

**»Mladi za napredek Maribora 2024«
41. srečanje**

**MODEL BATERIJE CINK-ZRAK: ANALIZA DELOVANJA IN NJEN POTENCIAL V
ELEKTROMOBILNOSTI PRIHODNOSTI BREZ LITIJEVIH TEHNOLOGIJ**

Raziskovalno področje: KEMIJA

Raziskovalna naloga

Avtor: Vita Kotnik
Mentor: Karin Hvalec, Helena Lonjak

Šola: OŠ Martina Konšaka Maribor
Število točk: 170 / 170

Maribor, 2024

»Mladi za napredek Maribora 2024«
41. srečanje

**MODEL BATERIJE CINK-ZRAK: ANALIZA DELOVANJA IN NJEN POTENCIAL V
ELEKTROMOBILNOSTI PRIHODNOSTI BREZ LITIJEVIH TEHNOLOGIJ**

Raziskovalno področje: KEMIJA

Raziskovalna naloga

PROSTOR ZA NALEPKO

Maribor, 2024

Kazalo vsebine

1	Uvod.....	8
1.1	Družbena odgovornost	9
1.2	Struktura raziskovalne naloge	9
1.3	Hipoteze	10
2	Teoretični del: električna baterija	11
2.1	Kaj je električna baterija?	11
2.2	Zgodovina baterij	11
2.3	Uporaba baterij tipa cink-zrak	12
2.4	Prednosti baterij cink-zrak	13
2.5	Osnove elektrotehnike	14
2.5.1	Ohmov zakon	15
2.5.2	Električna moč.....	15
2.5.3	Električna energija.....	15
2.5.4	Električna kapaciteta	16
3	Teoretični del: struktura in delovanje baterije cink-zrak	17
3.1	Osnovna zgradba.....	17
3.2	Uporaba baterij tipa cink-zrak	18
3.3	Opis temeljnih elementov PSE v bateriji cink-zrak	18
3.3.1	Cink in njegove lastnosti	18
3.3.2	Kisik in njegove lastnosti	19
3.4	Delovanje baterije	20
3.4.1	Osnove redoks kemijske reakcije	20
3.4.2	Kemijske reakcije v bateriji cink-zrak	21
3.5	Osnove varstva pri delu	22
4	Praktični del: izdelava lastne baterije cink-zrak	23
4.1	Zasnova in načrtovanje ohišja.....	23
4.1.1	Modeliranje z orodjem TinkerCAD	23
4.1.2	3D-tisk ohišja	26
4.2	Priprava na laboratorijsko delo	27
4.3	Zgradba zračne (kisikove) katode	28
4.4	Zgradba cinkove anode	29

4.4.1	Postopek priprave elektrolita.....	29
4.4.2	Postopek priprave zgoščevalnega sredstva	32
4.4.3	Priprava cinkove paste	32
4.5	Končna sestava baterije.....	34
5	Metodologija dela	41
5.1	Merilne metode	41
5.2	Merilna oprema	41
5.3	Pisanje programske kode za zajem meritev v programskem jeziku Python	43
5.4	Izvedba meritev.....	43
6	Rezultati meritev.....	45
6.1	Napetost neobremenjene baterije (aktivacija).....	45
6.2	Praznilna karakteristika baterije.....	47
6.3	Karakteristika električne moči baterije	49
6.4	Kapaciteta baterije	50
6.5	Energijska gostota baterije	51
6.6	Preizkus baterij pod visoko tokovno obremenitvijo	54
7	Razprava in ugotovitve	56
7.1	Ovrednotenje naših hipotez.....	57
8	Zaključek.....	59
9	Seznam virov in literature	60
10	Priloga	62
10.1	Programska koda za zajem meritev z napravo SIGLENT	62

Kazalo slik

Slika 1: Voltov člen (Lower, 2024).....	12
Slika 2: Baterije tipa cink-zrak, ki se uporabljajo za slušne aparate, imajo drobne luknjice za zračenje (DURACELL, 2024).....	13
Slika 3: Osnovni električni tokokrog (lasten vir).....	14
Slika 4: Primer komercialne baterije proizvajalca ENERGIZER	17
Slika 5: Shematski prikaz baterije cink-zrak z vrisanim električnim tokokrogom in kemijskim principom delovanja (lasten vir)	22
Slika 6: Osnova modela baterije cink-zrak: kvader, dimenzij $80 \times 80 \times 8$ mm, postavljen v izhodišču koordinatnega sistema (lasten vir)	24
Slika 7: Priprava votlega dela (lasten vir)	25
Slika 8: Premik votlega dela v osnovno telo, višina 4 mm. (lasten vir).....	25
Slika 9: Primer izdelave poglobitve dimenzij $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ v osnovni gradnik (lasten vir)	26
Slika 10: Vsi sestavni deli modela naše baterije cink-zrak, priprava na 3D-tisk (lasten vir)...	27
Slika 11: Priprava na praktično delo v laboratoriju (lasten vir)	28
Slika 12: Čaša z destilirano vodo, nastavitev ničelne teže (tara) na tehtnici (lasten vir)	30
Slika 13: Odmerjanje KOH (lasten vir).....	30
Slika 14: Priprava elektrolita: raztapljanje KOH v destilirani vodi (lasten vir).....	31
Slika 15: Eksotermna reakcija pri raztapljanju KOH v destilirani vodi (lasten vir)	31
Slika 16: Priprava na tehtanje cinkovega prahu (lasten vir).....	32
Slika 17: Tehtanje cinkovega prahu (lasten vir).....	33
Slika 18: Priprava cinkove paste (lasten vir).....	33
Slika 19: Osnovni okvir ohišja z vstavljenjo električno prevodno grafitno ploščico (lasten vir)	34
Slika 20: Okvir zračne katode z vidnimi zračnimi kanali za dovod kisika (lasten vir).....	35
Slika 21: Okvir zračne katode obrnemo in položimo skozi nosilne vijake na grafitno ploščico (lasten vir)	35
Slika 22: Filc iz aktivnega oglja položimo skozi okvir na grafitno ploščico (lasten vir).....	36
Slika 23: Izdelana zračna katoda: filc iz aktivnega oglja leži v okvirju zračne katode.....	36
Slika 24: Bel filtrirni papir (membrana), nameščen nad zračno katodo (lasten vir)	37
Slika 25: Okvir za cinkovo anodo (cinkova pasta), položen preko membrane (lasten vir)	37
Slika 26: Priprava cinkove anode: cinkova pasta (spodaj levo), baterija (spodaj desno) in jeklena mrežica (zgoraj). (lasten vir).....	38

Slika 27: S cinkovo pasto zapolnimo pripravljeno odprtino v nosilcu cinkove anode (lasten vir)	39
Slika 28: Mrežico iz nerjavečega jekla vtisnemo v cinkovo pasto (lasten vir)	39
Slika 29: Dokončana cinkova anoda (lasten vir)	40
Slika 30: Baterijo zapremo s pokrovčkom še na zgornji strani in namestimo matice (lasten vir)	40
Slika 31: Možni načini delovanja elektronskega bremena SIGLENT	42
Slika 32: Elektronsko breme SIGLENT SDL1020X-E (lasten vir)	42
Slika 33: Priključitev naše baterije na merilno napravo SIGLENT (lasten vir)	43
Slika 34: Primer zajema meritev na osebni računalnik (lasten vir)	44
Slika 35: Komercialna baterija DURACELL TIP 13: levo. Priklop baterije na merilno napravo SIGLENT: desno (lasten vir)	45
Slika 36: Električna napetost neobremenjene baterije (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)	46
Slika 37: Potek električne napetosti ob konstantni obremenitvi (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)	48
Slika 38: Primerjava karakteristike električne moči (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)	50
Slika 39: Merjenje kapacitete baterije (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)	51
Slika 40: Postopek izračuna električne energije s pomočjo trapezne metode. (lasten vir)	52
Slika 41: Tehtanje aktivne snovi naše baterije cink-zrak. (lasten vir)	53
Slika 42: Potek električne napetosti naše baterije cink-zrak ob bremenilnem toku 50 mA	54
Slika 43: Potek električne napetosti baterije DURACELL ob bremenilnem toku 20 mA	55

Kazalo tabel

Tabela 1: Lastnosti cinka (Challoner, 2017)	18
Tabela 2: Lastnosti kisika (Challoner, 2017)	19
Tabela 3: Uporabljene sestavine za zračno katodo	29
Tabela 4: Uporabljene sestavine za cinkovo anodo	29
Tabela 5: Določitev energijske gostote	53
Tabela 6: Povzetek karakteristik komercialne baterije DURACELL in naše baterije	56
Tabela 7: Izvorna koda v jeziku Python: merjenje karakteristike baterije	62

Povzetek

V nalogi je predstavljen lastno izdelan model primarne baterije cink-zrak. Spoznali smo se z osnovami elektrokemije in preučili redoks reakcijo, na kateri temelji ta tip baterije. V orodju za 3D-modeliranje smo načrtali ohišje baterije. S pomočjo cinkovega prahu, kalijevega hidroksida, vode in želirnega sredstva smo izdelali cinkovo pasto, ki služi kot anoda, ki je prepojena z elektrolitom. Za zračno katodo smo uporabili filc iz aktivnega oglja. Običajni laboratorijski filtrirni papir je služil kot membrana med strukturama anode in zračne katode. Karakteristike izdelane baterije smo izmerili s pomočjo posebne naprave – aktivnega bremena – in jih primerjali s karakteristikami komercialne baterije.

Pokazali smo, da ima izdelana baterija podobne lastnosti kot komercialna baterija enakega tipa. Električna napetost neobremenjene baterije je bila praktično enaka (1,45 V), energijska gostota pa nekoliko nižja zaradi manj učinkovitih komponent. Zaradi večje velikosti izdelane baterije, je le-ta zmogljivejša od komercialne baterije.

Baterije tipa cink-zrak imajo velik potencial v elektromobilnosti prihodnosti, oziroma v hranilnikih električne energije (Griljc, 2021), kjer trenutno še prevladujejo litijeve tehnologije (npr.: litij-ionske, litij-železov fosfatne (Kopač, 2009)). Zaradi omejenih zalog litija bo človeštvo v prihodnosti zagotovo moralo preiti na alternativne rešitve, ena od njih je v tej nalogi predstavljena tehnologija cink-zrak. Predstavljena naloga zato naslavlja zelo pomemben globalni družbeno-ekonomski problem prihodnosti.

Zahvala

Zahvalila bi se rada mentoricama, ki sta me pri raziskovalni nalogi vodili in podajali nasvete. Zahvaljujem se učiteljici slovenščine za jezikovni pregled naloge. Zahvaljujem se mariborskemu podjetju za izposajo merilnega inštrumenta in izvedbo 3D-tiskanja sestavnih delov ohišja moje baterije. Prav tako bi se rada zahvalila svojim staršem za podporo in pomoč pri izvedbi poskusov.

1 Uvod

Globalno segrevanje in z njim povezane klimatske spremembe zahtevajo postopno ukinitve uporabe fosilnih goriv za pridobivanje energije (termoelektrarne) in za transport (motorji z notranjim izgorevanjem). V zadnjem času smo tako priča porastu elektromobilnosti. Vsa električna vozila v današnjem času (električni skuterji, električna kolesa, električni skiroji in električni avtomobili) temeljijo na uporabi polnilnih litij-ionskih baterij. Te vrste baterij odlikuje visoka energijska gostota (količina energije na kilogram), možnost razmeroma velikega števila polnilnih ciklov in razmeroma nizkega samopraznjenja. Litijeve tehnologije pa imajo žal tudi nekaj resnih slabosti – pri procesu praznjenja in polnjenja te vrste baterij lahko pride do močnega segrevanja, ki lahko privede do intenzivnega požara. Spomnimo na incident v zvezi s pametnim telefonom Galaxy Note 7 (Huš, 2016).

Litij je razmeroma redka kovina. Nahaja v zemeljski skorji vezan v spojine (minerali, kamnine), zaradi njegove zelo visoke kemijske reaktivnosti se ne pojavlja v elementarni obliki (Smrdu, 2009). Njegova porazdelitev je dokaj neenakomerna. Največji viri litija so minerali, kot so: spodmolini, lepidolit, petalit in ambilit. Glavna nahajališča litija so v Avstraliji, Čilu, Argentini, Kitajski in ZDA. Čile ima eno največjih svetovnih zalog litija, predvsem zaradi velikih slanih jezer, kot je Salar de Atacama. Avstralija je drugi največji proizvajalec litija, s pomembnimi nahajališči na zahodu celine. Ta geografska koncentracija ustvarja odvisnost od teh virov in potencialna geopolitična tveganja. Postopek pridobivanja litija, zlasti iz slanih jezer, lahko prinaša okoljske izzive, kot so negativni vplivi na vodo in ekosisteme. To postavlja vprašanja o prihodnosti trajnostnega pridobivanja in izkoriščanja litija.

Za razliko od litija pa je cink kovina, ki je na svetu v izobilju. Njegove količine so geografsko zelo razpršene, zato je cink dostopen praktično po vsem svetu. V raziskovalni nalogi bomo analizirali delovanje in izdelali praktični model primarne baterije cink–zrak. Spoznali se bomo z redoks kemijsko reakcijo, ki poteka v tem tipu baterije in analitično dokazali, da pri tem ne nastajajo produkti, ki bi lahko povzročili gorenje oziroma eksplozijo. Določili bomo tudi njeno energijsko gostoto (Zhang, 2022).

1.1 Družbena odgovornost

Rastoče potrebe sodobne družbe po energiji in z njo povezane težave z večanjem onesnaženosti okolja in škodljivimi klimatskimi spremembami vzpodbujajo pri raziskovalcih po vsem svetu veliko zanimanja za razvoj tehnologij čiste energije, vključno z gorivnimi celicami, kovinsko-zračnimi baterijami, superkondenzatorji in proizvodnjo tako imenovanega »zelenega« vodika. Raziskovalci v sodobnem času ponovno odkrivajo pomen in potencial baterij cink-zrak zaradi njihove nizke cene, visoke teoretične energijske gostote, visoke ravni varnosti in zanesljivosti ter prijaznosti okolju. Baterijski sistemi cink-zrak so prepoznani kot obetavni viri energije za sisteme shranjevanja energije v omrežju ter kot alternativa ali dopolnitev litij-ionskih baterij pri električnih vozilih naslednje generacije. Kljub temu ostaja razvoj visokozmogljivih polnilnih (sekundarnih) baterij cink-zrak za znanstvenike velik izziv.

Baterije cink-zrak so bile odkrite v začetku devetnajstega stoletja, vendar niso bile komercialno uporabne vse do leta 1930, ko so bile zgrajene velike industrijske celice za železniško signalizacijo. Razvoj tanke in učinkovite zračne katode, ki se uporablja v današnjih baterijah tipa cink-zrak, se je pojavil v zgodnjih sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. To je privedlo do miniaturizacije in končno do komercializacije gumbnih celic cink-zrak leta 1977. Današnje različice baterij cink-zrak vključujejo gumbne celice, baterije in majhno število prilagojenih paketov baterij. Zagotavljajo najvišjo energijsko gostoto med vsemi komercialno-dostopnimi baterijskimi sistemi in nizke obratovalne stroške. Ta prednost izhaja iz uporabe atmosferskega kisika kot katodnega reaktanta, ki ji omogoča polnjenje z več cinkovega 'goriva', ki je edini material, ki se porablja med praznjenjem. Povečana količina anodnega materiala omogoča celici do 5-krat večjo kapaciteto kot običajni sistemi cinkovih anod, ki morajo vsebovati svoj oksidant znotraj celice. Primer so alkalne celice, ki shranjujejo kisik v obliki manganovega dioksida, kar predstavlja približno 60 % mase celice. Večina baterij vsebuje približno enako količino anodnega materiala kot katodnega, zato je njihova življenjska doba omejena glede na to, kateri se prej porabi (Zhang, 2022).

1.2 Struktura raziskovalne naloge

V tej raziskovalni nalogi bomo zgradili lastno baterijo cink-zrak in tudi izmerili njene karakteristike. Raziskovalna naloga ima naslednjo strukturo:

- poglavje 1 opisuje namen raziskovalne naloge ter uvodne teoretične osnove z družbeno odgovornostjo;
- poglavje 2 opisuje osnovni princip delovanja električne baterije, njihovo uporabo, osnove elektrokemije in osnove elektrotehnike;
- poglavje 3 podaja opis strukture baterije cink-zrak ter podaja opis njenih osnovnih gradnikov;
- poglavje 4 je osrednje poglavje, ki opisuje postopek izgradnje naše lastne baterije cink-zrak;
- poglavje 5 podaja opis merilnih metod, ki smo jih uporabili za določanje karakteristik naše baterije cink-zrak;
- poglavje 6 podaja rezultate meritev in našega eksperimentalnega dela;
- v poglavju 7 smo zbrali naše ugotovitve, diskusijo doseženih rezultatov in podali analizo doseženih hipotez;
- poglavje 8 je sklepno poglavje;
- poglavji 9 in 10 pa vsebujeta seznam uporabljene literature in virov ter navajata uporabljeno programsko kodo.

1.3 Hipoteze

H1: Primarno baterijo tipa cink-zrak je možno izdelati iz dostopnih in manj nevarnih sestavin v primerjavi z litij-ionsko baterijo.

H2: Električna napetost in energijska gostota naše izdelane primarne baterijske celice tipa cink-zrak sta primerljivi s komercialno baterijo enakega tipa.

H3: Baterija tipa cink-zrak ne porablja vode v elektrolitu.

2 Teoretični del: električna baterija

2.1 Kaj je električna baterija?

Električna baterija je generator oz. vir električne energije. Sestavljena je iz ene ali več povezanih elektro-kemijskih celic z zunanjimi priključki, na katere povežemo električni porabnik. Pri bateriji imenujemo pozitivni priključek katoda, negativni priključek pa anoda. Negativna elektroda oz. anoda, predstavlja vir elektronov, ki tečejo po električnem vodniku skozi električni porabnik do pozitivnega priključka – katode. Pri delovanju baterije poteka v njeni notranjosti tako imenovana redoks kemijska reakcija, pri kateri hkrati poteče oksidacija in redukcija, pri tem se visoko-energijski reaktanti pretvarjajo v nizko-energijske produkte. Razlika med njunima energijama predstavlja električno energijo, ki se porablja (pretvarja v druge oblike energij, kot so: toplotna energija, svetloba, potencialna energija, kinetična energija) na električnem bremenu. Poznamo dve vrsti baterij: primarne in sekundarne. Pri primarnih baterijah lahko poteka reakcija samo v eni smeri. Ko se baterija iztroši (reaktanti se v celoti pretvorijo v produkte), moramo baterijo razgraditi in predelati. Sekundarne, oz. polnilne baterije pa lahko praznimo in polnimo večkrat. Z dodajanjem električne energije od zunaj lahko obrnemo proces redoks reakcij znotraj baterije, s čimer produkti ponovno postanejo reaktanti za naslednji cikel uporabe baterije kot generatorja električne energije.

