenovi su izrađeni od čelika, a presvučeni su sa slojem keramike koji služi kao električni izolator.



Slika 24. Tehnički crtež keramičkog prstena

6. ZAKLJUČAK

Vodik kao spremnik energije ima perspektivnu budućnost u procesu ostvarivanja održivog sustava gospodarenja energijom. Budućnost proizvodnje vodika je u uređajima s manjim kapacitetima proizvodnje vodika koji će električnu energiju dobivati iz obnovljivih izvora. Na taj način u vrijeme kada je proizvodnja energije (iz obnovljivih izvora) obilna višak se može utrošiti za proizvodnju vodika putem elektrolize. Na taj način izgaranjem vodika u gorivnim člancima vraćamo dio utrošene energije, a taj udio je ovisan o energetske učinkovitosti elektrolizatora. U posljednjih deset godina se veliki naponi ulažu u istraživanje i razvoj takvih sustava koji obuhvaćaju proizvodnju, konverziju i pohranu vodika, s ciljem ostvarivanja što veće energetske učinkovitosti.

Elektrolizator, kao ključna komponenta takvog energetske sustava, prezentiran je u ovom diplomskom radu. Proračunom je ustanovljeno da taj alkalni elektrolizator bipolarnog tipa s 3 serijski povezanih članaka i kontaktnom površinom elektrode $A_{e1} = 5,388 \text{ m}^2$ bi mogao proizvesti $[(q_m)_{\text{H}_2}]_1 = 0,001138 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{h}}$. U radu se osvrnulo i na matematičke modele kojima se aproksimiraju radne karakteristike elektrolizatora. U četvrtom poglavlju su se određivale UI – karakteristike za postojeći laboratorijski elektrolizator pomoću različitih matematičkih modela te je prikazana njihova usporedba.

U zadnjem, 5. poglavlju, obrađena je konstrukcija elektrolizatora zadanih svojstava tj. naprijed spomenutog kapaciteta proizvodnje vodika. Ovo poglavlje sadrži komentare crteža svih glavnih dijelova tj. pozicija elektrolizatora koje su nužne za uspješno provođenje procesa elektrolize vode odnosno proizvodnju vodika te materijale koji će se koristiti za izradu elektrolizatora.

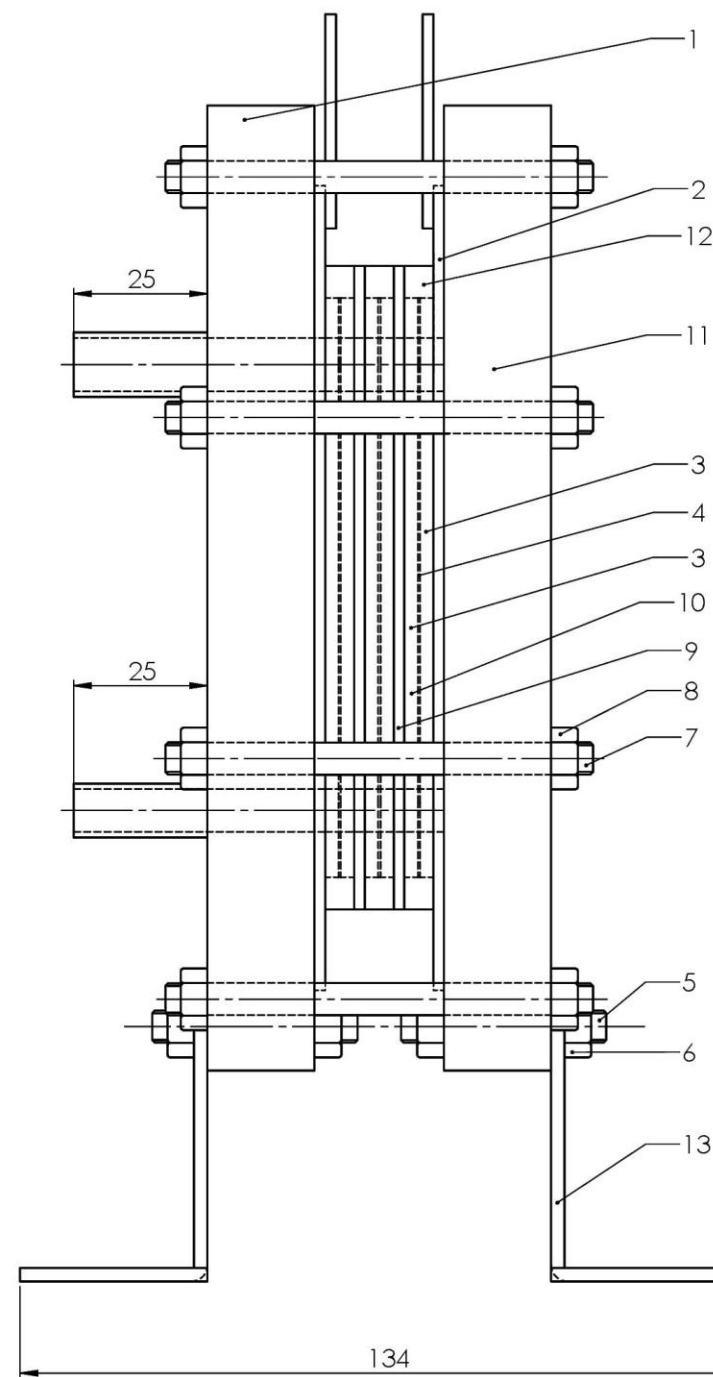
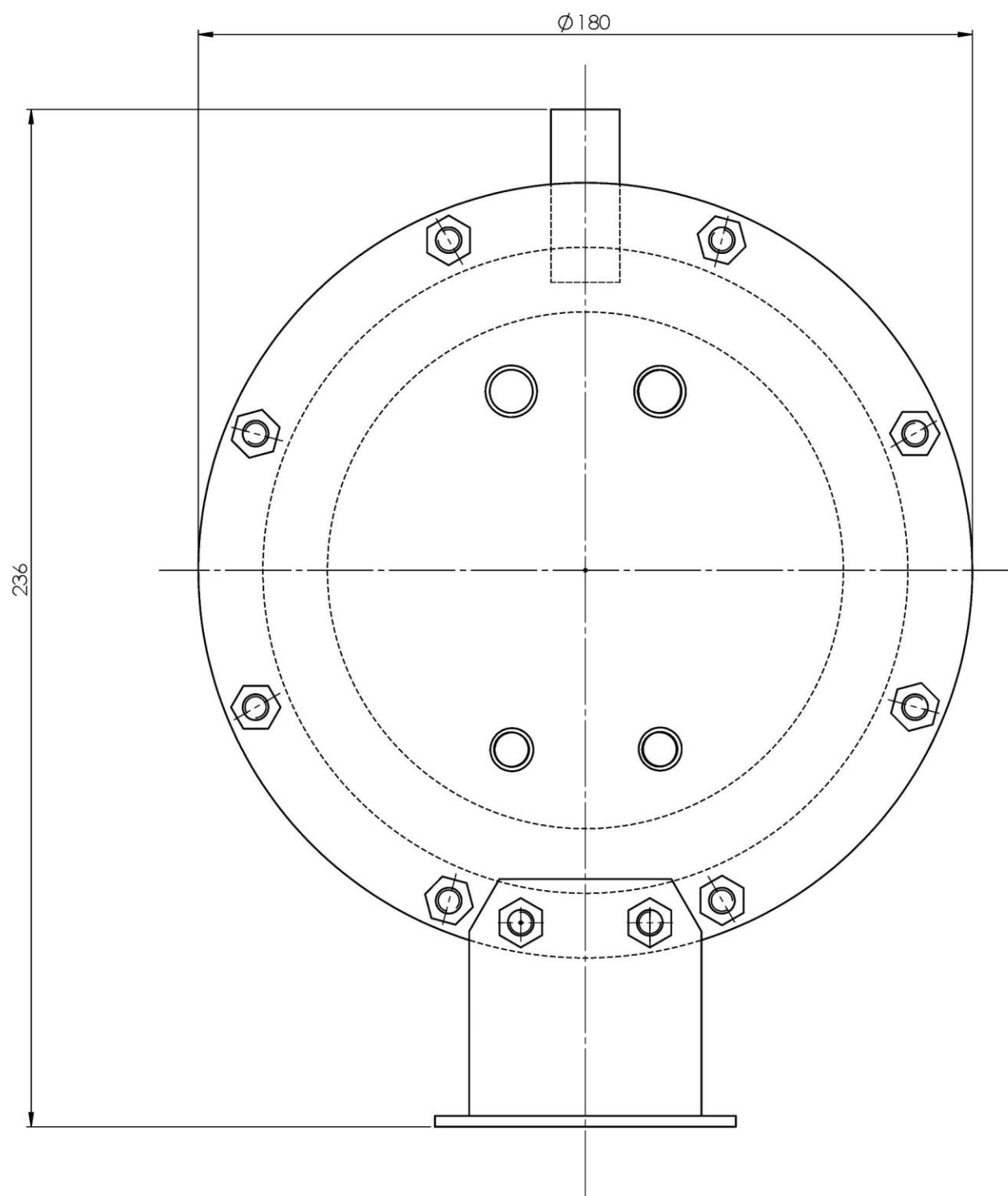
LITERATURA

