



Gimnazija Franca Miklošiča Ljutomer

PRIPRAVA IN DELOVANJE AKUMULATORSKIH CELIC NA OSNOVI ORGANSKIH KATOD V KOMBINACIJI Z RAZLIČNIMI KOVINSKIMI ANODAMI

Raziskovalna naloga na področju kemije in kemijske tehnologije

Avtor:

Filip Zver

Mentorja:

Mateja Godec, prof.

dr. Jan Bitenc

Ljutomer, 2023

Zahvala

Dr. Janu Bitencu s Kemijskega inštituta v Ljubljani se zahvaljujem za pomoč pri meritvah, za nasvete o pripravi akumulatorjev ter za pojasnila vseh rezultatov in grafov. Za pomoč in nasvete pri pisanju raziskovalne naloge se zahvaljujem svoji mentorici, profesorici Mateji Godec. Hvala šolski laborantki Sonji Koroša za svetovanje pri izdelavi elektrod ter profesorici Tanji Bigec za lektorski pregled naloge.

Povzetek

Raziskavo smo izvedli z namenom primerjati fizikalno-kemijske lastnosti kovinsko-organskih akumulatorjev, v katerih smo kot anodo uporabili cink, litij in aluminij. Primerjali smo njihovo napetost praznjenja, kapaciteto in spreminjaanje teh lastnosti glede na maso aktivnega materiala. V teoretičnem delu smo v splošnem predstavili delovanje akumulatorjev in baterij, njihove lastnosti ter različne pojme, ki so ključni za razumevanje naše raziskovalne naloge, in razložili smiselnost raziskovanja alternativnih katodnih materialov ter anodnih kovin. V eksperimentalnem delu smo razložili, kako smo se raziskave lotili, katere pripomočke smo za to uporabili in prikazali rezultate naših meritev in raziskav. V zaključku smo zaokroženo prikazali rezultate naših eksperimentov. Ugotovili smo, da imajo akumulatorji z alternativnimi organskimi katodami in kovinskimi anodami relativno visoke napetosti, vendar imajo težave s padanjem kapacitete ter topnostjo organskega materiala, zato še niso primerni za praktično uporabo.

Ključne besede: menadion, alizarin, cink, litij, aluminij, napetost, kapaciteta

Abstract

The study was carried out with the aim of comparing the physicochemical properties of metal-organic batteries using zinc, lithium and aluminium as anodes. We compared the discharge voltage, the capacity and the variation of these properties as a function of the mass of the active material. In the theoretical part, we presented in general the operation of accumulators and batteries, their properties and different concepts central to the understanding of our research task, and explained the rationale for exploring alternative cathode materials and anode metals. In the experimental part, we explained how we conducted the research, what tools we used for it, and presented the results of our measurements and research. In the conclusion, we presented the results of our experiments in a rounded form. We found that batteries with alternative organic cathodes and metal anodes have relatively high voltages, but have problems with capacity loss and solubility of the organic material, so they are not yet suitable for practical use.

Key words: menadione, alizarin, zinc, lithium, aluminium, voltage, capacity

Kazalo vsebine

1. Uvod.....	6
2. Teoretični del.....	7
2.1 Baterije in akumulatorji.....	7
2.2 Tipi akumulatorjev in primarnih baterij	8
2.2.1 Litijevi akumulatorji in primarne baterije	8
2.2.2 Cinkovi akumulatorji in primarne baterije	8
2.2.3 Aluminijevi akumulatorji in primarne baterije	9
2.3 Izbera organskih materialov	10
2.3.1 Alizarin	10
2.3.2 Alizarinova sol	11
2.3.3 Menadion	12
2.4 Fizikalni parametri shranjevalnikov električne energije	13
2.4.1 Električna napetost	13
2.4.2 Kapaciteta	13
2.4.3 Energijska gostota	13
3. Eksperimentalni del	14
3.1 Priprava elektrod.....	14
3.2 Priprava alizarinove soli	15
3.3 Pripomočki in vrste celic.....	15
3.3.1 »Swagelok« celice.....	16
3.3.2 »Coffee bag« celice	16
3.4 Sestava celic.....	17
3.4.1 Litij.....	17
3.4.2 Cink	18
3.4.3 Aluminij.....	18
3.5 Testiranje celic.....	18
4. Rezultati	19
4.1 Celice z menadionom.....	19
4.2 Celice z alizarinom.....	20
4.3 Celice z alizarinovo soljo.....	22
4.4 Primerjava celic glede na maso elektrod	23
4.5 Kapacitete, napetosti in energijske gostote celic	25
5. Zaključki	27
6. Viri in literatura	29
6.1 Viri slik	30