Glede na vrsto elektrolita pa baterije delimo še na dve vrsti: mokre baterijske celice in suhe baterijske celice. Pri mokri celici je elektrolit v tekoči obliki. Primer takšne baterije je 12 V akumulator za zagon avtomobilov z motorjem na notranje izgorevanje. Pri suhih baterijskih celicah pa je elektrolit v obliki paste, zato so te vrste baterij manj podvržene možnosti iztekanja elektrolita (Shengjie, 2023). Primer celice, ki je predmet našega raziskovanja spada v vrsto suhih baterijskih celic.

2.2 Zgodovina baterij

Prva uporabna električna baterija se imenuje Voltov člen, ki ga prikazuje slika 1. Izumil jo je italijanski kemik Alessandro Volta, ki je svoj eksperiment objavil leta 1799. Po tem italijanskem kemiku se imenuje mednarodna enota za električno napetost – volt. Voltov člen je sestavljen iz več izmenjujočih bakrenih in cinkovih plošč, ki so med seboj ločene s papirjem

(kartonom), ki je prepojen z elektrolitom (Eučbeniki, 2023). Pri tem cink predstavlja anodo, baker pa katodo.



Slika 1: Voltov člen (Lower, 2024)

Področje kemije, ki preučuje delovanje baterij, se imenuje elektrokemija. Volta je tako znan kot eden od začetnikov elektrokemije.

2.3 Uporaba baterij tipa cink-zrak

Gumbne baterije tipa cink-zrak se uporabljajo za številne potrošniške in industrijske namene. Najprimernejše so za naprave, ki se uporabljajo pogosto ali neprekinjeno, delujejo pri nizkih do srednjih stopnjah praznjenja in zahtevajo visoko energijsko gostoto ter nizke obratovalne stroške. Idealne so za uporabo v slušnih aparatih, ki se običajno nosijo do 16 ur na dan in imajo nizko do zmerno porabo električnega toka (povprečno nekaj miliamperov). Pogosto se uporabljajo tudi za napajanje različnih medicinskih naprav in pripomočkov, kot so monitorji z nadzornimi sistemi za bolnike, živčni in mišični stimulatorji ter črpalke za infuzijo zdravil. Zelo primerne so tudi za uporabo v telekomunikacijskih napravah, kot so pozivniki in brezžične slušalke (DURACELL, 2024).



Slika 2: Baterije tipa cink-zrak, ki se uporabljajo za slušne aparate, imajo drobne luknjice za zračenje (DURACELL, 2024)

2.4 Prednosti baterij cink-zrak

Glavne prednosti baterije cink-zrak so (DURACELL, 2024):

- **visoka energijska gostota;** baterija cink-zrak ima gravimetrično gostoto do 442 vatnih ur na kilogram (Wh/kg) in volumetrično energijsko gostoto do 1673 vatnih ur na liter (Wh/l). To je do 5-krat večja energija od alkalnih sistemov in sistemov z živim srebrom. Najvišja energija se doseže pri pogosti ali neprekinjeni uporabi, nizkih do srednjih stopnjah praznjenja ter delovnih temperaturah med 0 °C in 50 °C;
- **ugodna karakteristika praznjenja;** običajno celice cink-zrak vzdržujejo konstantno izhodno napetost med 1,1 in 1,25 voltov skozi celotno življenjsko dobo praznjenja celice;
- **dolga skladiščna doba;** dokazano je, da zaprta (neaktivirana) celica zadrži več kot 98 % svoje nazivne zmogljivosti po enem letu skladiščenja pri 21 °C. Neaktiviran rok trajanja je ocenjen na tri leta.
- **varnost;** celice ponujajo način samostojnega odzračevanja vseh plinov, ki nastanejo v notranjosti, skozi luknje za dostop zraka, ki se nahajajo na katodi, s čimer se odpravi

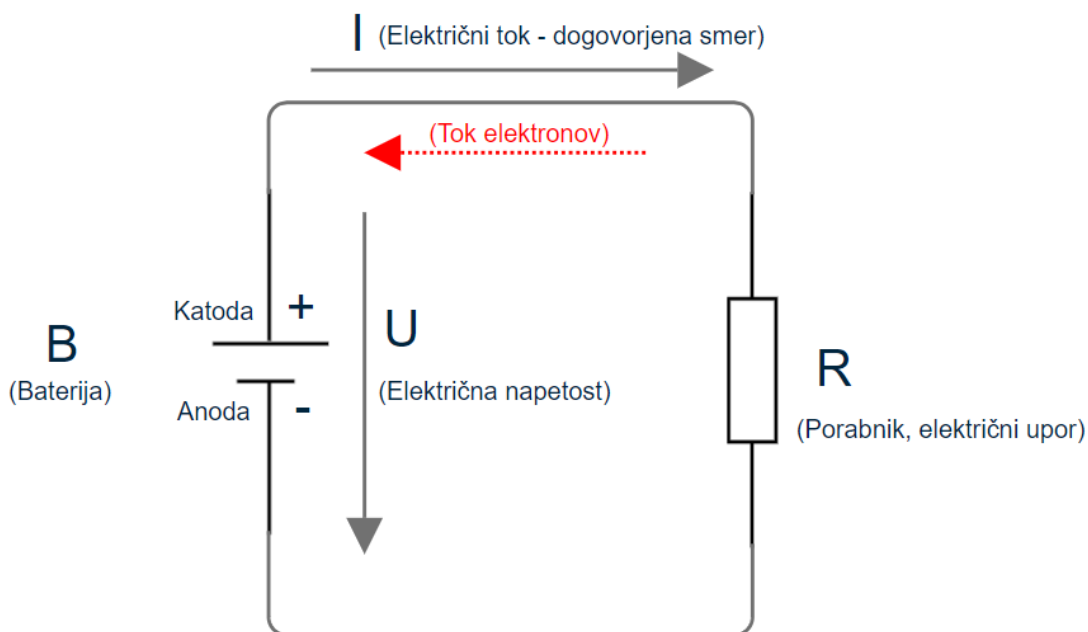
možnost poka ali celo eksplozije. Celice cink-zrak na splošno veljajo varne za okolje in običajno ne zahtevajo posebnega postopka ravnanja ali odlaganja;

- **nizki obratovalni stroški**; ponujajo nizke obratovalne stroške na miliamper uro pri pogosti ali stalni uporabi (DURACELL, 2024).

2.5 Osnove elektrotehnike

Za razumevanje delovanja baterije kot vira napajanja v električnem krogu se moramo spoznati z osnovami elektrotehnike (Žalar, 2000). Sklenjen električni tokokrog sestavljajo trije osnovni gradniki (slika 3):

- baterija kot vir električne napetosti,
- upor, porabnik električne energije,
- vodniki za povezovanje tokokroga.



Slika 3: Osnovni električni tokokrog (lasten vir)

Vir električne napetosti predstavlja baterija z oznako B. Električno napetost označujemo z U, njeno vrednost pa izrazimo z enoto volt (V). Baterija cink-zrak bo generirala tipično napetost okrog 1,4 V. Pozitivni pol baterije je v simbolu označen z daljšo prečno črto, negativni pol pa s krajšo. Pozitivni priključek baterije se imenuje katoda, negativni pa anoda.

Ko je električni tokokrog sklenjen (slika 3), bo električna napetost U pognala skozi vezje električni tok, ki ga označimo z oznako I . Osnovna enota za jakost električnega toka je amper (A). Dogovorjena smer električnega toka (Žalar, 2000), kot ga označujemo na električnih shemah, je od pozitivnega priključka proti negativnemu, pri čemer pa je dejanska smer toka elektronov ravno obratna (od negativne anode proti pozitivni katodi).

2.5.1 Ohmov zakon

Jakost električnega toka je sorazmerna z višino napetosti U in obratno sorazmerna z vrednostjo upornosti električnega porabnika R . Osnovna merska enota za določanje upornosti električnega porabnika se imenuje ohm (Ω). Zgoraj opisano razmerje med električno napetostjo, tokom in upornostjo opisuje Ohmov zakon, ki ga lahko predstavimo z naslednjimi tremi povezanimi enačbami:

$$I = \frac{U}{R} \qquad R = \frac{U}{I} \qquad U = I \cdot R$$

2.5.2 Električna moč

Električna moč je določena s produktom električne napetosti in jakosti električnega toka. Električno moč označujemo z veliko črko P , njena osnovna enota pa je vat – watt (W):

$$P = U \cdot I$$

Električni porabnik ima moč 1 W, če npr. pri napetosti 1 V skozenj teče električni tok jakosti 1 A.

2.5.3 Električna energija

Električna energija je določena z električno močjo in časom. Električno energijo označujemo s črko W , njena osnovna enota je vat-sekunda (Ws), ki ustreza enemu joulu (1 J):

$$W = P \cdot t$$

Pri merjenju porabe električne energije v gospodinjstvih se uporablja večja enota, in sicer kilovatna ura (kWh). Primer: če električni porabnik z nazivno električno močjo 100 W deluje 10 ur, potem znaša poraba električne energije 1 kilovatno uro (1 kWh).

2.5.4 Električna kapaciteta

Električna kapaciteta je pomembna količina pri vrednotenju električnih baterij. Pove nam, koliko časa je neka baterija sposobna zagotavljati določeno jakost električnega toka skozi električni porabnik. Električno kapaciteto označujemo s črko C , njena osnovna enota je amperska sekunda (As):

$$C = I \cdot t$$

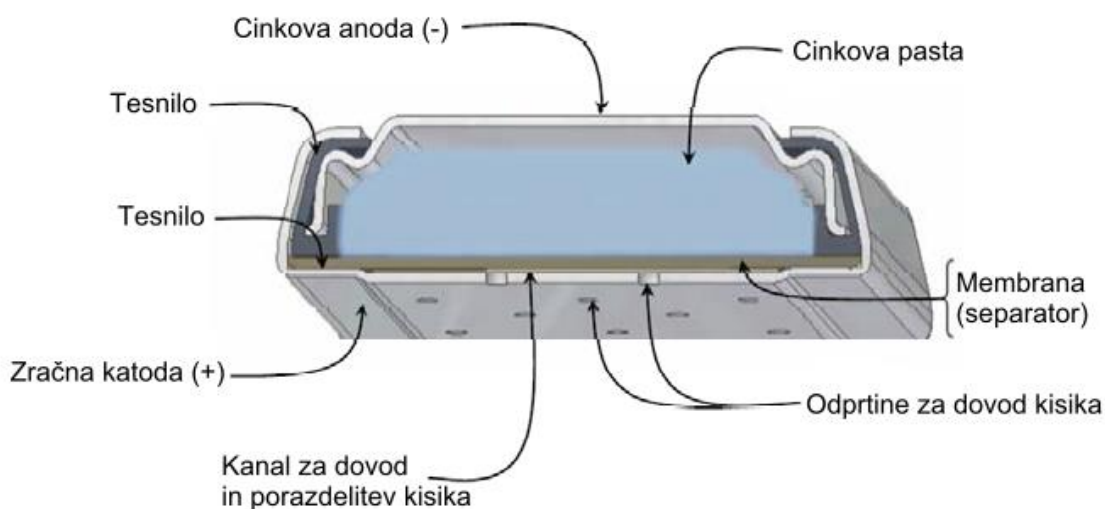
Poznamo tudi večjo enoto, to je amperska ura (Ah), ki jo pogosto uporabljamo pri večjih baterijskih sistemih. Kapaciteto manjših baterij, kakršna je predstavljena v tej raziskovalni nalogi, pa opisujemo z manjšo enoto, to je miliamperska ura (mAh) (Žalar, 2000).

Primer: če je neka baterija sposobna zagotavljati jakost električnega toka 50 mA v času 20 h, potem znaša njena kapaciteta 1000 mAh. To ustreza tudi 1 Ah. Na podoben način bomo določali kapaciteto naše baterije cink-zrak.

3 Teoretični del: struktura in delovanje baterije cink-zrak

3.1 Osnovna zgradba

Baterije »Zinc Air Prismatic« proizvajalca ENERGIZER (ENERGIZER, 2024) so zasnovane tako, da omogočajo vstop zraka v zračne odprtine in preprečujejo iztekanje elektrolita iz baterije. Tesnilo se uporablja za tesnjenje med cinkovo anodo in zračno katodo. Tesnilo tudi električno izolira negativno anodo od pozitivne katode. Zračna elektroda in ohlapna plast teflona sta stisnjena na trak tesnilne mase na dnu katode. Ta teflonska plast omogoča vstop kisika v baterijo, hkrati pa preprečuje iztekanje tekočine (ENERGIZER, 2024).



Slika 4: Primer komercialne baterije proizvajalca ENERGIZER

Sestavni deli naše baterije cink-zrak:

- ohišje baterije,
- pozitivni priključek (zračna katoda),
- filter/membrana,
- tanka mrežica iz nerjavečega jekla,
- negativni priključek (cinkova anoda).

3.2 Uporaba baterij tipa cink-zrak

Baterije tipa cink-zrak se uporabljajo v številnih potrošniških napravah in industrijskih sistemih (CEGASA, 2024).

3.3 Opis temeljnih elementov PSE v bateriji cink-zrak

V bateriji cink-zrak prihaja do reakcije med cinkom in kisikom. V nadaljevanju bomo oba elementa (reaktanta) tudi opisali.

3.3.1 Cink in njegove lastnosti

Čisti cink je srebrno-sive barve. Na zraku reagira s kisikom in z ogljikovim dioksidom ter hitro tvori tanko plast blede sivega cinkovega karbonata (ZnCO_3), zaradi česar je precej nereaktiven (Challoner, 2017).

Tabela 1: Lastnosti cinka (Challoner, 2017)

Kemijski simbol	Zn
Atomsko število	30
Premer atoma	135 pm
Oksidacijska stanja	+1, +2
Relativna atomska masa	65,39
Tališče	420 °C (787 °F)
Vrelišče	907 °C (1665 °F)
Elektronska konfiguracija	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Gostota	7,14 g/cm ³

Cink je 24. najpogostejši element v zemeljski skorji in se pojavlja v številnih mineralih.

Za vsa živa bitja je nujno potreben in ga najdemo v številnih živilih, kot so meso, morski sadeži, mlečni izdelki in žitarice.

Vsako leto pridobimo okrog 12 milijonov ton cinka. Je četrta najbolj uporabljena kovina. Več kot polovica se ga porabi za galvanizacijsko zaščito železnih in jeklenih površin pred korozijo – postopek se imenuje cinkanje (Haavisto, 1996). Cink je uporaben tudi za proizvodnjo drobnih kovinskih delov z metodo litja. Z vlivanjem staljenega cinka v kalupe se lahko ustvarijo različne kompleksne oblike brez dodatne obdelave. Cink je idealen za litje, ker je odporen proti koroziji in ima s 420 °C relativno nizko tališče. Zelo pogosto se uporablja tudi v zlitinah npr.: za kovance. Kot kovina se uporablja v negativnih polih cink-ogljikovih baterij, ki so v veliki meri

izpodrinile alkalne baterije. Slika 2 prikazuje primer komercialne baterije cink-zrak, ki se uporablja v slušnih aparatih.

V predlagani bateriji bo cink služil kot reaktant. Kot nizkoenergijski produkt redoks kemijske reakcije v bateriji cink-zrak nastaja cinkov oksid, anorganska spojina s formulo ZnO. Cinkov oksid je beli prah, netopen v vodi, nekoč je bil priljubljen med umetniki, uporabljali so ga za slikanje. Danes ga dodajajo v plastiko, da jo zaščitijo pred ultravijoličnim sevanjem in v sončne kreme. Uporablja se tudi kot dodatek v kalaminskem losjonu za blaženje srbečih izpuščajev (Gray, 2012).

3.3.2 Kisik in njegove lastnosti

Kisik je drugi najpogostejši element v atmosferi (21 %), za dušikom. Je tudi drugi najpogostejši element na Zemlji nasploh ter daleč najpogostejši element v zemeljski skorji, kjer se večinoma pojavlja v oksidnih, silikatnih (SiO_2), karbonatnih (CO_3^{2-}) in sulfatnih (SO_4^{2-}) mineralih. Je eden najreaktivnejših elementov, zato ga najdemo vezanega v spojinah – na primer v vodi, ogljikovem dioksidu in različnih kamninah. (Challoner, 2017).

Tabela 2: Lastnosti kisika (Challoner, 2017)

Kemijski simbol	O
Premier atoma	60 pm
Oksidacijska stanja	-2, -1, +1, +2
Relativna atomska masa	15,99
Tališče	-219 °C (-362 °F)
Vrelišče	-183 °C (-297 °F)
Elektronska konfiguracija	[He] $2s^2 2p^4$
Gostota	1,43 g/l

Razlog za prisotnost velike količine elementarnega kisika v atmosferi in oceanih je dejstvo, da ga določeni organizmi stalno proizvajajo kot enega od produktov fotosinteze. Kisik nastaja v prvi, od svetlobe odvisni fazi tega procesa, ko sončna svetloba razcepi vodne molekule na vodikove ione (H^+), plinasti kisik in proste elektrone. Vodikovi ioni in prosti elektroni nadalje s pomočjo prenašalnih molekul sodelujejo pri nastanku ATP (adenozin trifosfat) in NADPH (nikotinamid adenin dinukleotid fosfat), ki vstopita v drugo, od svetlobe neodvisno fazo, kjer poteka redukcija CO_2 v ogljikove hidrate (Dolenc Koce, 2021). Kisikovi atomi so prisotni tudi

v številnih drugih molekulah, vključenih v življenjske procese, vključno z beljakovinami, maščobami in DNK.

Nekatere vesoljske rakete vsebujejo tekoči kisik, ločen od goriva. Elementarni kisik uporabljajo tudi v bolnišnicah kot dihalno podporo za paciente, v kombinaciji z drugimi plini (dušik, helij) pa tudi v jeklenkah za potapljanje. Čisti kisik na industrijski ravni proizvajajo predvsem s frakcionirno destilacijo zraka (Gray, 2012).

V predlagani bateriji bo tudi kisik služil kot reaktant.