- [1] Đukić A.: Proizvodnja vodika elektrolizom vode pomoću sunčeve energije i fotonaponskog modula, Zagreb, FSB, 2013.
- [2] Mantell C.L.: Elektrokemijsko inženjerstvo, Tehnička knjiga Zagreb, 1960.
- [3] Ulleberg Q.: Stand-Alone Power Systems for the future: Optimal Design, Operation & Control of Solar-Hydrogen Energy Systems, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998.
- [4] K. Zeng, D. Zhang, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, Progress in Energy and Combustion Science 36 (2010) 307-326.
- [5] Ohta T. : Solar – Hydrogen energ systems.
- [6] Vedrina I. : Konstrukcija elektrolizatora kapaciteta 0,1 kg_{H2}/h, FSB, Zagreb, 2013.
- [7] Gradišćak T. : Proračun i konstrukcija elektrolizatora s KOH kao elektrolitom, Zagreb, FSB, 2012.
- [8] Zoulias E., Varkaraki E., Lymberopoulos N., Christodoulou C. N. , G. N. Karagiorgis: A review on water electrolysis, Pikermi, Greece.
- [9] Malina J., Begić Hadžipašić A. : Fizikalna kemija-zbirka riješenih zadataka-drugi dio, Sisak, 2012.
- [10] http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422013000800017&script=sci_arttext
- [11] http://hr.wikipedia.org/wiki/Elektroliza_vode#Termodinamika_elektrolize_vode
- [12] http://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrokemija#Spontanost_odvijanja_redoks_reakcija

PRILOZI

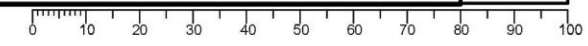
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