Kazalo slik

Slika 1: Daniellov galvanski člen, (Vidmar, 2020)	7
Slika 2: Shema Li-ionske baterije, (Huš, 2014)	8
Slika 3: Shema cink-ogljikove baterije, (Štirn, b. d.)	9
Slika 4: Shema Al-ionske baterije, (Wogan, 2015).....	10
Slika 5: Skeletna formula alizarina, (Alizarin, b. d.)	11
Slika 6: Shema izmenjavanja elektronov v alizarinovi katodi.....	11
Slika 7: Skeletna formula alizarinove soli.....	11
Slika 8: Shema izmenjavanja elektronov v katodi z alizarinovo soljo	12
Slika 9: Skeletna formula menadiona, (Menadione, b. d.)	12
Slika 10: Shema izmenjevanja elektronov v menadionovi katodi	12
Slika 11: Aktivni material alizarin	14
Slika 12: Aktivni material menadion	14
Slika 13: Vezivo teflon PTFE	14
Slika 14: Prevodni ogljik (Printex XE2)	14
Slika 15: Izopropanol	14
Slika 16: Kepa zmesi materiala	15
Slika 17: Razvaljana kepa	15
Slika 18: Sekač za izsekavanje elektrod	15
Slika 19: Posušene elektrode	15
Slika 20: Litijev hidroksid	15
Slika 21: Alizarinova sol.....	15
Slika 22: Suha komora	16
Slika 23: »Swagelok« celica	16
Slika 24: »Coffee bag« celici	17
Slika 25: Polaganje elektrode v »swagelok«	17
Slika 26: Polaganje separatorja v »swagelok«.....	17
Slika 27: Omakanje separatorja z elektrolitom	17

Kazalo grafov

Graf 1: Napetost menadionovih celic v odvisnosti od njihove kapacitete	19
Graf 2: Kapaciteta pri praznjenju menadionovih celic v odvisnosti od števila ciklov	20
Graf 3: Napetost alizarinovih celic v odvisnosti od njihove kapacitete	20
Graf 4: Kapaciteta pri praznjenju alizarinovih celic v odvisnosti od števila ciklov.....	21
Graf 5: Napetost litijevih celic z alizarinom/alizarinovo soljo v odvisnosti od njihove kapacitete	22
Graf 6: Napetost aluminijevih celic z alizarinom/alizarinovo soljo v odvisnosti od njihove kapacitete.....	22
Graf 7: Kapaciteta pri praznjenju litijevih in aluminijevih celic z alizarinom/alizarinovo soljo v odvisnosti od števila ciklov.....	23
Graf 8: Kapaciteta pri praznjenju menadionovih celic z različnimi masami glede na površino elektrod v odvisnosti od števila ciklov	24
Graf 9: Kapaciteta pri praznjenju alizarinovih celic z različnimi masami glede na površino elektrod v odvisnosti od števila ciklov	25

Kazalo tabel

Tabela 1: Delovna in teoretična kapaciteta, izkoristek slednje, platojska napetost in teoretična energijska gostota menadionovih celic	25
Tabela 2: Delovna in teoretična kapaciteta, izkoristek slednje, platojska napetost in teoretična energijska gostota alizarinovih celic.....	26

1. Uvod

Ker svet vedno bolj zamenjuje energijo fosilnih goriv za elektrifikacijo brez emisij, postajajo baterije ključno orodje za shranjevanje energije za lažji energetski prehod, saj proizvodnja električne energije iz obnovljivih virov ni stalna (na primer veter ne piha vedno enako močno, sonce ne sveti enakomerno ves dan). Promet danes ustvari približno 30 % svetovnih emisij, zato je zmanjšanje teh zelo pomembno. Čeprav so začetni stroški višji, je v večini držav ceneje voziti električno vozilo kot avtomobil na fosilna goriva, kar potrošnike spodbuja k zamenjavi in pomaga pri razogljicanju cestnega prometa ter manjši vsebnosti prašnih delcev v ozračju. Zaradi napredka v tehnologiji baterij so te postale ključna komponenta za trajnostna potovanja v prihodnosti, saj je prav tehnologija litij-ionskih baterij omogočila takšne električne avtomobile, kot jih poznamo danes. Baterije so ena od tehnologij, ki jih je mogoče uporabiti za izboljšanje stanja v svetu in boj proti podnebnim spremembam. (Wood, Batteries are a ... , b. d.)