3.4 Delovanje baterije

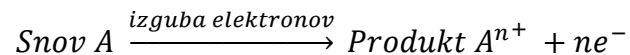
V bateriji cink-zrak prihaja do oksidacije cinka, pri čemer bo cinkova anoda (elektroda z negativnim potencialom) oddala elektrode, medtem ko bo kisik na katodi s pozitivnim električnim potencialom reduciral in pridobil elektrone, ki bodo po električnem vodniku pripotovali iz cinkove anode. Električni tok (tok elektronov) bo na poti od katode proti anodi oddal energijo priključenemu električnemu bremenu. Baterija cink-zrak bo delovala vse dokler sta hkrati izpolnjena naslednja pogoja za potek redoks reakcije:

- Na razpolago je dovolj cinka. Ko ves cink oksidira, se redoks reakcija konča in baterije preneha generirati električni tok;
- Omogočen je dotok kisika iz okolice. Če dotok zraka oz. kisika prekinemo, redukcija ne bo potekala in baterija bo prenehala generirati električni tok (Zongping, 2023).

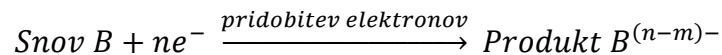
3.4.1 Osnove redoks kemijske reakcije

Redoks reakcija je vrsta kemijske reakcije, pri kateri se hkrati odvijata oksidacija in redukcija (Smrdu, 2009). Izraz "redoks" izhaja iz kombinacije besed "redukcija" in "oksidacija". Oksidacija se nanaša na oddajanje elektronov, medtem ko se redukcija nanaša na sprejemanje elektronov. V redoks reakcijah ena snov oksidira, tj. izgubi elektrone, medtem ko druga snov reducira, tj. pridobi elektrone (Smrdu, 2009). Elektroni, ki se prenašajo med oksidirano in reducirano snovjo, predstavljajo električni tok. Redoks reakcije so pogoste v številnih kemijskih in bioloških procesih. Primer redoks reakcije je reakcija med železom in kisikom, kjer železo oksidira (izgubi elektrone) in tvori rjo, medtem ko kisik reducira (pridobi elektrone). Splošna oblika redoks reakcije je:

OKSIDACIJA:



REDUKCIJA:

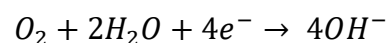


Pri tem n in m predstavljata oksidacijsko stanje elementov v snovi A in B , e^{-} pa elektrone (Schröder, 2015).

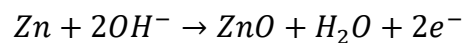
3.4.2 Kemijske reakcije v bateriji cink-zrak

Delovanje baterije cink-zrak temelji na naslednjih dveh kemijskih reakcijah (Zongping, 2023):

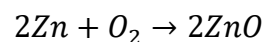
REDUKCIJA (katoda, višji potencial):



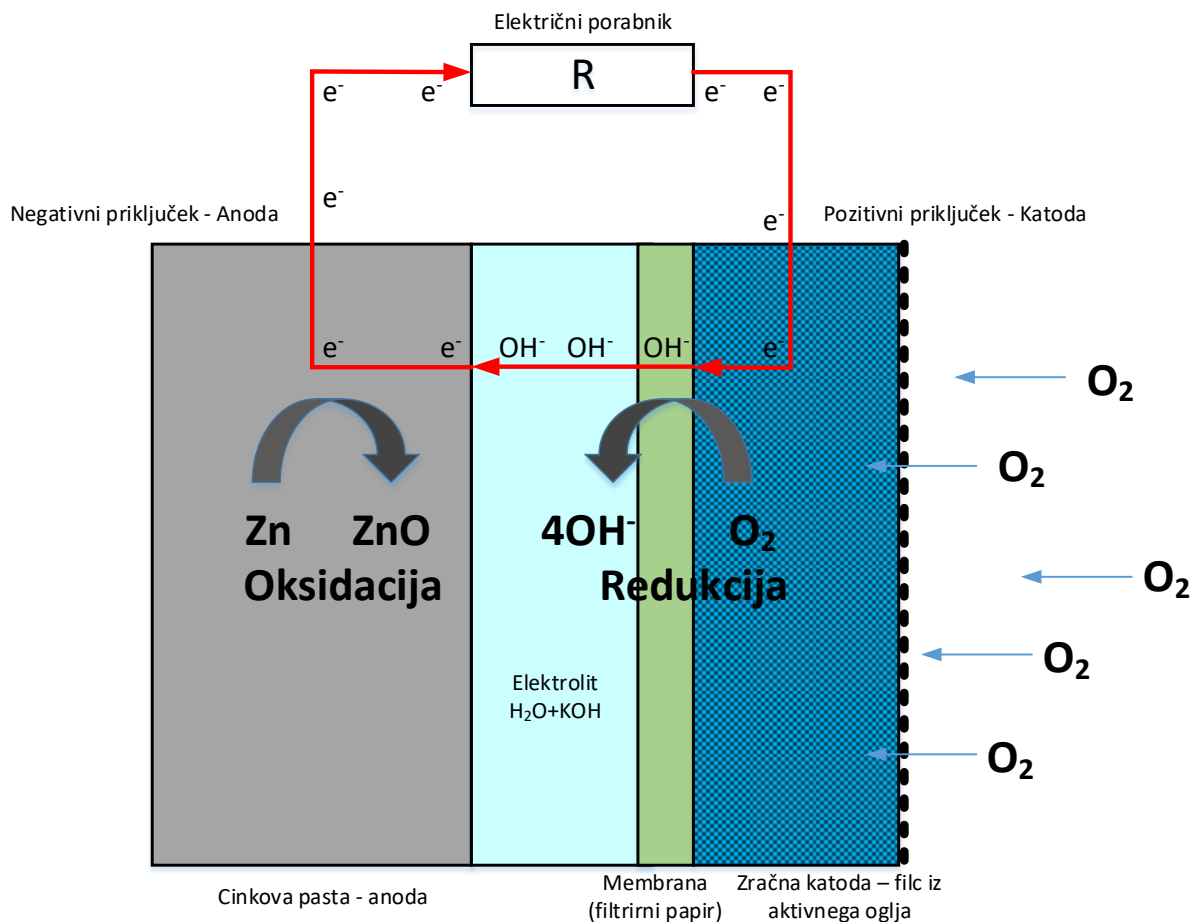
OKSIDACIJA (anoda, nižji potencial):



Ti dve reakciji združimo v skupno reakcijo:



Zgradbo baterije cink-zrak ter njeno delovanje na osnovi zgoraj zapisanih kemijskih enačb prikazuje poenostavljena shema na sliki 5.



Slika 5: Shematski prikaz baterije cink-zrak z vrisanim električnim tokokrogom in kemijskim principom delovanja (lasten vir)

3.5 Osnove varstva pri delu

V naslednjem poglavju opisujemo postopek sestave naše lastne baterije cink-zrak. Pri eksperimentalnem delu s kemikalijami v kemijski učilnici moramo upoštevati temeljna načela varstva pri delu. Uporabljati moramo zaščitno haljo, rokavice in zaščitna očala. Dolgi lasje morajo biti speti. Prostor mora biti dovolj osvetljen. Na dosegljivem mestu mora biti škatla s prvo pomočjo in vir tekoče vode. S kemijskimi pripomočki ravnamo skrajno previdno. Kemikalije imamo spravljene v označenih posodicah. Prav tako tudi vmesne produkte shranjujemo v zaprtih in označenih stekleničkah. Delo opravljamo pod nadzorom odrasle osebe (mentorja).

4 Praktični del: izdelava lastne baterije cink-zrak

V tem poglavju podajamo natančen opis našega eksperimentalnega dela. Predstavili bomo, kako smo izdelali posamezne komponente naše baterije cink-zrak.

V prvem delu bomo spoznali zasnovo in načrtovanje ohišja naše baterije. Ohišje je ključnega pomena, saj zadržuje vse kemijsko aktivne dele baterije na predvidenih mestih. Prav tako nam omogoča varno rokovanje z baterijo, ko bomo merili njene karakteristike.

V nadaljevanju podajamo opis zgradbe in izdelave zračne katode in cinkove anode.

V poglavju 4.5 pa bomo predstavili vse korake končne sestave baterije s pomočjo fotografij in opisov.

4.1 Zasnova in načrtovanje ohišja

4.1.1 Modeliranje z orodjem TinkerCAD

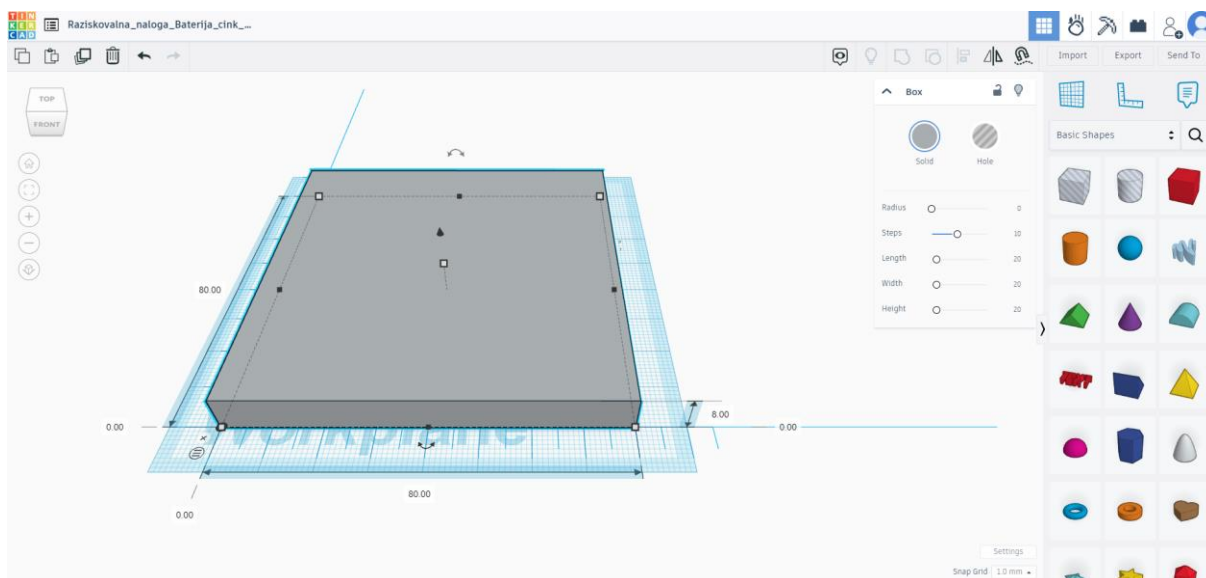
Ohišje našega eksperimentalnega modela baterije cink-zrak smo izdelali v prosto dostopnem spletnem orodju TinkerCAD.

TinkerCAD je spletno orodje za oblikovanje 3D-modelov, ki ga je razvilo podjetje Autodesk. Namenjeno je predvsem začetnikom in izobraževalnim ustanovam, saj omogoča enostavno ustvarjanje 3D-modelov brez potrebe po kompleksnem računalniškem znanju ali naprednih oblikovalskih veščinah. Orodje ponuja preprost, intuitiven vmesnik, ki omogoča hitro oblikovanje 3D-modelov s pomočjo preprostih orodij za vlečenje, spuščanje, poravnavo ter seštevanje in odštevanje osnovnih gradnikov – teles.

V orodju lahko ustvarimo kompleksne modele s pomočjo osnovnih gradnikov, kot so kocke, valji in stožci, ki jih lahko združujemo in spreminjamo po svojih željah.

Končane 3D-modele je mogoče izvoziti v obliki datotek, ki so združljive z 3D-tiskalniki, kar omogoča fizično izdelavo ustvarjenih predmetov.

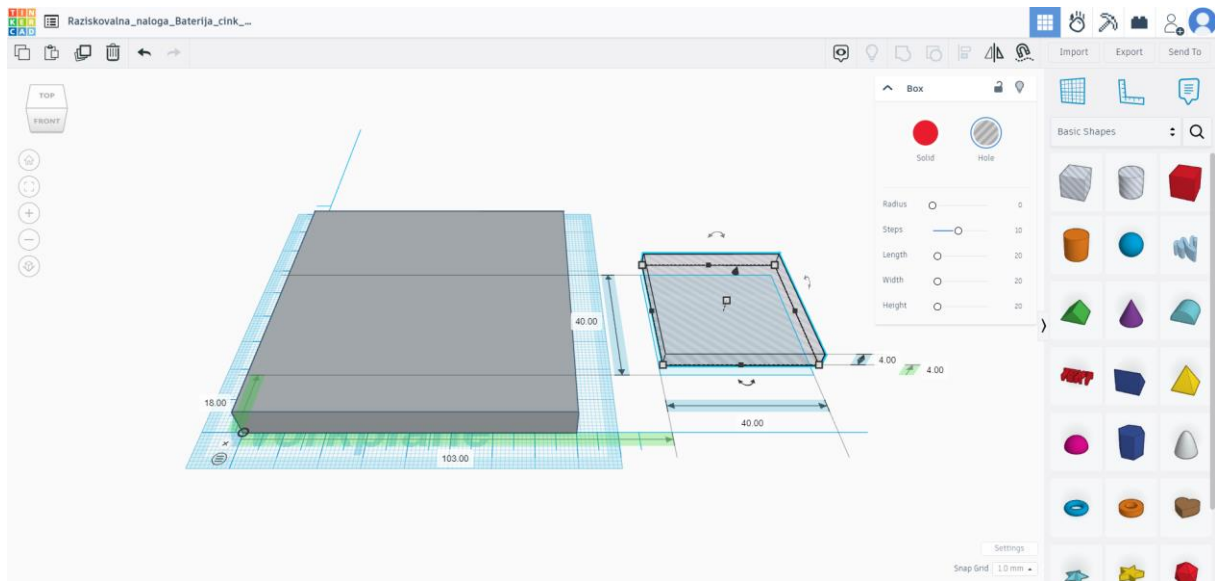
Slika 6 prikazuje osnovno telo baterije cink-zrak, ki ga predstavlja polni (ang. »solid«) kvader dimenzij 80 mm × 80 mm in višine 8 mm.



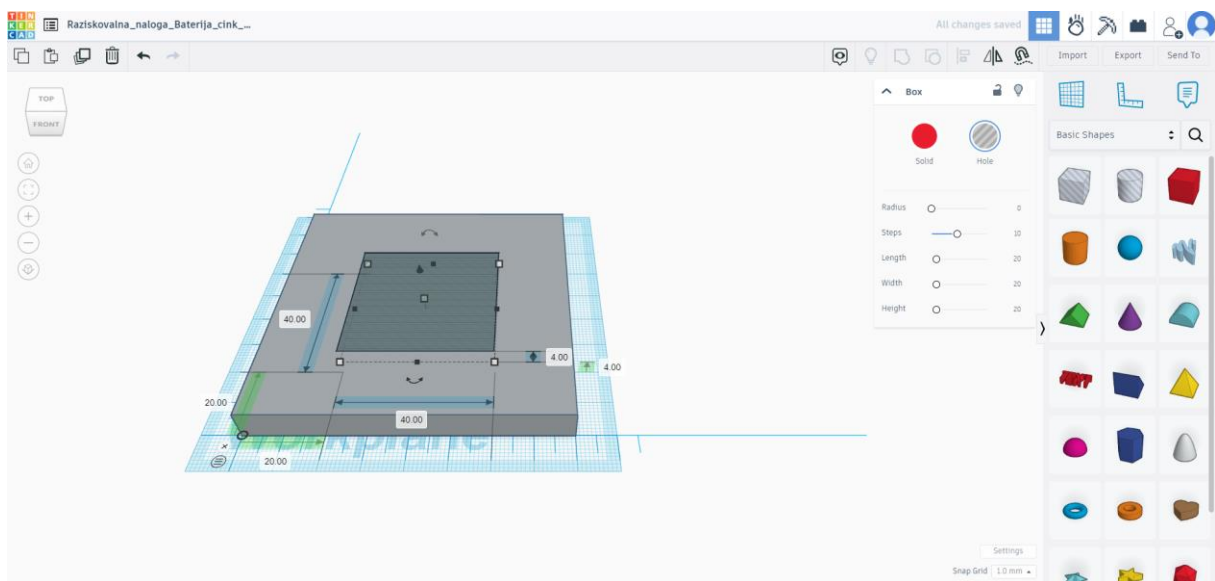
Slika 6: Osnova modela baterije cink-zrak: kvader, dimenzij $80 \times 80 \times 8$ mm, postavljen v izhodišču koordinatnega sistema (lasten vir)

Poglobitev za zračno katodo, dimenzije $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ in globine 4 mm dobimo z naslednjimi koraki:

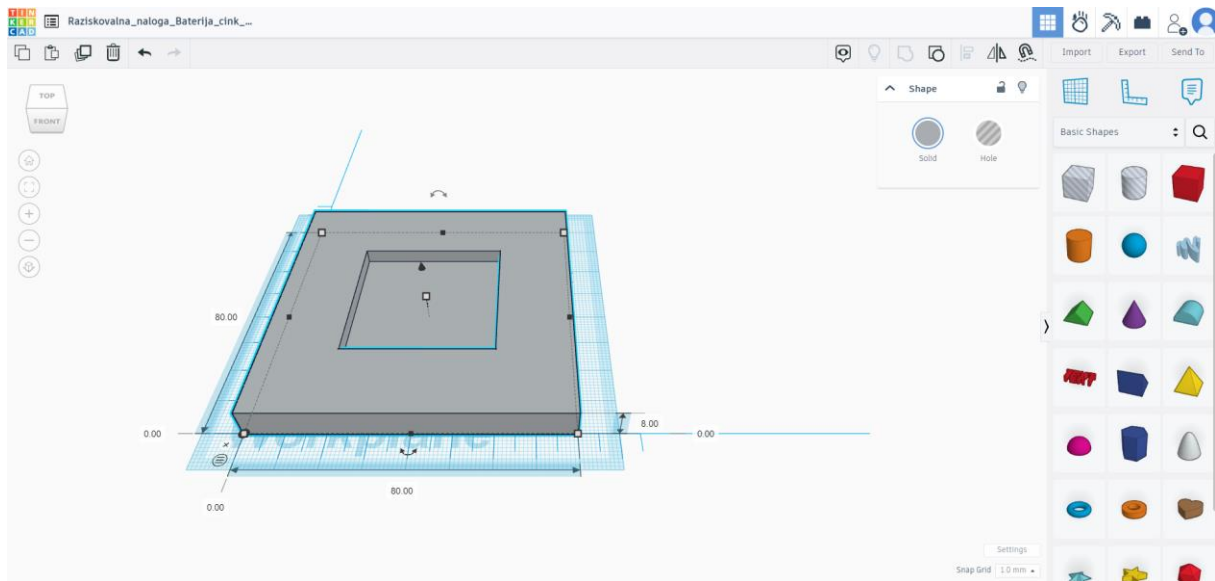
- ustvarimo novo telo, kvader dimenzij $40 \times 40 \times 4 \text{ mm}$,
- telo definiramo kot votlo, oz. luknjo (ang. hole), (slika 7),
- votlo telo prestavimo na pozicijo $x=20\text{mm}$ in $y=20\text{mm}$ in na višino $z=4\text{mm}$ (slika 8). S tem votlo telo poravnamo natančno v sredino osnovnega polnega kvadra. To storimo z uporabo ravnila in vpisom koordinat x , y in z ,
- končno telo (slika 9) s poglobitvijo dobimo tako, da »seštejemo« obe telesi: polni kvader + votli kvader = polni kvader s poglobitvijo. Seštevanje teles v orodju TinkercAD opravimo tako, da najprej označimo dve (ali več) telesi in izberemo funkcijo »združi« (ang. »group«).