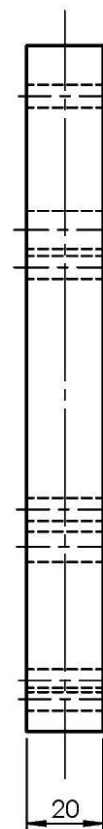
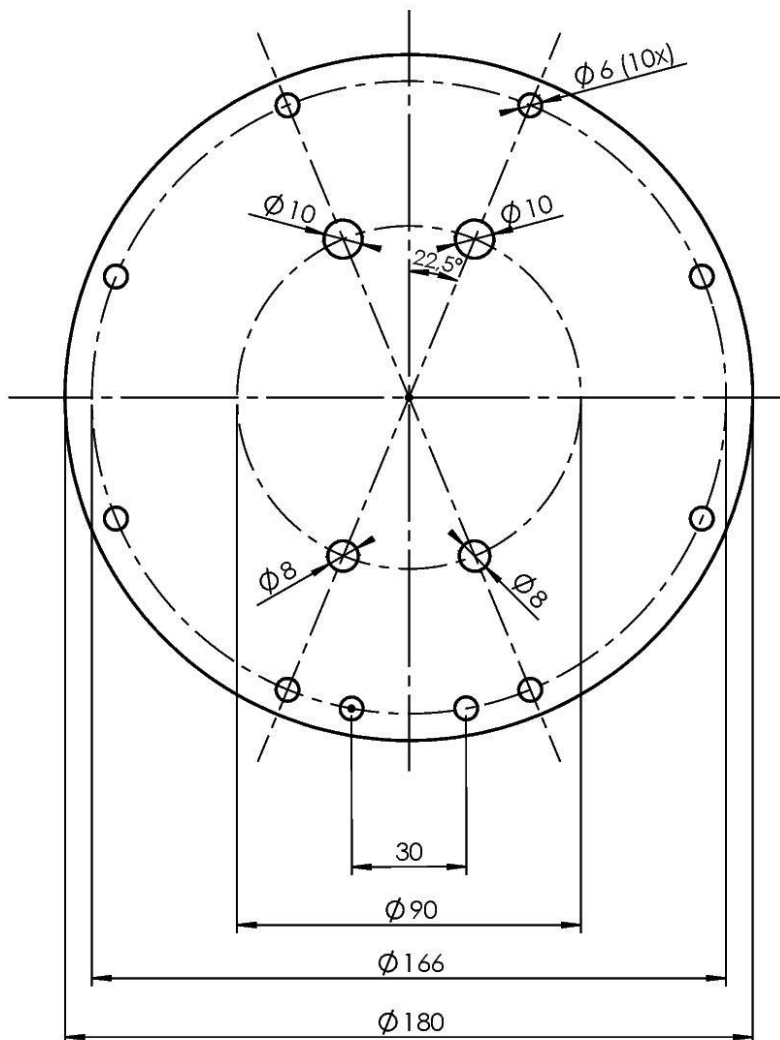
TEHNIČKA DOKUMENTACIJA



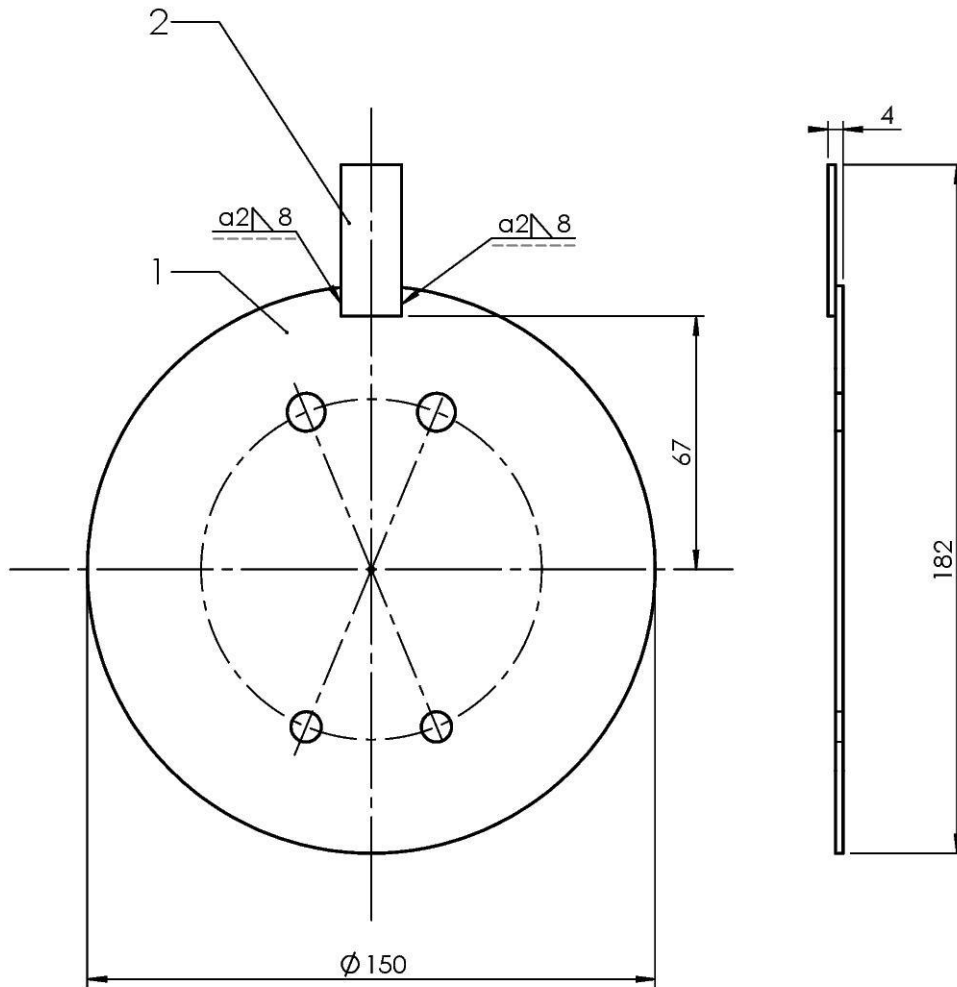
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
13	Postolje	2	01-11	Poniklani čelični lim		
12	Keramički prsten	6	01-10	Keramika		
11	Krajnja rubna ploča	1	01-9	Pleksiglas		
10	Metalna pjena	6	01-8	Ni		
9	Bipolarna ploča	2	01-7	SS316		
8	Matica	16		SS316	M6	
7	Vijak za pritezanje elektrolizatora	8	01-6	SS316		
6	Matica	8		SS316	M6	
5	Vijak	4	01-5	SS316		
4	Membrana	3	01-4	Zirfon		
3	Brtva	6	01-3	Guma		
2	Zavareni sklop monopolarna ploča i pločica za dovod struje	2	01-2	SS316		
1	Početa rubna ploča	1	01-1	Pleksiglas		