Danes uporabljam večinoma litij-ionske baterije. Čeprav te vsebujejo zelo majhno količino litija, bo predvidena rast povpraševanja po tovrstnih baterijah povzročila pritisk na dobavne verige za materiale, kot so litij, nikelj, kobalt, mangan in grafit. (Wood, Batteries are a ... , b. d.)

Problem predstavljajo tudi odpadne baterije. Nekatere vsebujejo nevarne snovi, ki zastrupljajo podtalnico in povzročajo nepopravljive poškodbe na organih živih bitij, nekatere med njimi so celo rakotvorne. Hkrati pa so te snovi zelo dragocene surovine in jih v naravi težko pridobimo, saj se nahajajo v omejenih količinah. (Vpliv na okolje, b. d.)

Na drugi strani se kot alternativa ponujajo organski elektrodni materiali, ki so obetavni za elektrokemične naprave za shranjevanje energije, ker imajo visoko teoretično kapaciteto, strukturno raznolikost in fleksibilnost. Poleg tega so lahki, poceni in okolju prijazni. Organski elektrodni materiali so obetavna alternativa običajnim anorganskim materialom. Različne organske materiale, kot so prevodni polimeri, organodisulfidi, polimeri nitroksilnih radikalov in konjugirane karbonilne spojine, so preučevali kot elektrodne materiale za litijeve baterije. Med njimi so bile majhne organske karbonilne spojine in polimeri, ki vsebujejo karbonile, zaradi svoje visoke teoretične zmogljivosti, hitre redoks kinetike in strukturne raznolikosti široko raziskani kot elektrodni materiali. Vendar imajo ti materiali bistvene pomanjkljivosti, kot sta topnost v elektrolitskih medijih in nizka prevodnost. (Bhosale, idr., 2018)

V tej raziskovalni nalogi smo si zaradi navedenih razlogov kot cilj zastavili izdelati baterije iz organskih materialov, ki jih najdemo v naravi in v redoks reakcijah v živih organizmih.

Postavili smo naslednje hipoteze:

1. Organske spojine lahko uporabimo kot katode v kombinaciji z različnimi kovinskimi anodami (litijeva, aluminijeva, cinkova).
2. Napetosti celic bodo različne glede na uporabljeno anodo ter njeno mesto v redoks vrsti.
3. Akumulatorski sistemi z alizarinom bodo imeli večjo kapaciteto kot akumulatorski sistemi z menadijom.
4. Kapacitete posameznega materiala v različnih akumulatorskih sistemih bodo podobne.
5. Elektrode z večjimi masami aktivnega materiala bodo imele večjo kapaciteto glede na površino elektrode, vendar manjšo gravimetrično specifično kapaciteto.

2. Teoretični del

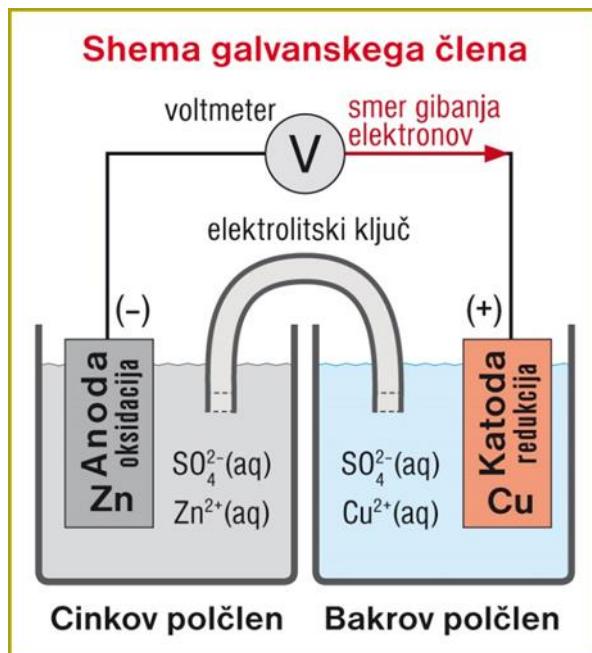
2.1 Baterije in akumulatorji

Baterija je elektrokemijska celica, katere glavna naloga je pretvorba kemijske energije v električno. V vseh elektrolitskih celicah so pretvorbe povezane z elektrokemijskimi oksidacijsko redukcijskimi reakcijami. (Dominko, 2002)