Slika 7: Priprava votlega dela (lasten vir)



Slika 8: Premik votlega dela v osnovno telo, višina 4 mm. (lasten vir)



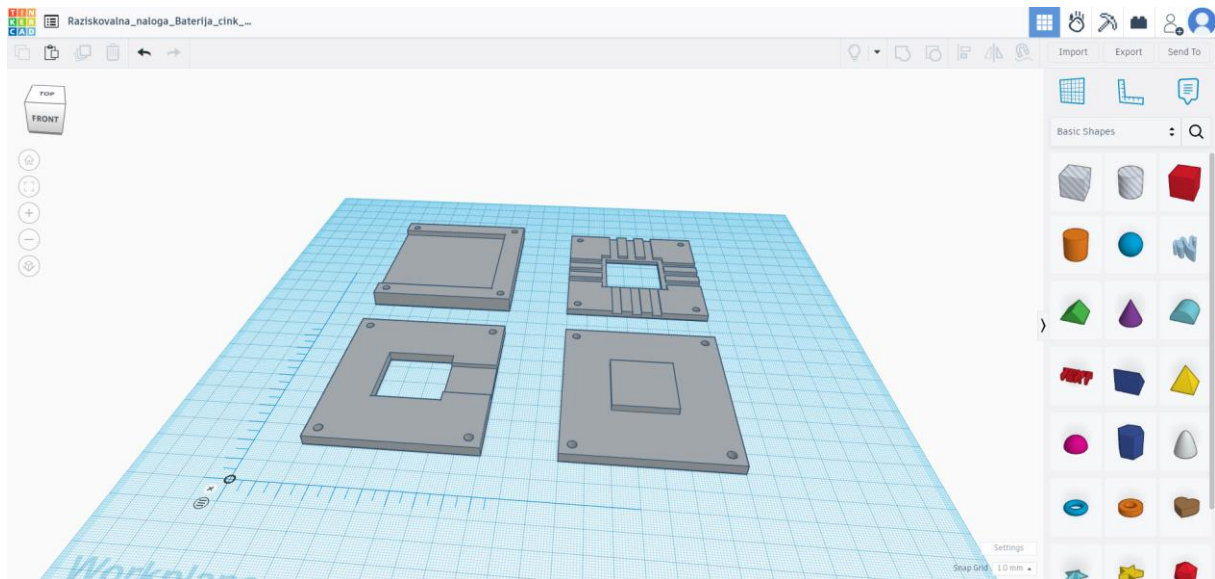
Slika 9: Primer izdelave poglobitve dimenzij 40 mm × 40 mm × 4 mm v osnovni gradnik (lasten vir)

V programu Tinker CAD smo načrtali vse 4 sestavne dele ohišja naše baterije cink-zrak:

- ležišče za zračno katodo (vanj se vstavi filc iz aktivnega oglja in grafitna ploščica za električni priključek katode),
- posodica za cinkovo pasto,
- ležišče za jekleno mrežico (cinkova anoda - priključek),
- pokrovček.

4.1.2 3D-tisk ohišja

S 3D-tiskalnikom smo nato narisani model baterije iz Tinker CAD-a tudi natisnili (slika 10).

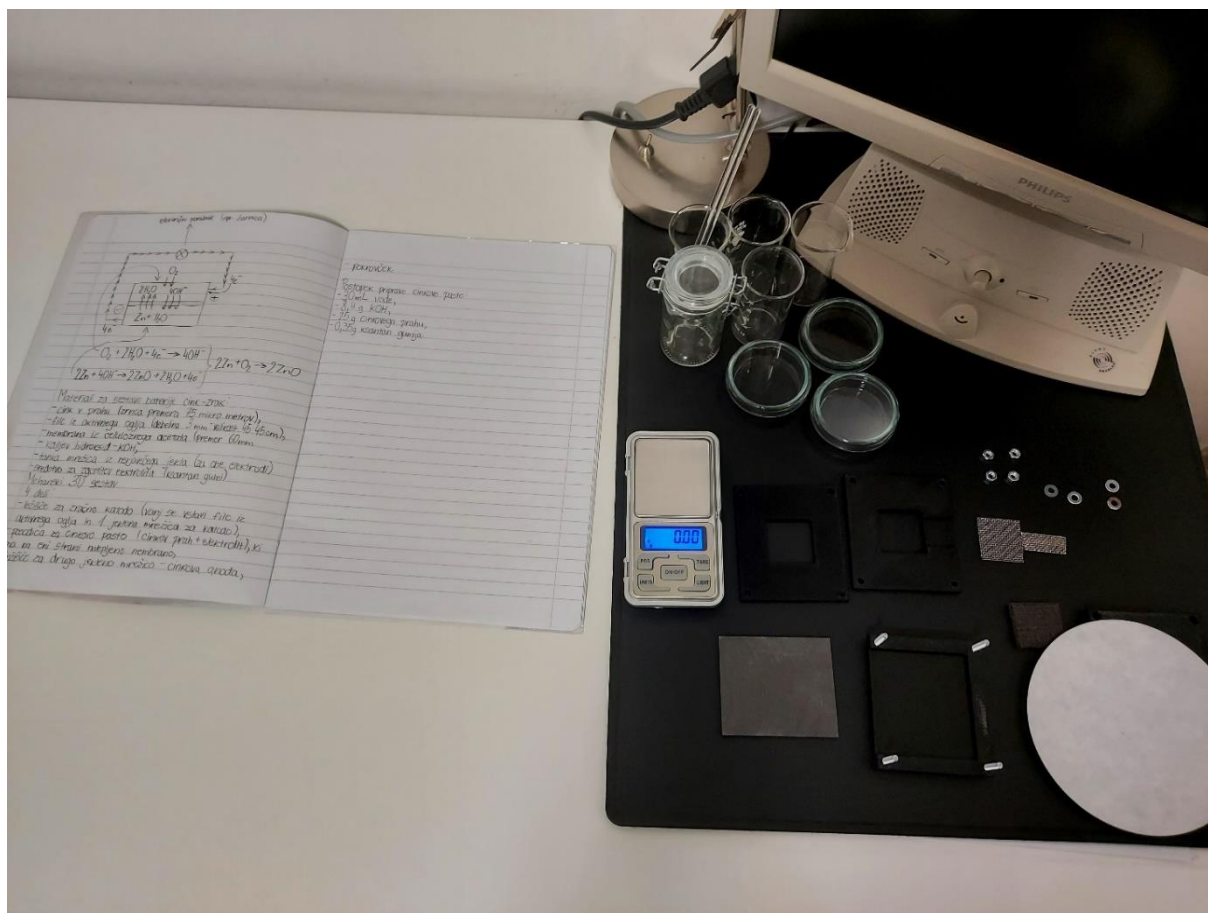


Slika 10: Vsi sestavni deli modela naše baterije cink-zrak, priprava na 3D-tisk (lasten vir)

4.2 Priprava na laboratorijsko delo

Pred pričetkom praktičnega laboratorijskega dela smo se temeljito pripravili. Najprej smo poskrbeli za varno delo (poglavje 3.5). Nato smo zbrali ves potreben laboratorijski material: merilne čaše, paličice za mešanje, elektronsko tehniko, kemikalije, urna stekla in sestavne dele baterije (slika 11).

Zelo pomemben del priprav je tudi analitični del, v katerem celoten postopek in natančne količine kemikalij predhodno določimo. Postopek je opisan v zvezku, ki ga imamo ves čas na delovnem mestu (slika 11, levo).



Slika 11: Priprava na praktično delo v laboratoriju (lasten vir)

4.3 Zgradba zračne (kisikove) katode

Kisikova katoda je ključna komponenta naše baterije cink-zrak. Omogočati mora učinkovito redukcijo kisika iz zraka, zato je učinkovitost in zmogljivost baterije zelo odvisna od zgradbe te elektrode. Osnovna komponenta te elektrode je filc iz aktivnega oglja. Filc je lahka, penasta struktura, zgrajena iz umetne mase poliakrilonitril (PAN), ki je impregnirana z mikroskopsko majhnimi delci aktivnega oglja. Penasta zračna struktura, pomešana z aktivnim ogljem, tako predstavlja izredno veliko aktivno površino, na kateri se izvaja redukcija kisika iz zraka. Po drugi strani je aktivno oglje tudi električno prevodno, zato lahko električni priključek izvedemo s pomočjo grafitne ploščice, na katero položimo ali pritisnemo filc iz aktivnega oglja. Tabela 3 navaja uporabljene sestavine za sestavo zračne katode.

Tabela 3: Uporabljene sestavine za zračno katodo

Sestavina	Količina
Filc iz aktivnega oglja	3 × 3 cm, debelina 3 mm
Grafitna ploščica	7 × 6 cm, debelina 3 mm

4.4 Zgradba cinkove anode

Cinkova anoda je druga ključna in aktivna komponenta naše baterije cink-zrak. Posebnost te elektrode je, da združuje elektrolit in anodo v obliki tako imenovane cinkove paste (Dilshad, 2023). V tej elektrodi se izvaja proces oksidacije cinka. Tabela 4 prikazuje uporabljene komponente ter njihove količine za izdelavo cinkove anode. Sam postopek izdelave cinkove anode je opisan v naslednjih podpoglavjih (Dilshad, 2023).

Tabela 4: Uporabljene sestavine za cinkovo anodo

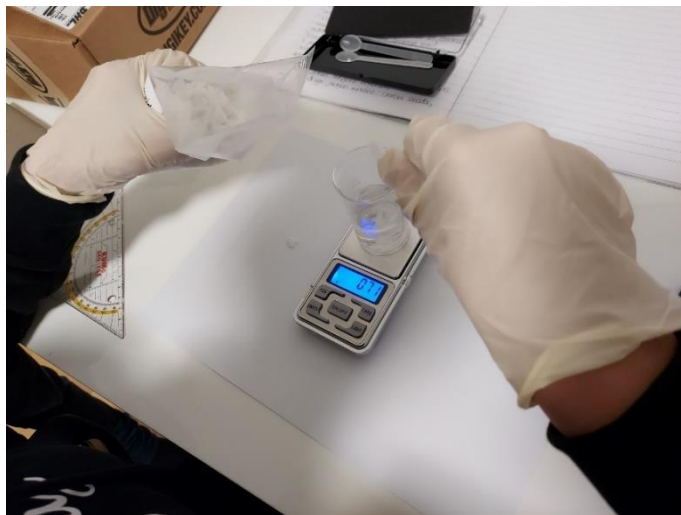
Sestavina	Količina
Cink v prahu	25 g
Destilirana voda	30 mL
Kalijev hidroksid (KOH)	8,4 g
Ksantan gumi	0,35 g
Etanol (80 %)	5 mL

4.4.1 Postopek priprave elektrolita

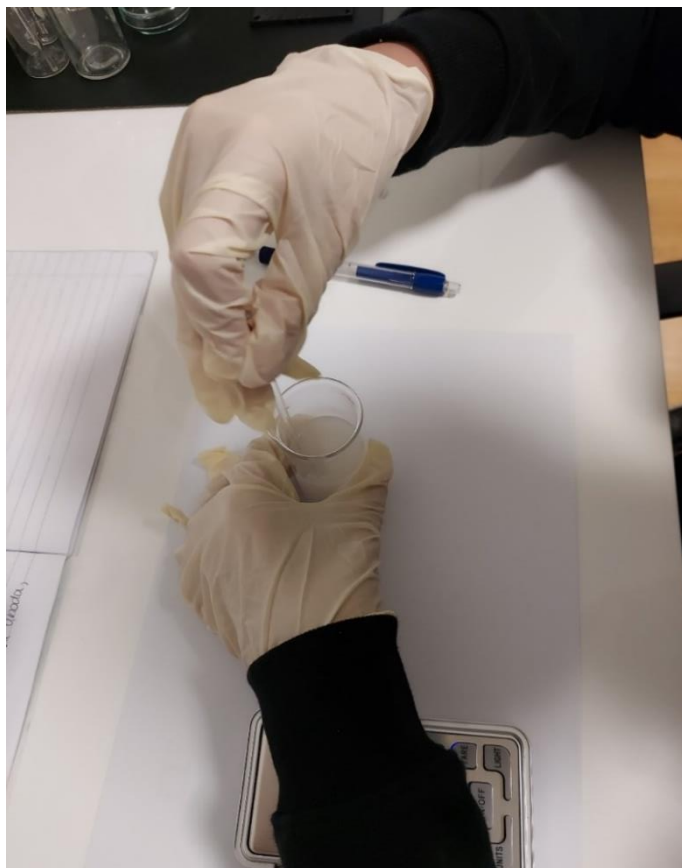
Za pripravo elektrolita potrebujemo destilirano vodo in kalijev hidroksid (KOH). Najprej v merilno čašo nalijemo 30 mL destilirane vode. Čašo z vodo postavimo na elektronsko tehtnico in nastavimo ničelno težo – tara (slika 12). V čašo na tehtnici počasi odmerjamo kalijev hidroksid (slika 13) in raztopino sproti mešamo (slika 14). Opazili smo, da je ta reakcija močno eksotermna: čaša, v kateri smo raztopili kalijev hidroksid v vodi, se je močno segrela in dosegla skoraj 46 °C (slika 15). V destilirani vodi raztopimo 8,4 g KOH.



Slika 12: Čaša z destilirano vodo, nastavitev ničelne teže (tara) na tehtnici (lasten vir)



Slika 13: Odmerjanje KOH (lasten vir)



Slika 14: Priprava elektrolita: raztapljanje KOH v destilirani vodi (lasten vir)



Slika 15: Eksotermna reakcija pri raztapljanju KOH v destilirani vodi (lasten vir)

4.4.2 Postopek priprave zgoščevalnega sredstva

Cinkov prah se v elektrolitu ne more raztopiti. Takoj po koncu mešanja se cink zaradi večje gostote posede na dno elektrolita. Takšne zmesi ne moremo uporabiti v prenosni bateriji cink-zrak. Rešitev je v izdelavi paste, v kateri bi bil cink enakomerno porazdeljen v celotnem volumnu elektrolita. Za izdelavo takšne paste moramo uporabiti želirno oz. zgoščevalno sredstvo. Za ta namen smo uporabili ksantan gumi. Ugotovili smo, da ga je dovolj le 0,35 g, zato da raztopina ni pregosta. Pred uporabo smo ga raztopili v 5 mL etanola, da smo preprečili nastanek grudic in povečali topnost.

4.4.3 Priprava cinkove paste

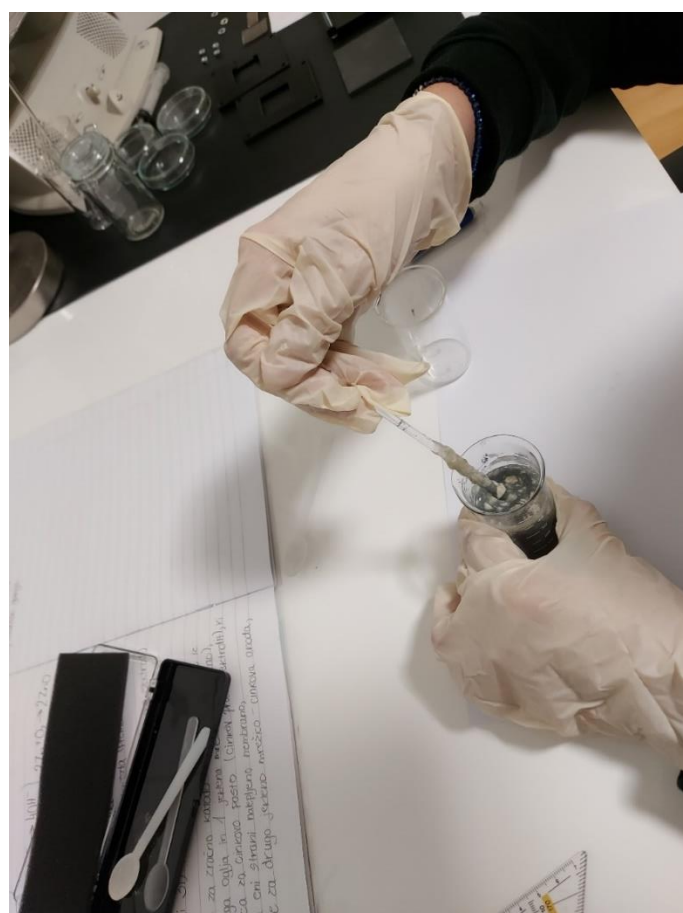
Cinkovo pasto smo pripravili iz cinkovega prahu (slika 16), elektrolita in vnaprej pripravljenega želirnega sredstva. V prvem koraku elektrolitu primešamo 25 g cinkovega prahu (slika 17). Zmesi nato prilijemo še ksantan gumi, pomešan v etanolu. Dokončno zmes mešamo tako dolgo, da dobimo gladko, poltekočo pasto sive barve (slika 18). Pripravljena pasta je primerna za uporabo v naši bateriji cink-zrak.