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis
	Razradio	4.12.2013	Ines Vedrina	
	Crtao	4.12.2013	Ines Vedrina	
	Pregledao		Ines Vedrina	
	Mentor			
ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:		
		R. N. broj:		
	Napomena:	Kopija		
	Materijal:	Masa:		
Mjerilo originala	Naziv:	Elektrolizator		Pozicija:
1:1	Crtež broj:	01		Format: A2
				Listova: 1/1
				List: 1

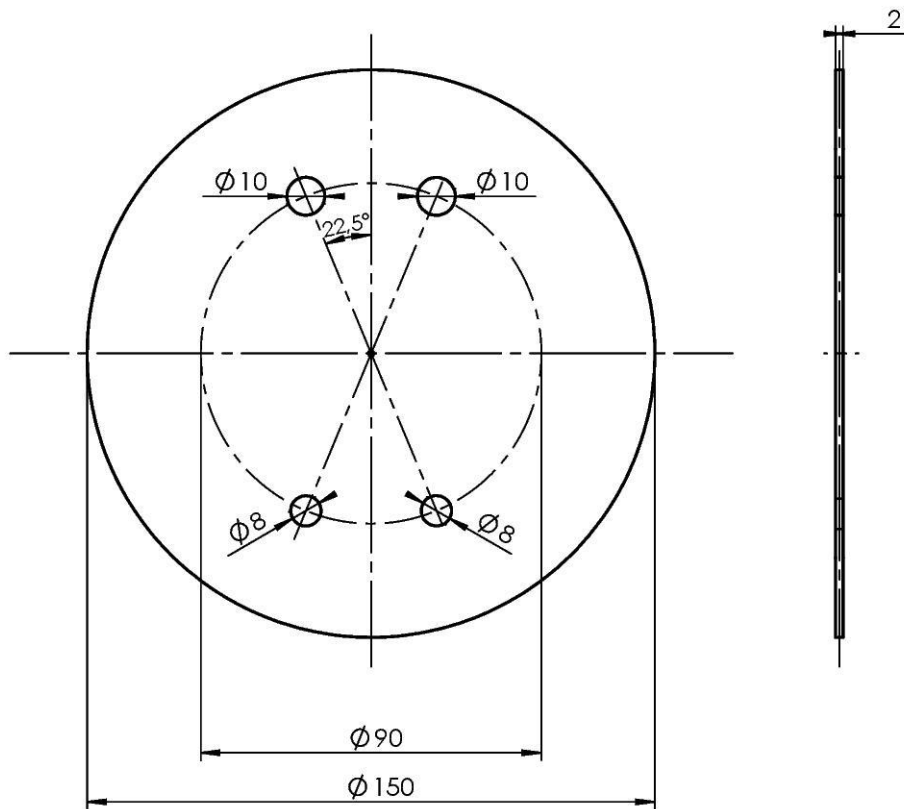




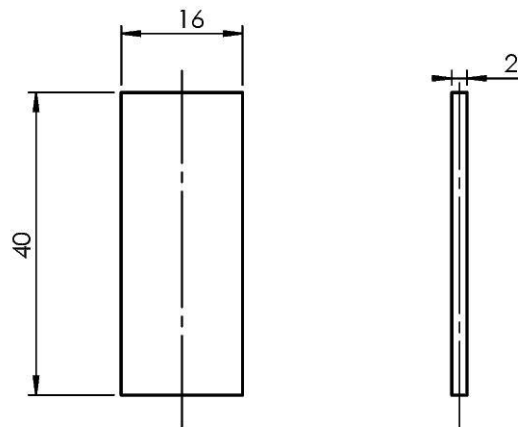
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	4.12.2013.	Ines Vedrina			
Razradio	4.12.2013.	Ines Vedrina			
Crtao	4.12.2013.	Ines Vedrina			
Pregledao					
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:				Kopija	
Materijal: Pleksiglas				Masa:	
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	Format: A4	
	Početna rubna ploča		1	Listova: 1/1	
	Crtež broj: 01-1			List: 1	