Slika 16: Priprava na tehtanje cinkovega prahu (lasten vir)



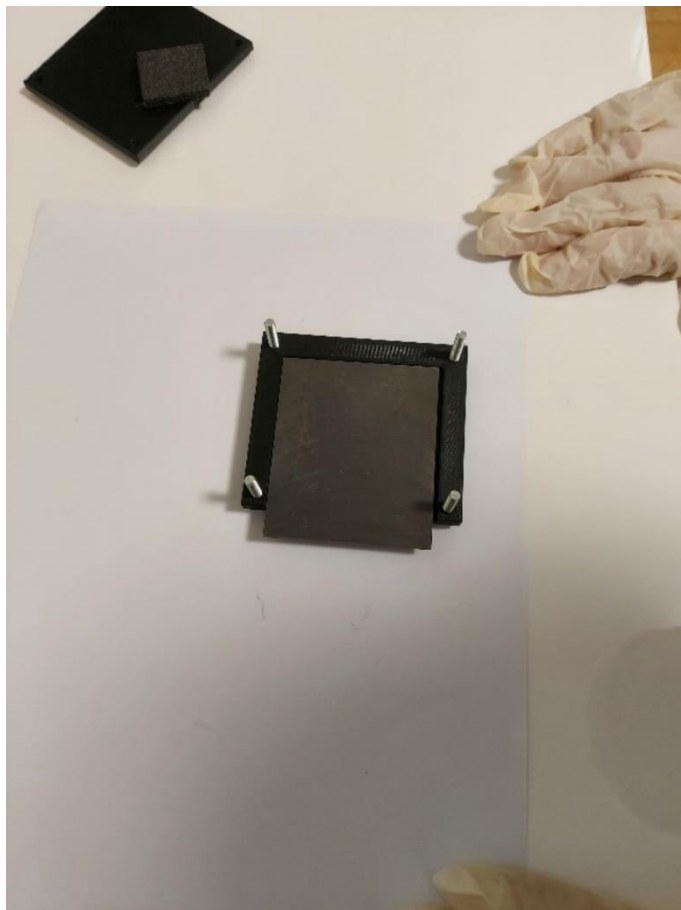
Slika 17: Tehtanje cinkovega prahu (lasten vir)



Slika 18: Priprava cinkove paste (lasten vir)

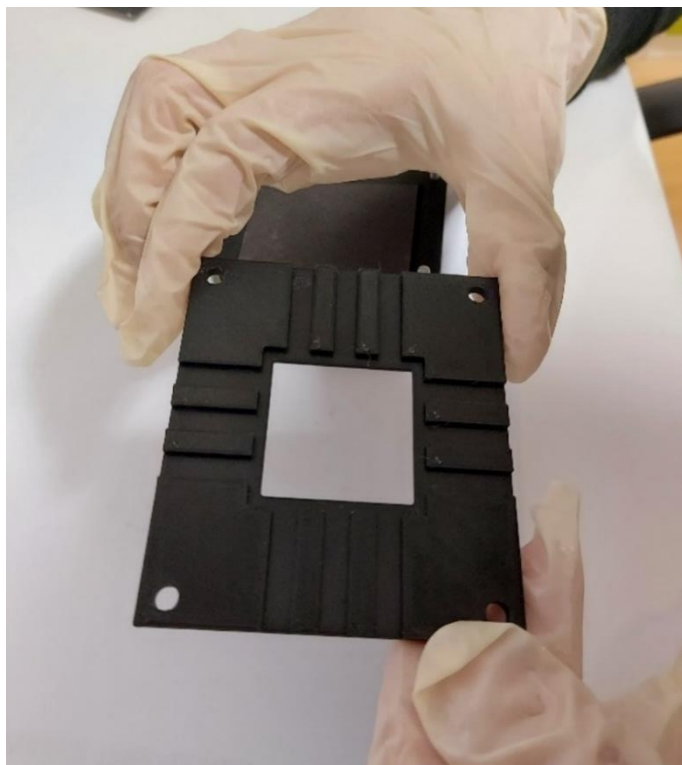
4.5 Končna sestava baterije

V spodnji nosilni okvir vstavimo štiri vijake in v poglobljeni del položimo električno prevodno grafitno ploščico (slika 19), ki nam služi kot zbiralnik električnega toka zračne katode. Del grafitne ploščice štrli iz ohišja baterije. Na ta del bomo kasneje priključili električni vodnik.

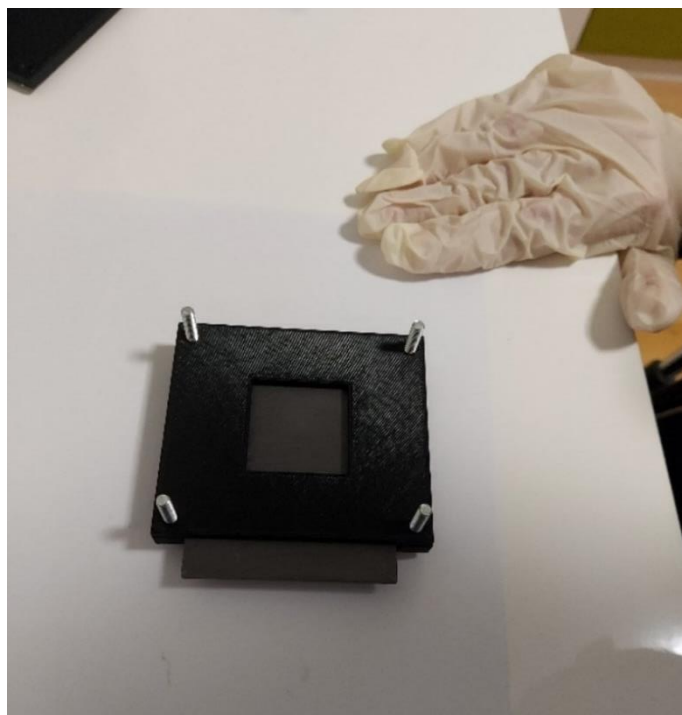


Slika 19: Osnovni okvir ohišja z vstavljenjo električno prevodno grafitno ploščico (lasten vir)

Slika 20 prikazuje okvir zračne katode, na katerem so vidni zračni kanali, ki omogočajo dostop kisika do filca iz aktivnega oglja. Okvir nato obrnemo, tako da se zračni kanali nahajajo na spodnji strani, in ga položimo na nameščeno grafitno ploščico. Štirje vijaki na vogalih poskrbijo, da so vse komponente ohišja baterije lepo poravnane (slika 21).

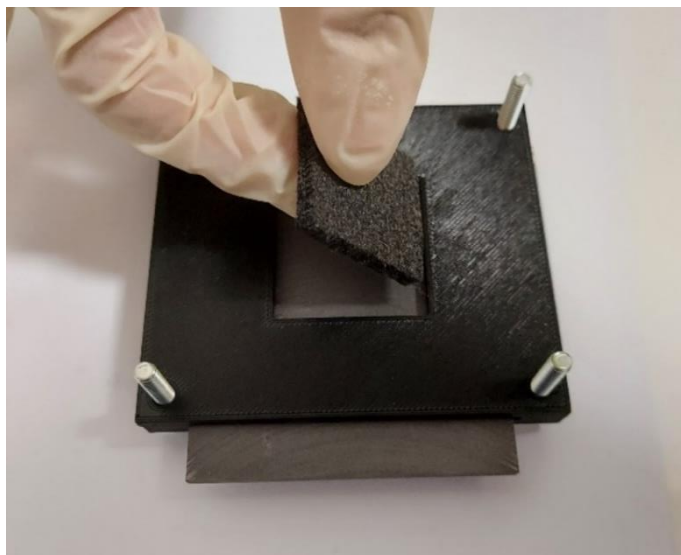


Slika 20: Okvir zračne katode z vidnimi zračnimi kanali za dovod kisika (lasten vir)



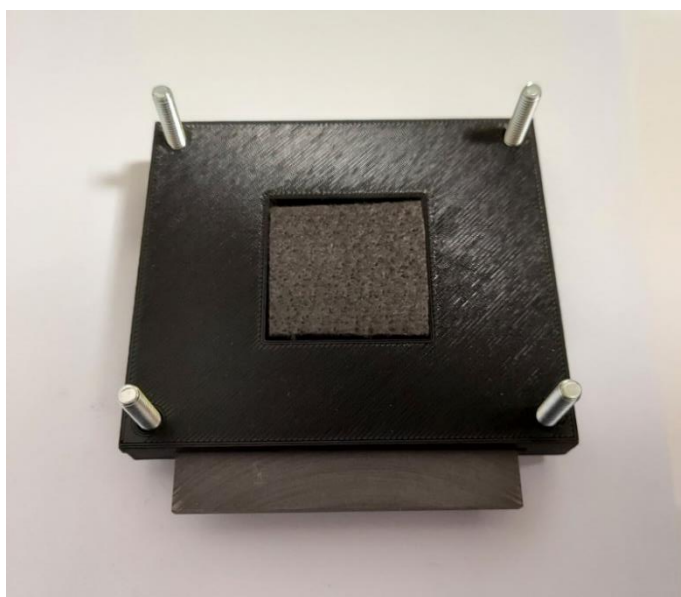
Slika 21: Okvir zračne katode obrnemo in položimo skozi nosilne vijake na grafitno ploščico (lasten vir)

S škarjami izrežemo košček filca iz aktivnega oglja kvadratne oblike dimenzij 3×3 cm, debeline 3 mm in ga položimo v nosilec zračne katode (slika 22). Filc iz aktivnega oglja se na spodnji strani dotika grafitne ploščice, zato je med njima vzpostavljen električni stik. Zračni kanali za dovod kisika se nahajajo na vseh štirih stranicah baterije.

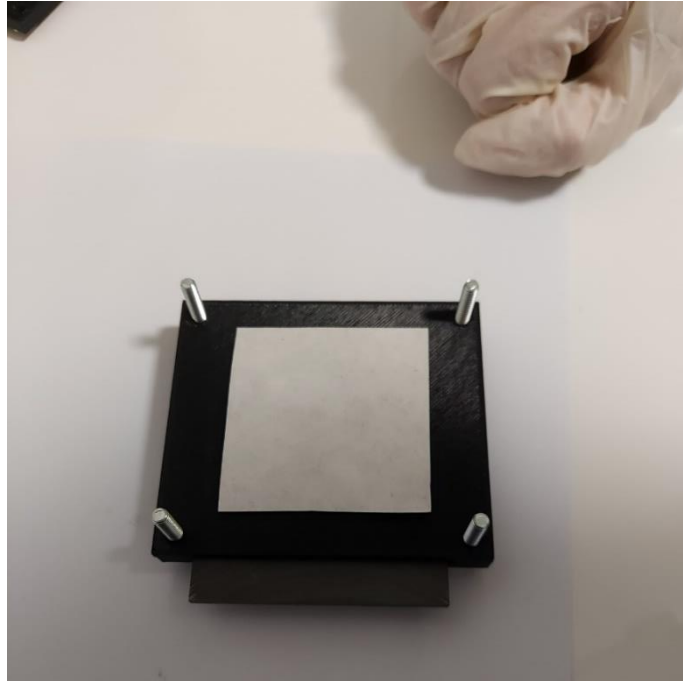


Slika 22: Filc iz aktivnega oglja položimo skozi okvir na grafitno ploščico (lasten vir)

Slika 23 prikazuje končno sestavljeno zračno katodo. Sledi namestitev membrane oz. separatorja med katodo in anodo. Membrano iz filtrirnega papirja namestimo na zračno katodo, kot prikazuje slika 24.

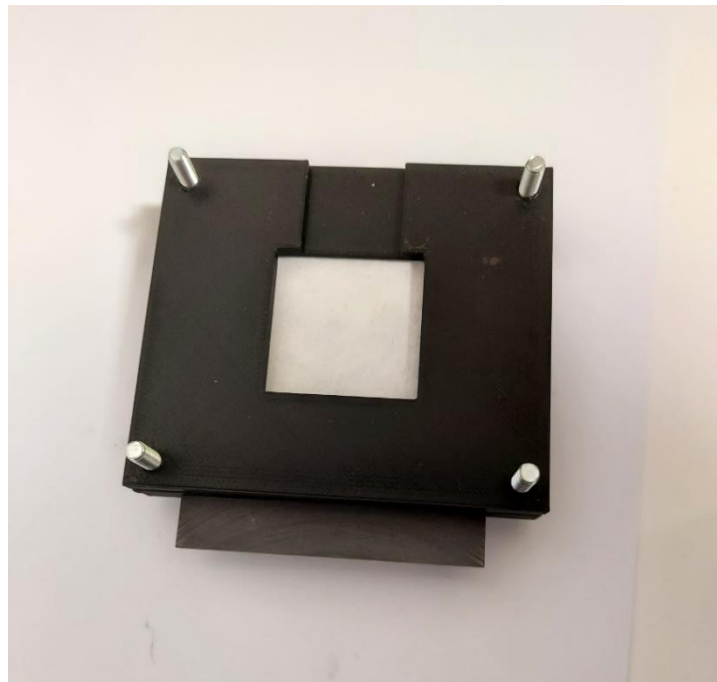


Slika 23: Izdelana zračna katoda: filc iz aktivnega oglja leži v okvirju zračne katode



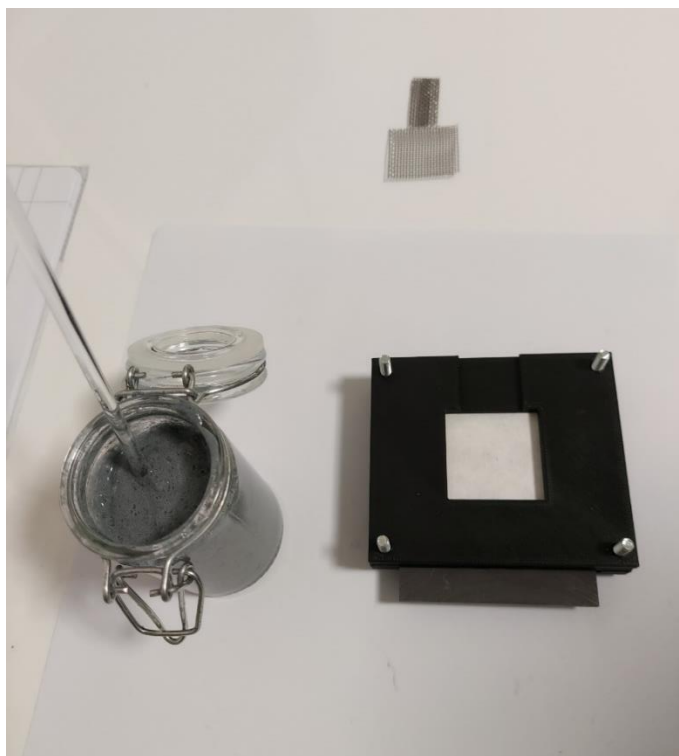
Slika 24: Bel filtrirni papir (membrana), nameščen nad zračno katodo (lasten vir)

Čez membrano položimo okvirček, ki služi za zadrževanje cinkove paste (slika 25). Na zgornji strani okvirja je poglobljeni del, kamor pride izhod jeklene mrežice, ki bo služila kot zbiralnik električnega toka na strani anode.



Slika 25: Okvir za cinkovo anodo (cinkova pasta), položen preko membrane (lasten vir)

Pripravimo vse sestavne dele za dokončanje cinkove anode: cinkovo pasto, izdelano v poglavju 4.4.3, imamo shranjeno v stekleni čaši s pokrovom (slika 26 - levo spodaj). Do sedaj sestavljena baterija je prikazana desno spodaj na sliki 26. Zbiralnik električnega toka z zunanjim električnim priključkom je prikazan na zgornjem delu slike 26.

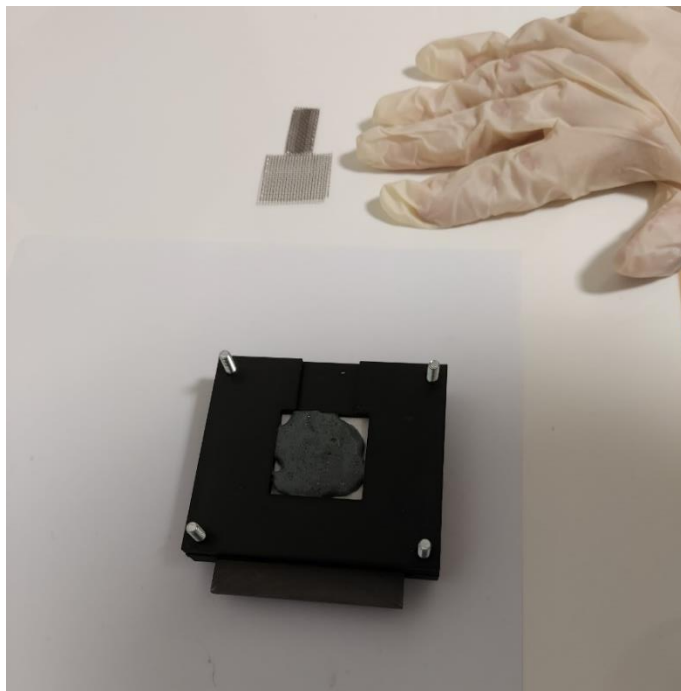


Slika 26: Priprava cinkove anode: cinkova pasta (spodaj levo), baterija (spodaj desno) in jeklena mrežica (zgoraj). (lasten vir)

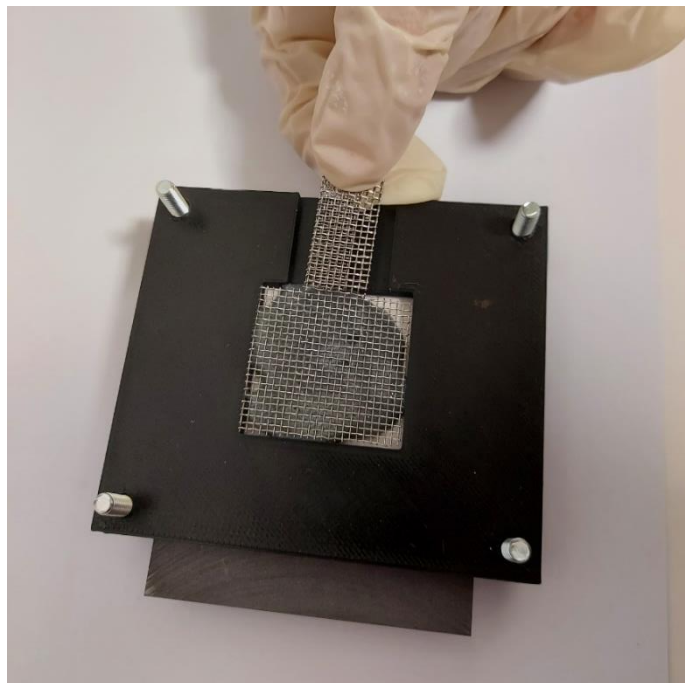
Cinkovo pasto previdno nanesemo v naprej pripravljeno odprtino v nosilcu cinkove anode (slika 27). Za sestavo ene baterije potrebujemo 2 grama cinkove paste. Pomembno je, da pri vsakokratni ponovni sestavi baterije uporabimo enako količino cinkove paste, saj le-tako lahko primerjamo posamezne meritve lastnosti baterije med seboj.

Mrežico iz nerjavečega jekla vtisnemo v cinkovo pasto (slika 28). Cinkova anoda je tako dokončno sestavljena (slika 29).

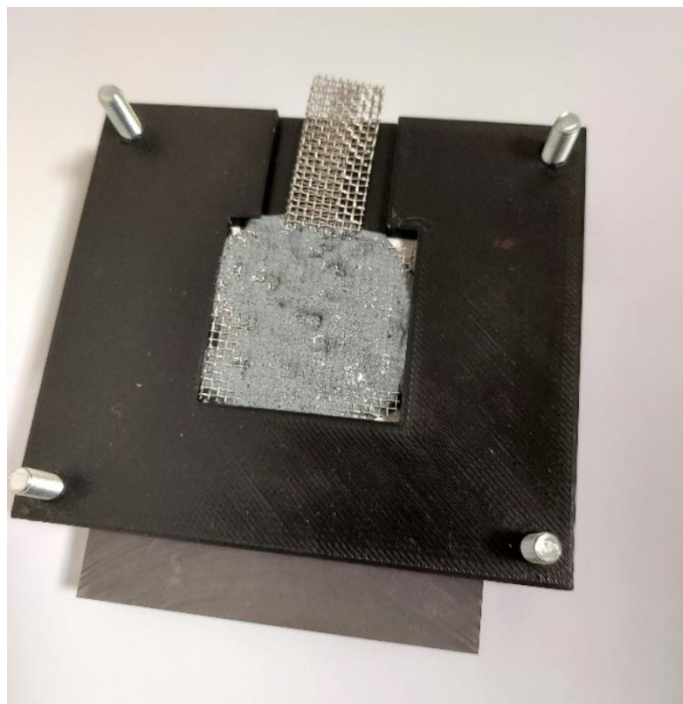
Na koncu postopka baterijo še zapremo z izdelanim pokrovčkom, ki ga pritrdimo s podložkami in maticami M4 (slika 30).



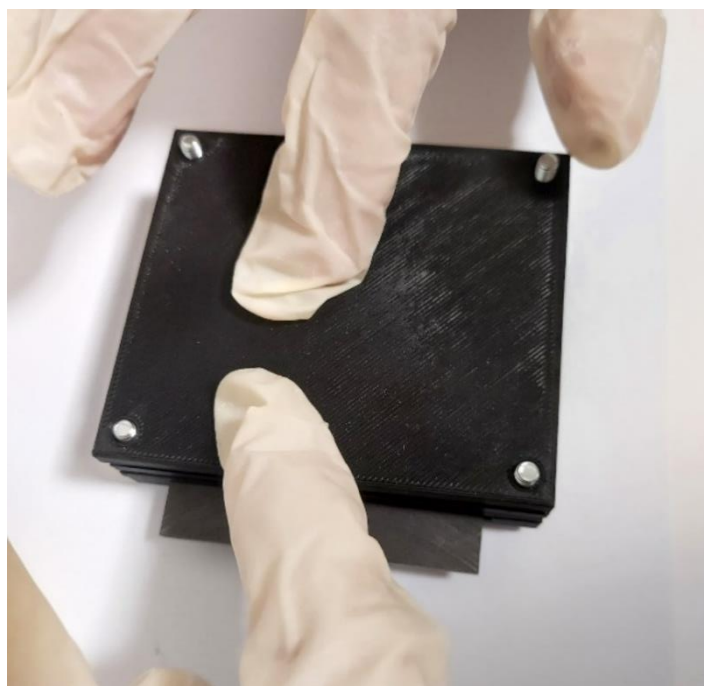
Slika 27: S cinkovo pasto zapolnimo pripravljeno odprtino v nosilcu cinkove anode (lasten vir)



Slika 28: Mrežico iz nerjavečega jekla vtisnemo v cinkovo pasto (lasten vir)



Slika 29: Dokončana cinkova anoda (lasten vir)



Slika 30: Baterijo zapremo s pokrovčkom še na zgornji strani in namestimo matice (lasten vir)

5 Metodologija dela

5.1 Merilne metode

Izdelano baterijo cink-zrak je potrebno ustrezno ovrednotiti. Zanima nas električna napetost, ki jo je neobremenjena baterija sposobna generirati. Drugi pomembni podatek pa je kapaciteta baterije. Pri tem nas zanima, koliko časa je baterija sposobna priključenemu električnemu bremenu zagotavljati določeno jakost električnega toka, preden se njena izhodna napetost spusti pod uporabno raven.

Za določanje kapacitete baterij proizvajalci najpogosteje uporabljajo metodo praznjenja s konstantnim tokom, zato smo po tej metodi merjenje karakteristike naše baterije cink-zrak izvajali tudi mi. Vrednost konstantnega toka praznjenja navadno izberemo glede na pričakovano kapaciteto baterije. Proizvajalci navajajo podatek z oznako 0,1 C oz. 0,2 C. To pomeni, da tok znaša eno desetino oz. eno petino pričakovane kapacitete baterije. Primer: če znaša kapaciteta baterije $C=2000$ mAh, potem znaša vrednost konstantnega toka praznjenja 200 mA (0,1 C) oz. 400 mA (0,2 C). Ta princip smo uporabili tudi mi (Rekoser, 2023), (PVEducation, 2024), (CellSaviors, 2024), (REUK.co.uk, 2023).

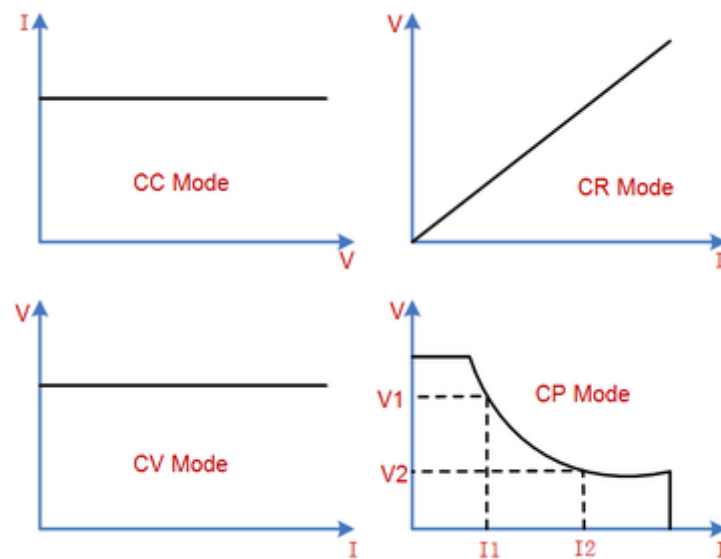
Ko določimo kapaciteto baterije, lahko izračunamo tudi njeno energijsko gostoto. To je količina energije na 1 kg aktivne snovi v bateriji (skupna masa zračne katode in cinkove paste).

5.2 Merilna oprema

Električne karakteristike izdelane baterije cink-zrak smo merili s pomočjo posebne naprave, ki jo imenujemo elektronsko breme (slika 32). Uporabljena naprava SIGLENT SDL1020X-E ima na sprednji strani priključka, na katera priklopimo baterijo. Napravo lahko s pomočjo osvetljenih gumbov na sprednji strani nastavimo v različne načine delovanja:

- praznjenje s konstantnim tokom (CC),
- praznjenje s konstantno napetostjo (CV),
- praznjenje s konstantno upornostjo (CR) in
- praznjenje s konstantno močjo (CP).

Slika 31 prikazuje tipične karakteristike naštetih režimov delovanja elektronskega bremena (SIGLENT, 2023).



Slika 31: Možni načini delovanja elektronskega bremena SIGLENT



Slika 32: Elektronsko breme SIGLENT SDL1020X-E (lasten vir)

Naprava omogoča sočasno merjenje naslednjih električnih veličin: električne napetosti, toka, upornosti, moči in kapacitete. Prav tako je možno nastaviti kriterij, ki določa, kdaj se naj merjenje karakteristike konča.

Ko na merilni napravi nastavimo želeni način delovanja in parametre, kot sta vrednost konstantnega toka praznjenja, in vrednost električne napetosti, pri kateri naj se merjenje karakteristike konča, lahko s pomočjo tipke ON/OFF vklopimo začetek merjenja.

5.3 Pisanje programske kode za zajem meritev v programskem jeziku Python

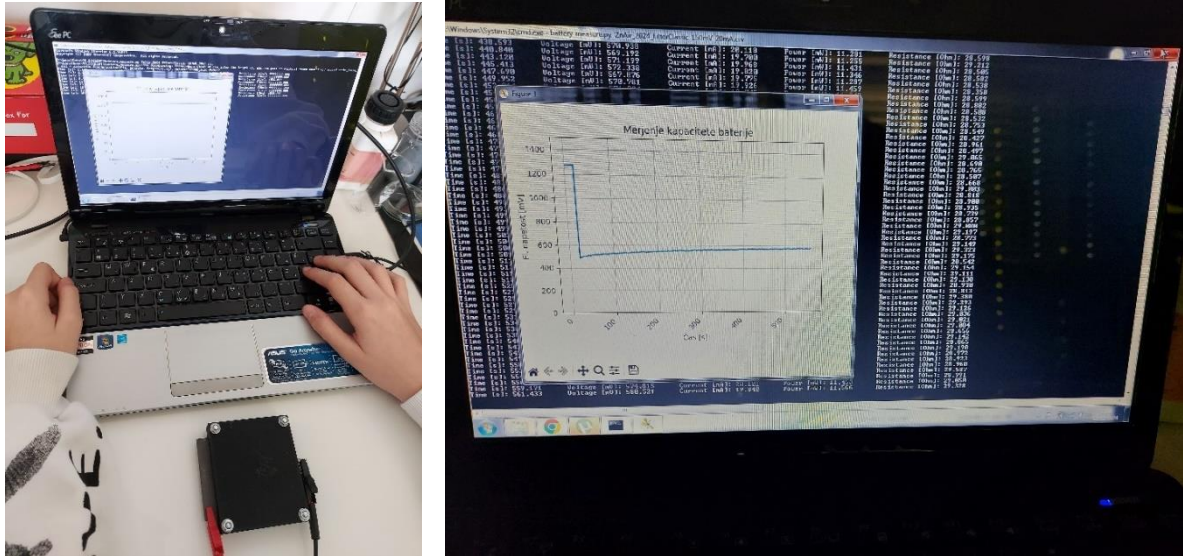
Naprava SIGLENT SDL1020X-E ima na zadnji strani priključek USB, s katerim jo lahko povežemo na osebni računalnik (PC). Gonilnik, napisan v programskem jeziku, Python smo prenesli s spletne strani proizvajalca SIGLENT (SIGLENT, 2023). Celotna programska koda za merjenje karakteristike baterije z uporabo gonilnika proizvajalca je navedena v tabeli 7 (glej poglavje 10.1).

5.4 Izvedba meritev

Slika 33 prikazuje priključitev naše izdelane baterije cink-zrak na merilno napravo SIGLENT. Slika 34 prikazuje zajem meritev na osebnem računalniku s pomočjo naše programske kode za zajem meritev.



Slika 33: Priključitev naše baterije na merilno napravo SIGLENT (lasten vir)



Slika 34: Primer zajema meritev na osebni računalniku (lasten vir)

6 Rezultati meritev

V tem poglavju podajamo rezultate meritev karakteristike naše izdelane baterije v primerjavi s komercialno baterijo cink-zrak DURACELL TIP 13 (slika 35). Obe bateriji sta bili izmerjeni na enak način po metodi konstantnega toka jakosti 10 mA. Meritev kapacitete baterije smo zaključili, ko je napetost posamezne baterije padla na 150 mV.



Slika 35: Komercialna baterija DURACELL TIP 13: levo. Priklop baterije na merilno napravo SIGLENT: desno (lasten vir)

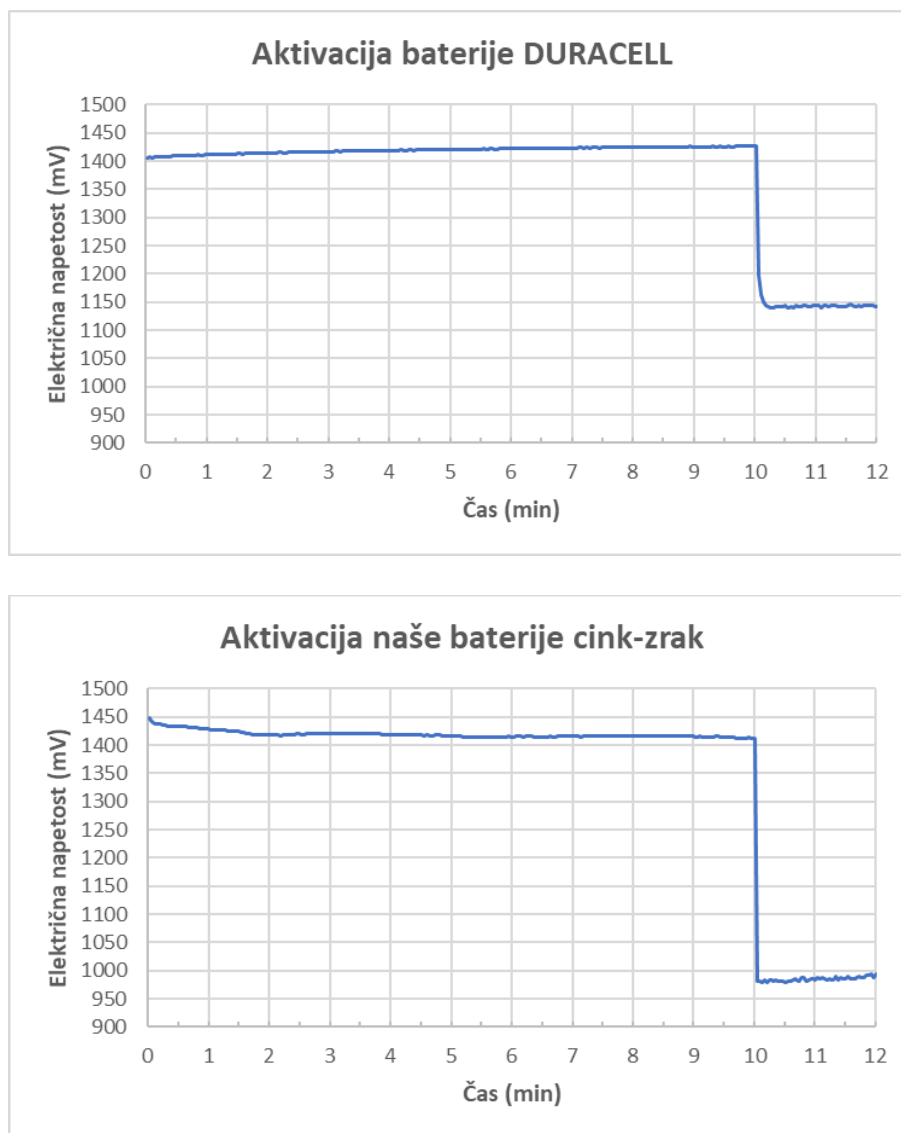
6.1 Napetost neobremenjene baterije (aktivacija)

V prvem delu nas zanima, kakšna je električna napetost neobremenjene baterije takoj po njeni aktivaciji. Aktivacijo komercialne baterije izvedemo tako, da odlepimo varovalno nalepko, ki preprečuje dostop kisika skozi luknjice (kupljeno baterijo lahko skladiščimo skoraj poljubno dolgo, če je onemogočen dostop kisika, saj redoks kemijska reakcija v bateriji ne more potekati). Naša baterija pa je aktivirana takoj, ko jo v celoti sestavimo (glej poglavje 4.5).

Slika 36 prikazuje primerjavo električne napetosti neobremenjenih baterij. Obe bateriji sta bili prvih 10 minut merjenja karakteristike neobremenjeni. Po 10 minutah pa smo obe bateriji obremenili s konstantnim tokom 10 mA. Obremenitev baterij je povzročila nenaden padec električne napetosti, kar se jasno vidi iz obeh prikazanih grafov.

Najvišja električna napetost komercialne baterije je znašala 1,425 V. Iz zgornjega grafa (slika 36) vidimo, da se je električna napetost baterije po njeni aktivaciji počasi dvigala zaradi pričetka kemijske reakcije znotraj baterije, ko je vanjo vstopil kisik.

Električna napetost naše neobremenjene baterije je bila najvišja takoj po njeni sestavi in je znašala 1,447 V. V prvih 10 minutah je napetost rahlo upadla in se stabilizirala pri 1,411 V (slika 36, spodnji graf).