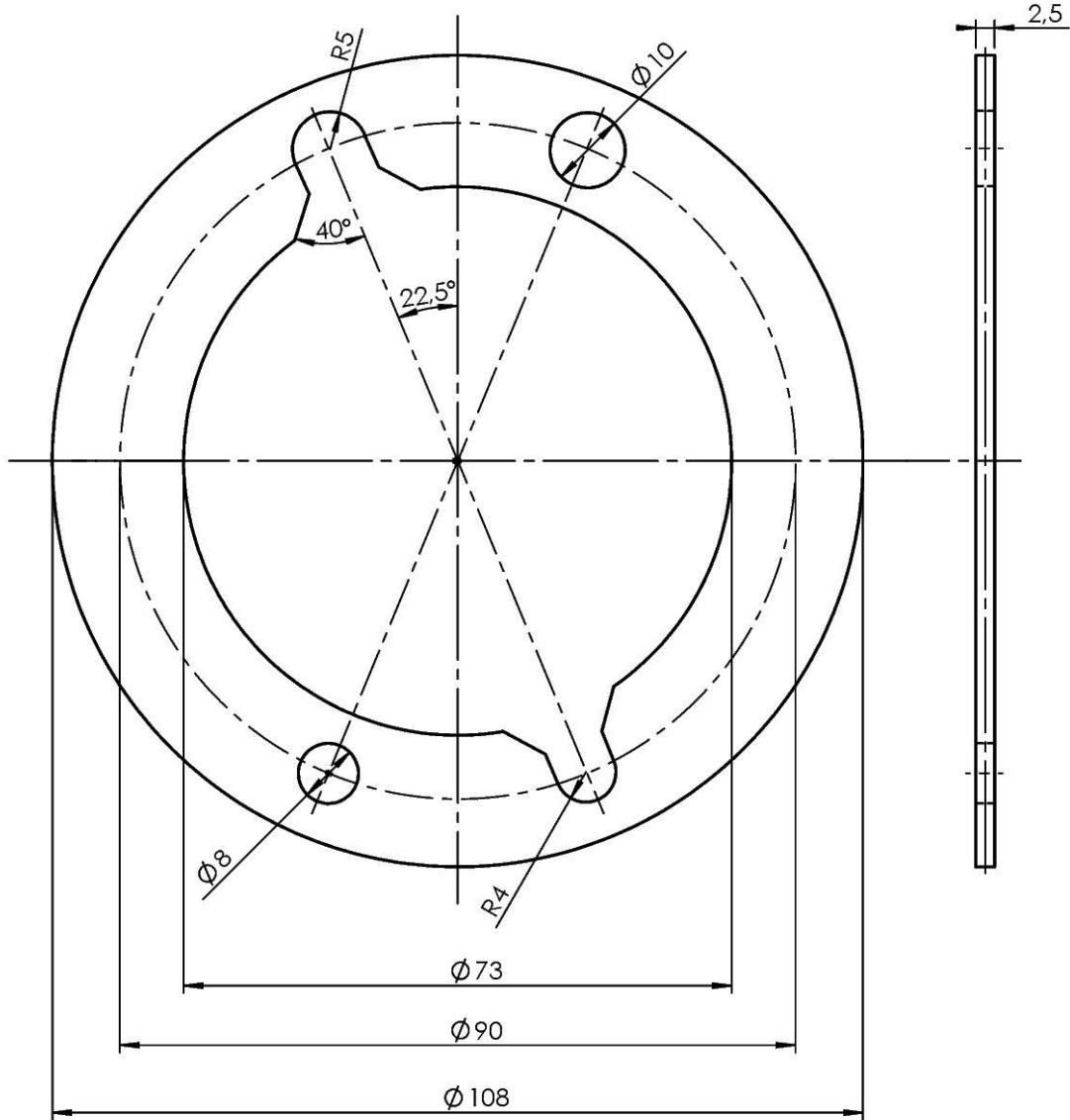
2	Pločica za dovod struje	1	01-2-2	SS316
1	Monopolarna ploča	1	01-2-1	SS316
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj	Materijal
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Razradio	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:	SS 316	Masa:		
 Mjerilo originala 1:2	Naziv: Zavareni sklop monopolarna ploča i pločica za dovod struje		Pozicija:	Format: A4
			2	Listova: 1/1
Crtež broj: 01-2				List: 1



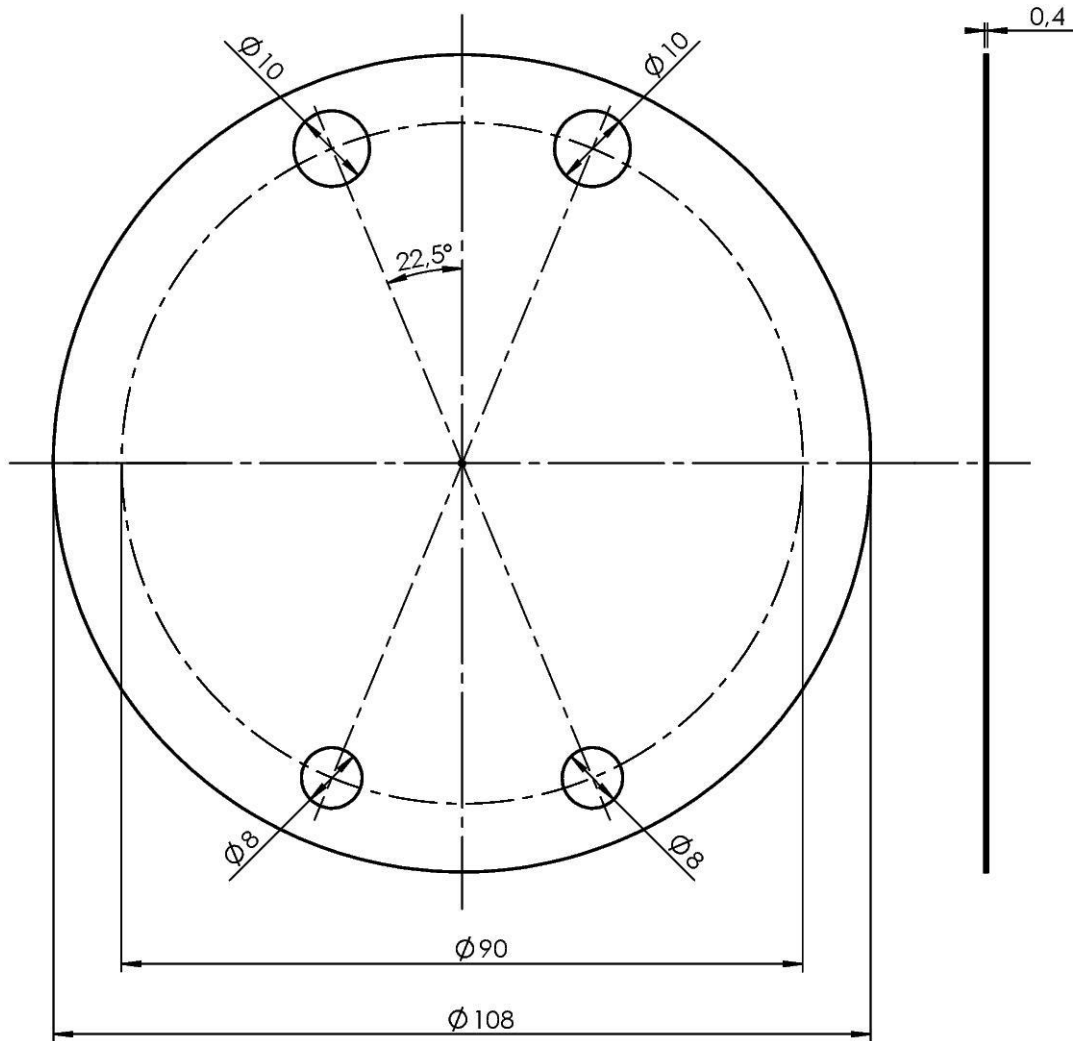
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:	SS 316	Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	
Mjerilo originala 1:2	Monopolarna ploča		1	
Crtež broj: 01-2-1				List: 1





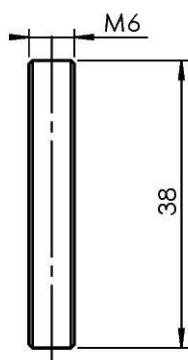
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal: SS316		Masa:		
		Naziv:		
Mjerilo originala		Pločica za dovod struje		2
1:1		Crtež broj: 01-2-2		Format: A4
				Listova: 2/2
				List: 2




	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	4.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal:	Guma	Masa:		
 Mjerilo originala	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
1:1	Brtva		3	Listova: 1/1
Crtež broj: 01-3				List: 1

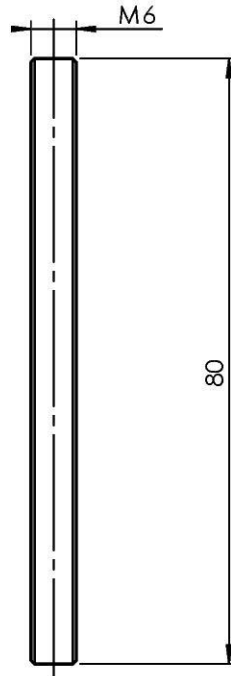



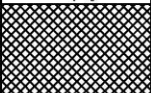
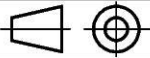
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal:	Zirfon	Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	
Mjerilo originala	Membrana		4	
1:1	Crtež broj: 01 - 4			List: 1

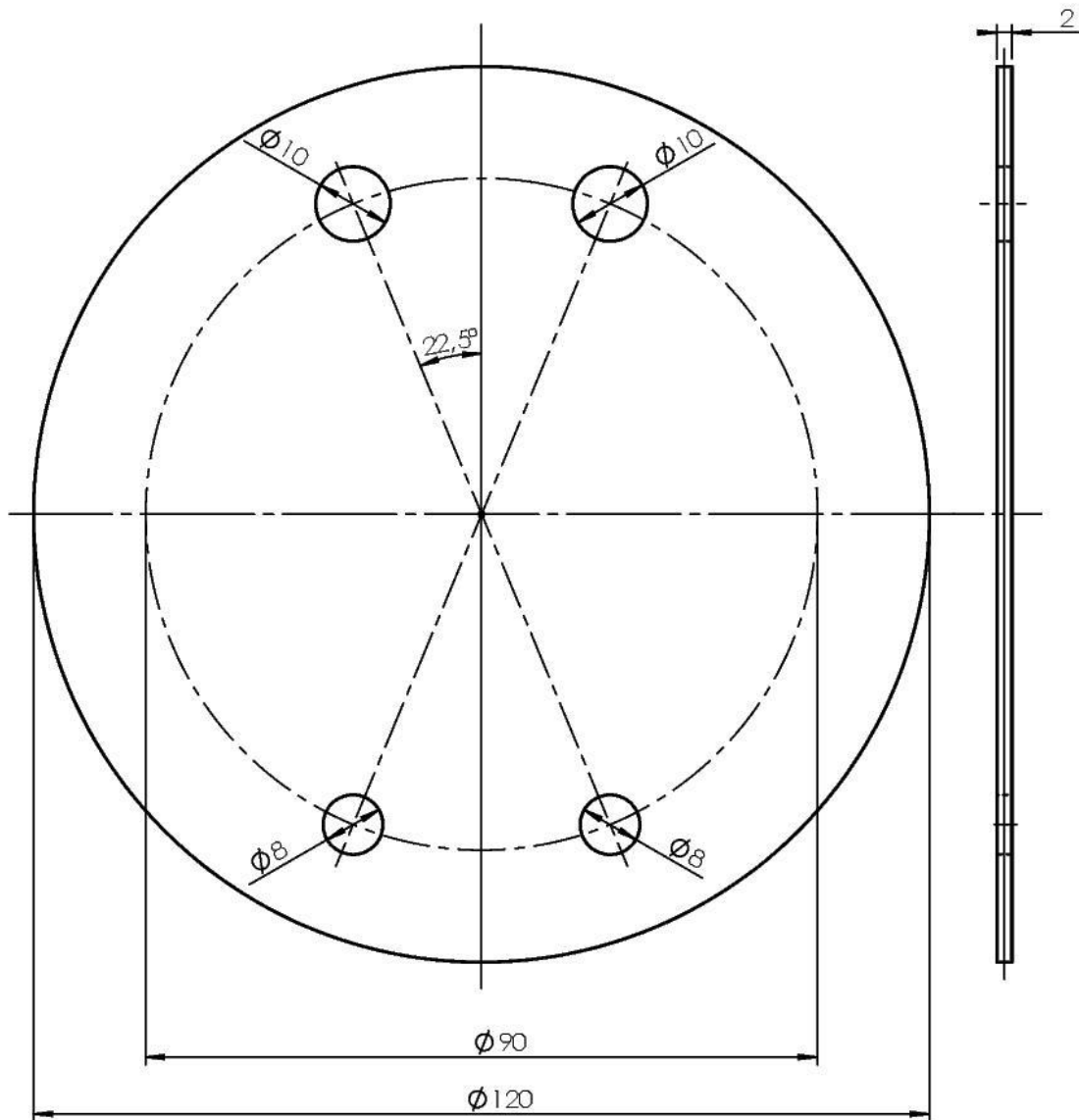



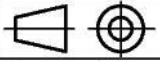
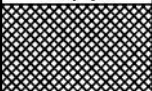
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	6.12.2013.	Ines Vedrina			
Razradio	6.12.2013.	Ines Vedrina			
Crtao	6.12.2013.	Ines Vedrina			
Pregledao					
Objekt:		Objekt broj:			
		R. N. broj:			
Napomena:				Kopija	
Materijal: SS316		Masa:			
		Naziv:			Pozicija:
Mjerilo originala		Vijak		5	Format: A4
1:1		Crtež broj: 01-5			Listova: 1/1
					List: 1