Slika 36: Električna napetost neobremenjene baterije (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)

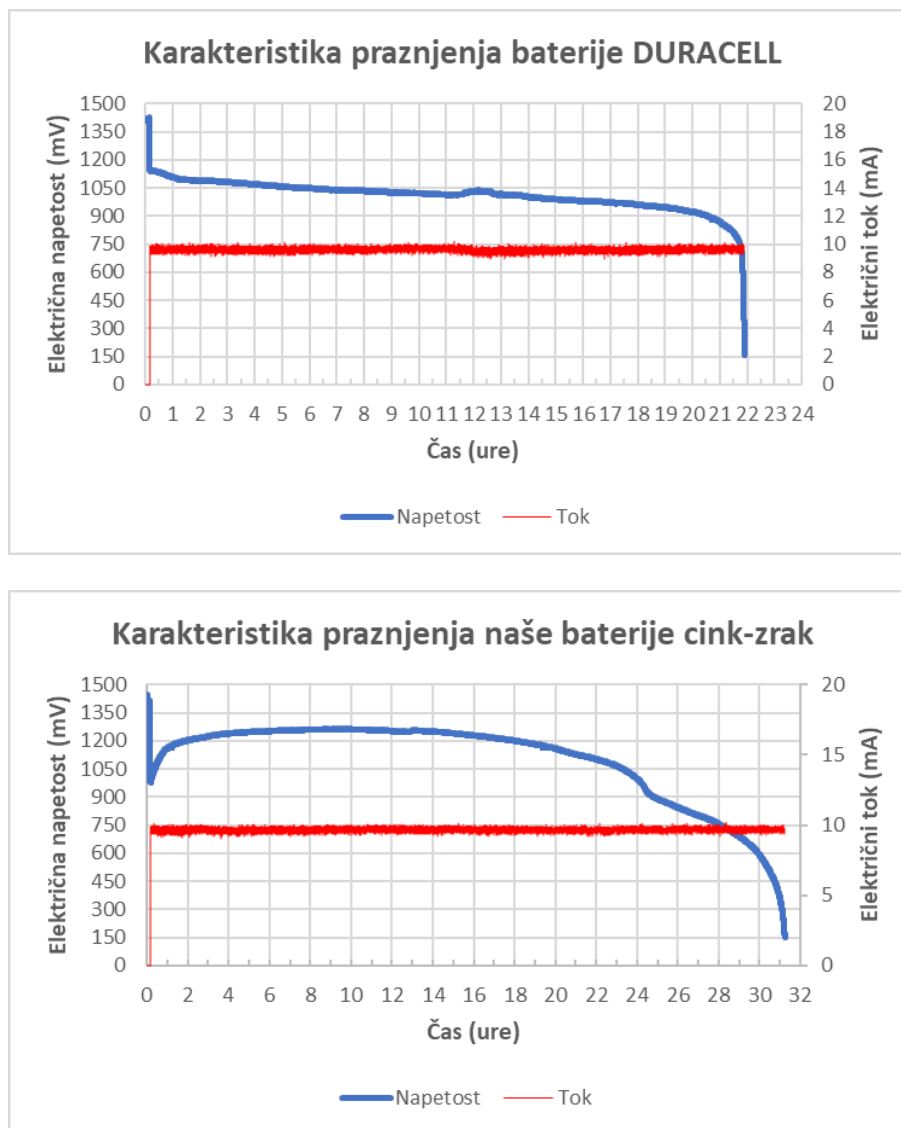
Po 10 minutah smo vklopili aktivno breme. Napetost komercialne baterije je padla na 1,15 V, medtem ko je napetost naše baterije padla nekoliko nižje, in sicer na 0,982 V. Iz spodnjega

grafa na sliki 36 pa vidimo, da je napetost naše baterije kljub obremenitvi pričela rasti. Sklepamo, da popolna aktivacija kemijske reakcije znotraj naše baterije v prvih 10 minutah še ni bila dokončana. Prepustnost membrane (filtrirni papir) se je postopoma izboljševala, hkrati se je izboljševala tudi redukcija kisika v zračni katodi. Zato se je učinkovitost baterije kljub konstantni obremenitvi postopoma zviševala.

6.2 Praznilna karakteristika baterije

Slika 37 prikazuje primerjavo karakteristik praznjenja obeh baterij. V vsakem grafu sta prikazani dve krivulji. Modra krivulja ponazarja izmerjeno električno napetost. Merilna skala za električno napetost je na levi strani grafa. Rdeča krivulja predstavlja električni tok. Ker je tok konstanten, je ta krivulja dejansko ravna črta vse od začetka vklopa aktivnega bremena. Merilna skala za električni tok je prikazana na desni strani obeh grafov. Opazimo še eno značilnost: električni tok je rahlo nihal okrog vrednosti 10 mA. Ta »šum« je posledica lastnosti naprave SIGLENT, ki je prvenstveno namenjena za merjenje in obremenitev veliko večjih baterij.

Električna napetost komercialne baterije se je zelo polagoma in enakomerno zniževala od vklopa bremena pa do časa 20 ur, ko je dosegla električno napetost 0,922 V (slika 37, zgornji graf). Po 20 urah pa se je baterija pospešeno praznila, zato je njena napetost strmo padla. Po 21,9 urah je dosegla nastavljeno minimalno napetost 150 mV, pri kateri smo test samodejno ustavili. V času 12 ur smo opazili manjše odstopanje v grafu. Električna napetost baterije DURACELL je za kratek čas narahlo narasla. Domnevamo, da je to bila posledica vklopa ogrevanja v prostoru, kjer je potekalo delo.



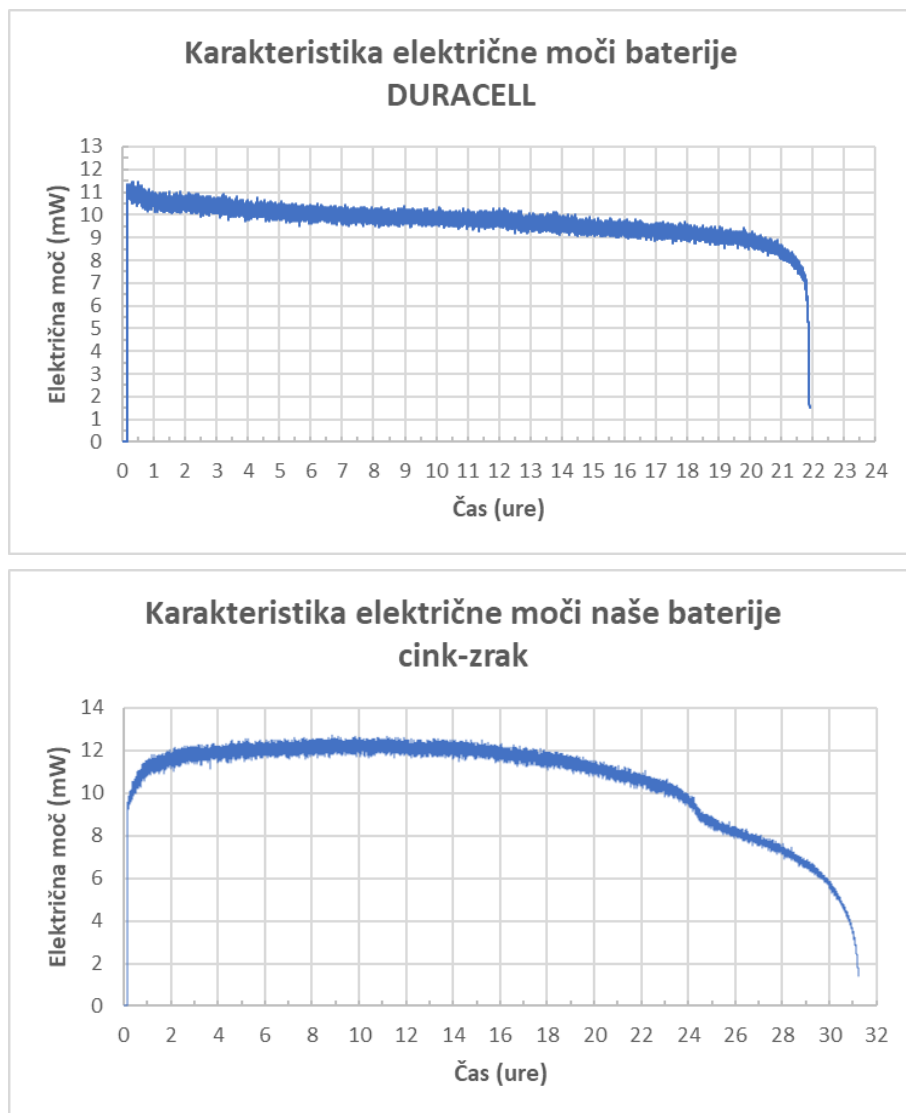
Slika 37: Potek električne napetosti ob konstantni obremenitvi (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)

Praznilna karakteristika naše baterije je nekoliko drugačna (slika 37, spodnji graf). Omenili smo že, da se je kmalu po vklopu obremenitve električna napetost pričela dvigati. Dvigala se je 9,4 ure in dosegla svojo najvišjo vrednost 1,264 V. Ta napetost obremenjene baterije je višja kot napetost obremenjene baterije DURACELL. Naša baterija je sposobna proizvajati višjo trenutno električno moč od komercialne baterije. Po 10 urah sledi postopen padec električne napetosti naše baterije. Po 24 urah se je hitrost upadanja napetosti povečala. Naša baterija je dosegla minimalno napetost 150 mV v času malo več kot 31,2 ure. Iz tega lahko sklepamo, da smo z našo baterijo dosegli višjo kapaciteto od komercialne baterije, kar bo razloženo v nadaljevanju.

6.3 Karakteristika električne moči baterije

Sočasno z merjenjem praznilne karakteristike baterije lahko spremljamo tudi potek električne moči, ki jo generira merjena baterija. Kot smo spoznali v teoretičnem poglavju 2.5.2, je električna moč produkt toka in napetosti. Ko je ena izmed veličin enaka 0, bo tudi električna moč enaka 0.

Slika 38 prikazuje primerjavo karakteristike električne moči baterije DURACELL in naše baterije. Vidimo, da je električna moč prvih 10 minut res enaka 0, saj je bilo v tem času električno breme neaktivno. Baterija DURACELL generira največjo moč takoj po vklopu bremen. Le-ta znaša 11,4 mW. V nadaljevanju se moč zelo počasi znižuje, močno pa upade proti koncu meritve, ko se baterija že izprazni. Potek električne moči za našo baterijo je nekoliko drugačen. Električna moč (podobno kot smo videli pri napetosti) v začetku celo narašča. Maksimum doseže po 9,4 urah in znaša 12,4 mW. Nato pa prične najprej počasi, nato pa hitreje upadati.

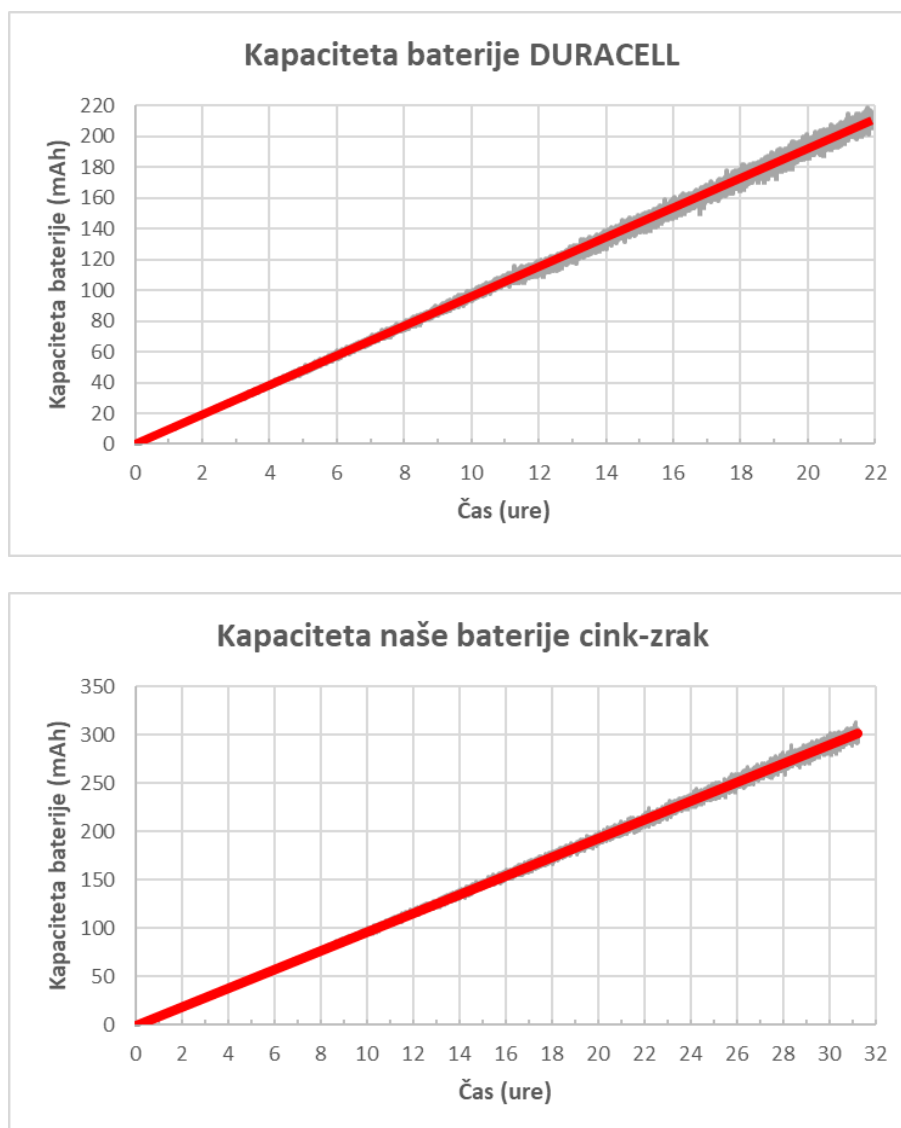


Slika 38: Primerjava karakteristike električne moči (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)

6.4 Kapaciteta baterije

Ključni podatek, ki določa zmogljivost baterije, je njena kapaciteta. Teoretično osnovo smo že spoznali v poglavju 2.5.4. Ker smo obe bateriji ves čas obremenjevali s konstantnim tokom, narašča dosežena kapaciteta baterije linearno s časom. Vsako uro se dosežena kapaciteta poveča za 10 mAh, saj je znašal tok bremena ves čas 10 mA. Končno doseženo kapaciteto baterij odčitamo iz najvišje točke v grafu (slika 39), to je takrat, ko se je meritev kapacitete baterije končala. Vidimo, da je baterija DURACELL dosegla kapaciteto 210 mAh (slika 39, zgornji

graf), naša baterija pa 301 mAh (slika 39, spodnji graf). Naša baterija cink-zrak ima torej višjo kapaciteto kot komercialna baterija DURACELL.



Slika 39: Merjenje kapacitete baterije (zgoraj: DURACELL, spodaj: naša baterija)

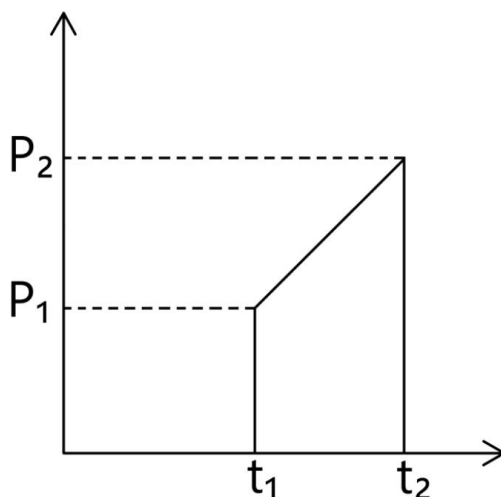
6.5 Energijska gostota baterije

Za obe bateriji lahko določimo tudi njuni energijski gostoti. To je količina energije na kilogram. Električno energijo (glej poglavje 2.5.3) lahko določimo iz karakteristike električne moči. Energija je namreč enaka ploščini področja pod krivuljo električne moči, kar je za obe bateriji prikazano na sliki 38.

Površino pod krivuljo električne moči smo izračunali s pomočjo trapezne metode. Postopek je prikazan na sliki 40. Na vodoravni osi je čas. Prikazani sta dve zaporedni meritvi, izmerjeni v času t_1 in t_2 , ki jima ustrežata moči, P_1 in P_2 (navpična os). Električna energija je enaka ploščini trapeza, med točkama t_1 in t_2 . Določimo jo s pomočjo naslednje enačbe:

$$W_{1,2} = \frac{P_2 + P_1}{2} \cdot (t_2 - t_1)$$

V orodju Excel izračunamo ploščine trapezov po zgornji enačbi za vse zaporedne meritve in na koncu vse te delne energije seštejemo in dobimo celotno energijo, ki jo je proizvedla baterija med testom.



Slika 40: Postopek izračuna električne energije s pomočjo trapezne metode. (lasten vir)

Za določitev energijske gostote potrebujemo poleg električne energije še maso aktivne snovi v bateriji. Stehtali smo baterijo DURACELL in cinkovo pasto naše baterije (slika 41).



Slika 41: Tehtanje aktivne snovi naše baterije cink-zrak. (lasten vir)

Energijsko gostoto, določeno v enoti vatna ura na kilogram (Wh/kg) izračunamo tako, da energijo, določeno s trapezno metodo, delimo z maso aktivne snovi baterije. Rezultati so prikazani v tabeli 5.

Tabela 5: Določitev energijske gostote

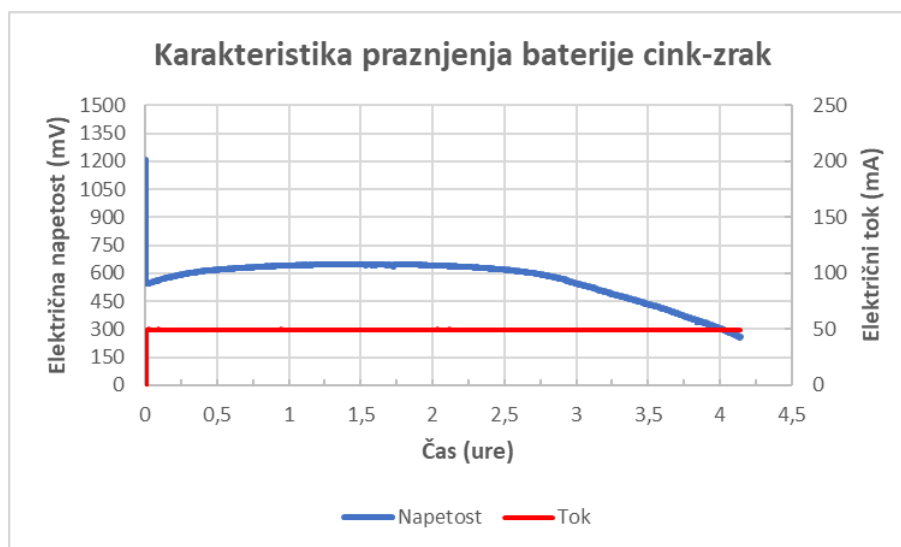
Enota	Baterija DURACELL	Naša baterija cink-zrak
Energija (mWh)	210,5	328,9
Energija (Wh)	0,2105	0,3289
Masa (g)	0,83	1,96
Masa (kg)	0,00083	0,00196
Energijska gostota (Wh/kg)	253,6	167,8

Iz tabele 5 je razvidno, da komercialna baterija DURACELL dosega energijsko gostoto 253,6 Wh/kg, medtem ko je energijska gostota naše baterije nižja in znaša 167,8 Wh/kg. Komercialna baterija je torej bolj učinkovita in optimalna od naše baterije cink-zrak, vendar je primerljiva.