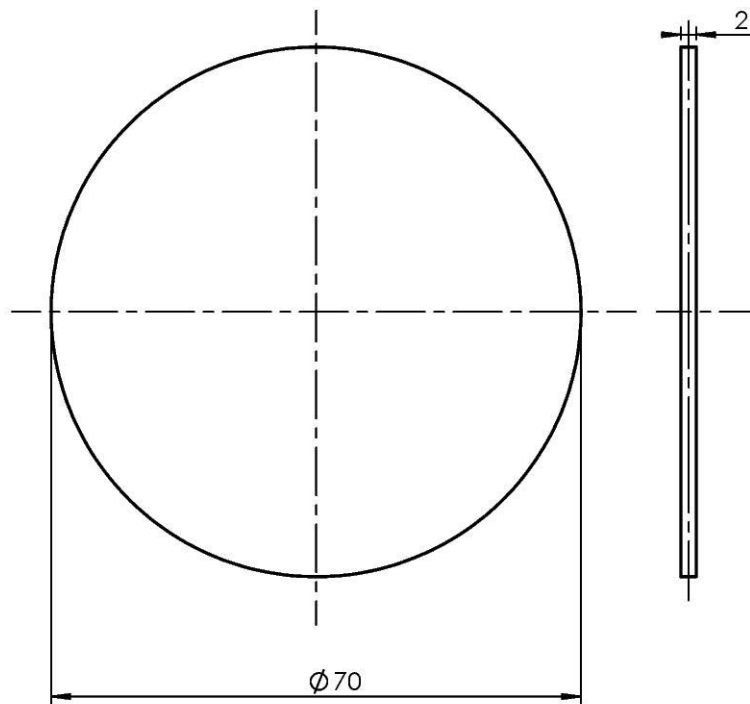
Design by CADLab


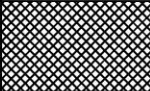



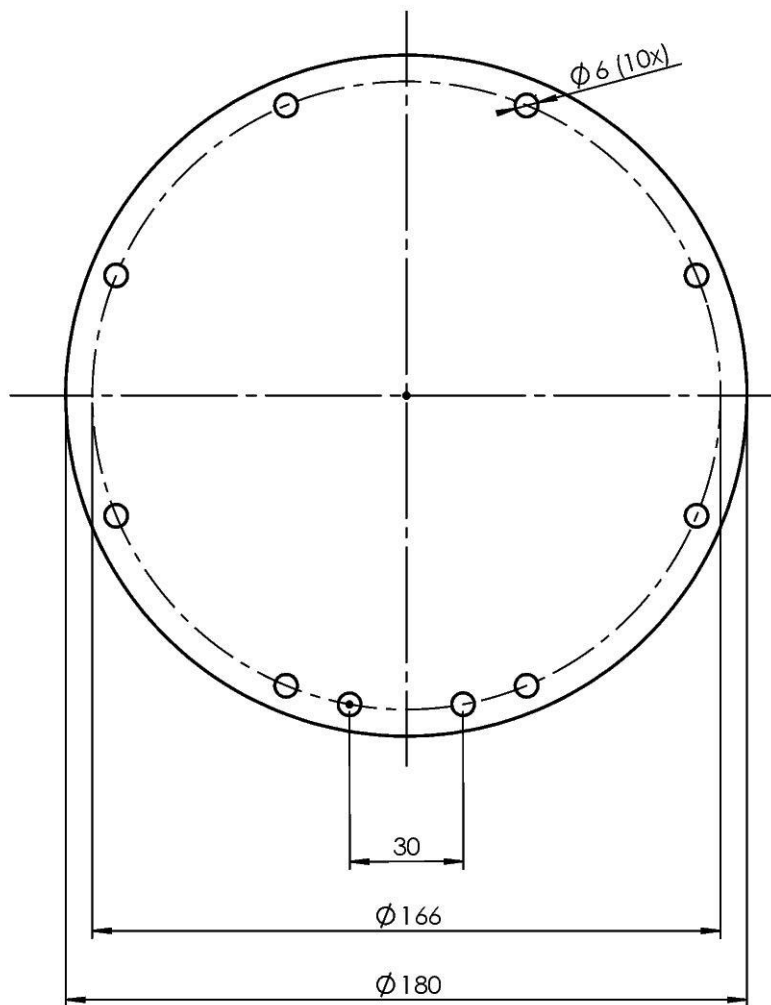
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal: SS316		Masa:		
		Naziv:		
Mjerilo originala		Vijak za pritezanje elektrolizatora		7
1:1		Crtež broj: 01-6		Format: A4
				Listova: 1/1
				List: 1


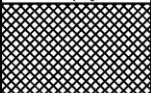
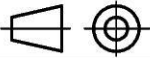