6.6 Preizkus baterij pod visoko tokovno obremenitvijo

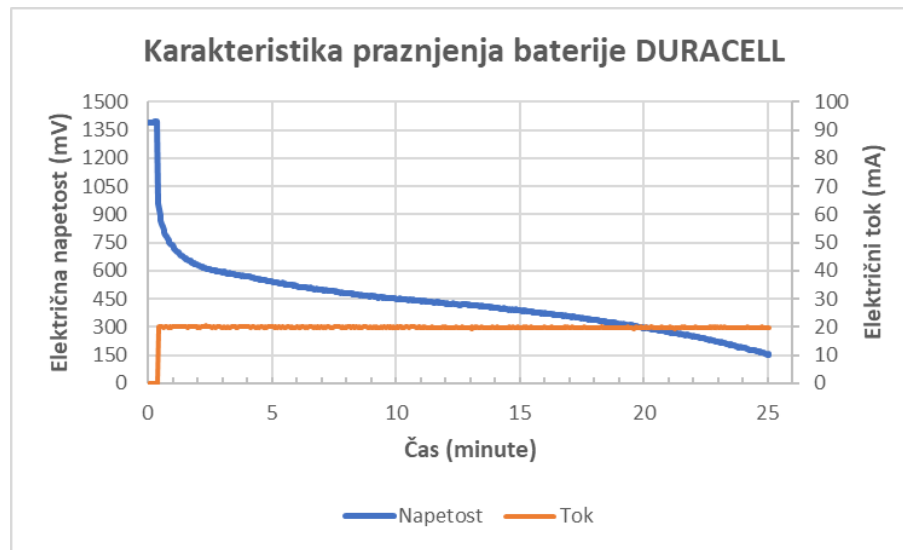
V prejšnjih poglavjih smo primerjali karakteristike baterij DURACELL in naše baterije s tokovno obremenitvijo 10 mA. Takšen tok je primeren za napajanje majhnih elektronskih naprav. Večje elektronske naprave potrebujejo za napajanje višje tokove. Posledično mora biti tudi baterija za napajanje le-teh bolj zmogljiva. Pri meritvah, ki jih podajamo v nadaljevanju, smo obe bateriji preizkusili še z nekajkrat višjo tokovno obremenitvijo. Pri tem velja poudariti, da smo za ta testiranja uporabili povsem sveže baterije (po merjenju obremenilne karakteristike je baterija popolnoma izpraznjena).

Slika 42 prikazuje karakteristiko praznjenja naše baterije cink-zrak ob konstantni obremenitvi 50 mA. Vidimo, da naša baterija zmore tudi tako veliko tokovno obremenitev. Potek električne napetosti ima podobno obliko kot pri obremenitvi 10 mA, vendar je električna napetost obremenjene baterije sedaj nižja (maksimum ob obremenitvi: 649,7 mV). Izmerjena kapaciteta baterije je bila tokrat nižja in je znašala 205 mAh. Maksimalna trenutna moč je bila skoraj trikrat večja in je znašala 32,2 mW.



Slika 42: Potek električne napetosti naše baterije cink-zrak ob bremenilnem toku 50 mA

Tudi baterijo DURACELL smo želeli preveriti z višjo tokovno obremenitvijo. Ta baterija je namenjena za napajanje slušnih aparatov, zato je prilagojena za nizke tokovne obremenitve (maksimalno 10 mA). Kljub temu nas je zanimalo obnašanje te baterije ob dvakrat večji tokovni obremenitvi.



Slika 43: Potek električne napetosti baterije DURACELL ob bremenilnem toku 20 mA

Iz karakteristike na sliki 43 vidimo, da baterija DURACELL ne zmore tokovne obremenitve 20 mA. Električna napetost baterije je hitro upadala in baterija je bila izpraznjena že po 25 minutah. Kapaciteta baterije je pri tej obremenitvi znašala samo 8 mAh.

7 Razprava in ugotovitve

Tabela 6 podaja povzetek merjenja karakteristik in primerjave komercialne baterije DURACELL ter naše baterije cink-zrak. Obe bateriji sta bili merjeni pod enakimi pogoji (konstantna obremenitev 10 mA) z isto merilno napravo (aktivno breme SIGLENT). Ugotavljamo, da imata obe bateriji primerljivo električno napetost v neobremenjenem stanju (DURACELL: 1,425 V, naša baterija: 1,447 V). Ta električna napetost je določena z elektrokemijskimi lastnostmi baterije (redoks potenciali, glej poglavje 3.4.1). Če bi želeli električno napetost povečati, lahko to storimo samo z zaporedno vezavo celic.

Ko bateriji obremenimo, se obema baterijama sesede električna napetost (DURACELL: 0,922 V, naša baterija: 1,264 V). Baterija DURACELL je namenjena za napajanje slušnih aparatov, ki imajo zelo nizko tokovno porabo, zato je bil vpliv tokovne obremenitve na to baterijo večji kot pri naši bateriji.

Tabela 6: Povzetek karakteristik komercialne baterije DURACELL in naše baterije

Parameter	Baterija DURACELL	Naša baterija cink-zrak	Enota
El. napetost neobremenjene baterije	1,425	1,447	V
Maks. el. napetost pod obremenitvijo (*)	0,922	1,264	V
Maks. električna moč (*)	11,4	12,4	mW
Kapaciteta baterije (*)	210	301	mAh
Energijska gostota	253,6	167,8	Wh/kg
Maks. preizkušeni tok	20	50	mA

*Podatek se nanaša na konstanten tok obremenitve 10 mA.

Zaradi višje napetosti pod obremenitvijo naša baterija cink-zrak generira višjo električno moč (12,4 mW) kot baterija DURACELL (11,4 mW). Zaradi večje fizične velikosti ima naša baterija tudi večjo električno kapaciteto (301 mAh) kot baterija DURACELL (210 mAh).

Za obe bateriji smo določili energijsko gostoto. Višja je bila pri komercialni bateriji DURACELL (253,6 Wh/kg) kot pri naši bateriji (167,8 Wh/kg). Kljub temu ocenjujemo, da sta

vrednosti primerljivi ob zavedanju, da je proizvajalec DURACELL vložil ogromno sredstev in časa za razvoj in optimizacijo vseh komponent baterije.

Preizkus baterij z zelo povečano jakostjo toka (obremenitvijo), pa je pokazal, da je naša baterija cink-zrak sposobna zagotavljati razmeroma velik tok (50 mA). Baterija DURACELL je zaradi svoje miniaturnosti prilagojena za poganjanje manjšega električnega toka skozi dolgo časovno obdobje. To je razvidno tudi iz konstrukcije baterije, saj ima na strani zračne katode le tri drobne luknjice za dovod kisika.

7.1 Ovrednotenje naših hipotez

H1: Primarno baterijo tipa cink-zrak je možno izdelati iz dostopnih in manj nevarnih sestavin.

Hipotezo št. 1 lahko v veliki meri potrdimo. Vse sestavine baterije smo našli v šolskem laboratoriju, razen filca iz aktivnega oglja in ksantan gumija. Edina nevarna snov je kalijev hidroksid (KOH), ki je močna baza, zato smo morali biti pri rokovanju z njim previdni (uporaba standardnih osebnih zaščitnih sredstev v laboratoriju). Ohišje baterije smo prav tako lahko razvili v orodju dostopnem preko spletnega brskalnika in ga natisnili s 3D-tiskalnikom.

H2: Električna napetost in energijska gostota naše izdelane primarne baterijske celice tipa cink-zrak sta primerljivi s komercialno baterijo enakega tipa.

Hipotezo št. 2 lahko v prvem delu potrdimo. Naša izdelana baterija je enakega tipa kot komercialna baterija tipa cink-zrak, zato sta napetosti neobremenjenih baterij skoraj enaki in odvisni od elektrokemijskih lastnosti cinka in kisika (elektrokemijska napetostna vrsta). V drugem delu smo hipotezo potrdili le deloma: energijska gostota komercialne baterije je bila višja od energijske gostote naše baterije. Razlog je v bolj učinkoviti in napredni uporabi sestavin, pa tudi zaradi same notranje zgradbe baterije (komercialna baterija je nastala z velikim vložkom sredstev, časa in raziskav). Zračna katoda je ena od ključnih komponent, ki določajo tokovno zmogljivost baterije cink-zrak. Z uporabo katalizatorja (npr. manganov dioksid – MnO_2) bi se redukcija kisika v zračni katodi bistveno povečala.

H3: Baterija tipa cink-zrak ne porablja vode v elektrolitu.

Hipoteze št. 3 nismo mogli potrditi. Iz kemijske reakcije je sicer razvidno, da se voda v sistemu ne porablja, vendar pa smo pri naši bateriji opazili, da se je po merjenju električnih karakteristik

baterije cinkova pasta pretvorila v cinkov oksid, kot je bilo pričakovano, vendar se je tudi precej izsušila. Razlog je izhlapevanje vode skozi zračne kanale, ki so namenjeni za dovod kisika do zračne katode. Če bi želeli izhlapevanje vode preprečiti, bi potrebovali zaporno membrano, ki bi dopuščala prehod kisika od zunaj v baterijo, preprečevala pa bi prehod vodne pare iz baterije v okolico. Komercialna baterija ima takšno membrano gotovo vključeno v svojo strukturo.

8 Zaključek

V raziskovalni nalogi smo uspešno izdelali in ovrednotili model baterije tipa cink-zrak. Spoznali smo osnove elektrokemije in elektrotehnike. Prav tako smo sami uspešno načrtali ohišje baterije s preprostim orodjem za 3D-modeliranje. S pomočjo preprostih in dostopnih sestavin smo izdelali cinkovo pasto (elektrolit) ravno prave gostote. Seznanili smo se z metodami merjenja kapacitete baterij po metodi konstantnega toka. S pomočjo elektronskega bremena SIGLENT smo izmerili karakteristike naše baterije in jih primerjali s karakteristikami komercialne baterije enakega tipa. Zaradi enake elektrokemijske zasnove, sta bili obe bateriji primerljivi (električna napetost neobremenjene baterije in energijska gostota). Naša baterija je generirala električno napetost 1,447 V in imela kapaciteto 301 mAh.

Ugotavljamo, da ima baterija tega tipa velik potencial v elektromobilnosti prihodnosti, oziroma v hranilnikih električne energije (Griljc, 2021), kjer trenutno še prevladujejo litijeve tehnologije (Kopač, 2009). Zaradi omejenih zalog litija bo človeštvo v prihodnosti gotovo moralo preiti na alternativne rešitve, ena od njih je v tej nalogi predstavljena tehnologija cink-zrak. Predstavljena naloga zato naslavlja zelo pomemben globalni družbeno-ekonomski problem prihodnosti.

Zaznali smo tudi nekaj možnosti izboljšav za delo v prihodnje. Želimo raziskati možnost izvedbe učinkovitejše zračne katode z vključitvijo katalizatorja, načrtujemo pa tudi izvedbo polnilne (sekundarne) baterije.

9 Seznam virov in literature

- CEGASA. (6. februar 2024). *Applications of Zinc-Air Batteries*. Pridobljeno iz Cegasa Corporation: <https://www.cegasa.com/en/zinc-air/applications>
- CellSaviors. (04. februar 2024). *Cellsaviors*. Pridobljeno iz How To Test A Battery's Capacity: <https://cellsaviors.com/blog/battery-capacity-test>
- Challoner, J. (2017). *Elementi : popolni ilustrirani vodič*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- Dilshad, K. A. (2023). Design of a setup for electrochemical measurements of aqueous Zn–air battery. *Bulletin of Materials Science*, 6. doi:<https://doi.org/10.1007/s12034-023-02931-5>
- Dolenc Koce, J. (2021). *Biologija 1, O biologiji, celicah in genetiki, Učbenik za biologijo v gimnazijah in srednjih strokovnih šolah*. Ljubljana: Mladinska knjiga.
- DURACELL. (4. februar 2024). <https://www.duracell.com/wp-content/uploads/2016/03/Zinc-Air-Tech-Bulletin.pdf>. Pridobljeno iz Zinc Air Tech Bulletin: <https://www.duracell.com/wp-content/uploads/2016/03/Zinc-Air-Tech-Bulletin.pdf>
- ENERGIZER. (4. februar 2024). *Energizer Zinc Air Prismatic Handbook*. Pridobljeno iz Energizer Zinc Air Prismatic Handbook: <https://data.energizer.com/pdfs/zincairprismatichandbook.pdf>
- Eučbeniki. (26. december 2023). *Spletno mesto interaktivnih učbenikov*. Pridobljeno iz Spletno mesto interaktivnih učbenikov: <https://eucbeniki.sio.si/kemija2/616/index1.html>
- Gray, T. (2012). *Elementi : slikovni pregled vseh znanih atomov v vesolju*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- Griljc, K. (2021). *Izkušnje z uporabo baterijskih hranilnikov električne energije : diplomsko delo*. Ljubljana: Repozitorij Univerze v Ljubljani. Pridobljeno 10. februar 2024 iz <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=129940>
- Haavisto, A. (1996). *Čudežni svet elementov*. Ljubljana : DZS.
- Huš, M. (2016). Eksplozivni telefon. *Revija Monitor*. Pridobljeno 10. februar 2024 iz <https://www.monitor.si/clanek/eksplozivnitemefon/177011/>
- Kopač, D. (2009). *Baterije - Izbrana poglavja iz uporabne fizike*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za fiziko. Pridobljeno 10. februar 2024 iz <http://www-f1.ijs.si/~ziherl/Baterije.pdf>
- Lower, S. (10. februar 2024). *All about electrochemistry*. Pridobljeno iz All about electrochemistry: <https://www.chem1.com/acad/webtext/elchem/>
- PVEducation. (4. februar 2024). *PVEducation*. Pridobljeno iz Battery Capacity: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-characteristics/battery-capacity>
- Rekoser. (29. december 2023). *Rekoser*. Pridobljeno iz How to measure battery capacity: <https://rekoser.com/blog/how-to-measure-battery-capacity/>
- REUK.co.uk (*The Renewable Energy Website*). (29. december 2023). Pridobljeno iz Measuring the Capacity of a Battery: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/storage/measuring-the-capacity-of-a-battery/>

- REUK.co.uk. (29. december 2023). *The Renewable Energy Website*. Pridobljeno iz Measuring the Capacity of a Battery: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/storage/measuring-the-capacity-of-a-battery/>
- Schröder, D. (2015). *Analysis of Reaction and Transport Processes in Zinc Air Batteries*. Gießen: Springer Vieweg.
- Shengjie, P. (2023). *Zinc-Air Batteries Fundamentals, Key Materials and Application*. Nanjing: Springer.
- SIGLENT. (26. december 2023). *siglent.eu*. Pridobljeno iz Siglent SDL1020X-E 150V / 30A 200W DC Load: <https://www.siglent.eu/product/1140797/siglent-sdl1020x-e-150v-30a-200w-dc-load-1-mv-1-ma-readback>
- Smrdu, A. (2009). *Kemija, snov in spremembe 2, učbenik za kemijo v 2. letniku gimnazije*. Ljubljana: Založništvo jutro.
- Žalar, Z. (2000). *Osnove elektrotehnike I*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- Zhang, H. (2022). *Materials Design and Engineering for High Energy-Density Rechargeable Zinc-air Batteries, doktorska disertacija*. Göttingen: Faculty of Forest Science and Forest Ecology, Georg-August-Universität Göttingen.
- Zongping, S. (2023). *Zinc–Air Batteries, Introduction, Design Principles, and Emerging Technologies*. Weinheim: WILEY-VCH.

10 Priloga

10.1 Programska koda za zajem meritev z napravo SIGLENT

Tabela 7: Izvorna koda v jeziku Python: merjenje karakteristike baterije

```
#Vključitev potrebnih knjižnic
import sys
import time

#Vključitev knjižnice proizvajalca merilne opreme SIGLENT
from siglent_sdl1000x import Device

#Funkcija za dodajanje podatkov na konec datoteke
def Func_NadaljujVpisDatoteke(ImeDatoteke, podatek):
    fileHandle = open(ImeDatoteke, "a+")
    fileHandle.write(podatek)
    fileHandle.write("\n")
    fileHandle.close()

#Funkcija ustvari datoteko in izvede prvi vpis vanjo
def Func_ZapisiDatoteko(ImeDatoteke, podatek):
    fileHandle = open(ImeDatoteke, "w+")
    fileHandle.write(podatek)
    fileHandle.write("\n")
    fileHandle.close()

#####
#PRICETEK PROGRAMA
#####

#Preveri vhodne argumente: CSV datoteka
if len(sys.argv) != 2:
    print("Uporaba: meritev_karakteristike_baterije.py ime_datoteke.csv")
    sys.exit(0)

#Iz ukazne vrstice preberemo ime CSV datoteke
IzhodnaDatotekaCSV = sys.argv[1]

#Ustvarimo datoteko in vanjo vpišemo prvo vrstico.
Func_ZapisiDatoteko(IzhodnaDatotekaCSV, "Cas[s];Napetost[mV];Tok[mA]")

#Ustvarimo ročico (handle) za napravo SIGLENT
dev = Device('USB0::0xF4EC::0x1621::SDL13GCC6R0307::INSTR')

#Določitev načina delovanja elektronskega bremena SIGLENT:

#1. Način delovanja: merjenje karakteristike baterije
```

```
dev.test.bat.enable()

#2. Merjenje po principu konstantnega toka
dev.test.bat.mode("CURRENT")

#3. Nastavitev konstantnega toka praznjenja: 10 mA
dev.test.bat.level(0.010)

#4. Nastavitev kriterija konca testa: ko napetost baterije pade pod 150 mV
dev.test.bat.v_stop(0.150)

#5. Aktiviranje konca testa: ko napetost baterije pade pod 150 mV
dev.test.bat.v_stop_enable(1)

#Zapomnimo si začetni čas testa
ZacetniCas = time.time()

#VKLOP elektronskega bremena v načinu konstantnega toka.
dev.test.bat.on()

#Merjenje karakteristike bremena se izvaja v naslednji zanki. Meritev se konča, ko elektronsko breme
zazna mejno #vrednost električne napetosti baterije
while True:

    #Iz merilne naprave SIGLENT preberemo trenutno vrednost napetosti in električnega toka baterije
    el_napetost_mV = float(dev.meas.voltage()) * 1000
    el_tok_mA = float(dev.meas.current()) * 1000

    #Izračunamo čas, ki je pretekel od pričetka testa: Od trenutnega časa odštejemo začetni čas
    cas_sekunde = round(time.time() - ZacetniCas, 3)

    #Na zaslon izpišemo čas, izmerjeno električno napetost in električni tok testirane baterije
    print("Čas [s]: "+str("%.3f" %cas_sekunde)+"          El. napetost [mV]: "+str("%.3f" %el_napetost_mV)+"
    El. tok [mA]: "+str("%.3f" %el_tok_mA))

    #Podatke zapišemo na konec datoteke
    Func_NadaljujVpisDatoteke(IzhodnaDatotekaCSV, str("%.3f" %cas_sekunde)+" "+str("%.3f"
    %el_napetost_mV)+" "+str("%.3f" %el_tok_mA))

    #Počakamo 2 sekundi. Nato napravimo naslednjo meritev.
    time.sleep(2)

#####
#KONEC PROGRAMA
#####
```