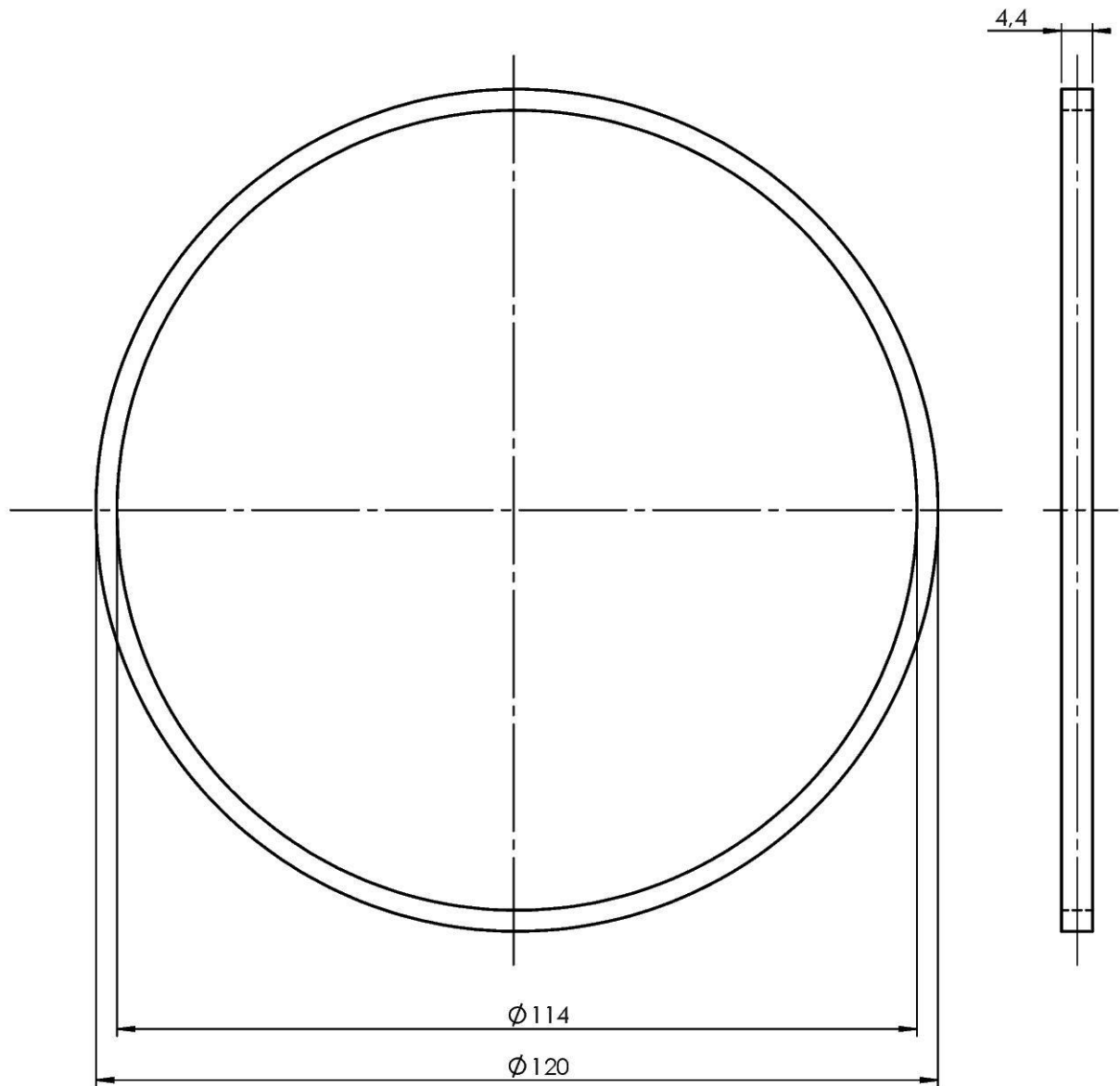
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal:	SS 316	Masa:		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv: Bipolarna ploča		Pozicija: 9	Kopija  Format: A4 Listova: 1/1 List: 1
Crtež broj: 01- 7				



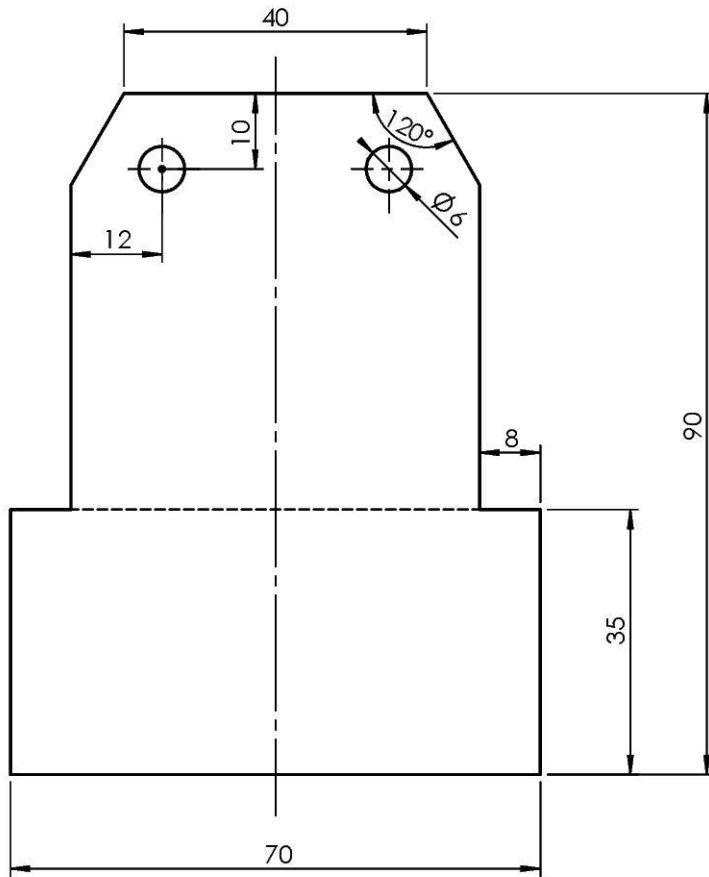
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	6.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal: Ni - metalna pjena		Masa:		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Metalna pjena		10	Listova: 1/1
Crtež broj: 01 - 8				List: 1



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal:	Pleksiglas	Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	
Mjerilo originala	Krajnja rubna ploča		11	
1:2	Crtež broj: 01-9			Listova: 1/1
				List: 1



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Razradio	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal: Keramika		Masa:		
		Naziv:		
Mjerilo originala		Keramički prsten		Pozicija:
1:1				12
		Crtež broj: 01-10		Format: A4
				Listova: 1/1
				List: 1



	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	7.12.2013.	Ines Vedrina		FSB Zagreb
Razradio	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Crtao	7.12.2013.	Ines Vedrina		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: Poniklani čelični lim			Masa:	
		Naziv:	Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala		Postolje	13	Listova: 1/1
1:1	Crtež broj: 01-11			List: 1