Ločimo primarne in sekundarne baterije. Primarne so namenjene za enkratno uporabo in jih ne moremo napolniti. Uporabljamo jih npr. v daljincih, senzorjih za dim in nekaterih otroških igračah. Sekundarne baterije ozioroma akumulatorje lahko napolnimo. Slednje uporabljamo v vsakdanjem življenju, npr. v telefonih, računalnikih in drugih pametnih elektronskih napravah. (Linden, 2002)

Vsaka elektrokemijska celica je sestavljena iz anode, katode in elektrolita. Anoda je negativno nabita elektroda, na kateri poteka oksidacija, torej oddajanje elektronov. Katoda je pozitivno nabita elektroda, na kateri poteka redukcija, torej sprejemanje elektronov. Elektrolit je snov z mobilnimi ioni, ki omogoča transport ionov. Tipični elektrolit vsebuje topilo (npr. voda) in v njem raztopljeno sol (npr. NH_4Cl). (Dominko, 2002)

Večina baterij ima tudi separator, ki ločuje obe elektrodi. Separator je običajno prepojen z elektrolitom. Čeprav ioni prosto prehajajo med elektrodama, je sam separator izolator brez električne prevodnosti, saj namreč preprečuje kratki stik med elektrodama. Separatorja izjemoma ne potrebujejo baterije s trdnim elektrolitom. (How does Electrolyte Work?, 2021)



Slika 1: Daniellov galvanski člen, (Vidmar, 2020)

Na sliki 1 je prikazan Daniellov galvanski člen, ki je primer zelo preproste primarne baterije. Anodo predstavlja cinkova ploščica, katodo pa bakrova. Na anodi je vedno snov z nižjim elektrodnim potencialom, v tem primeru torej cink z $-0,76 \text{ V}$, na drugi strani na katodi pa z višjim elektrodnim potencialom, torej baker s $+0,34 \text{ V}$. Ploščici obeh kovin sta obdani z raztopino, v kateri so prisotni posamezni kationi obeh kovin ter sulfatni ioni. V elektrolitskem ključu je raztopljen elektrolit s sulfatnimi ioni. Separator predstavlja most, po katerem se pretaka elektrolit. Tok elektronov poteka od anode h katodi. (Lower, 2022)

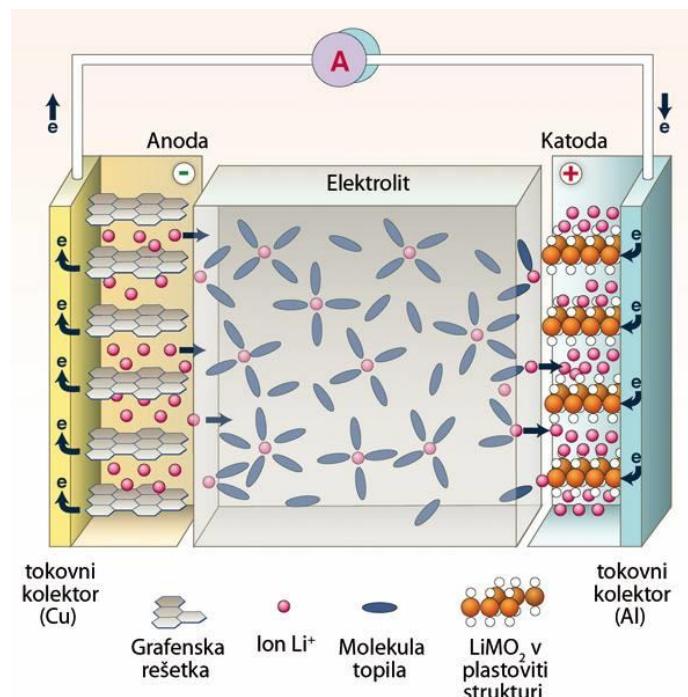
2.2 Tipi akumulatorjev in primarnih baterij

2.2.1 Litijevi akumulatorji in primarne baterije

Litij je najlažja od vseh kovin, ima najnižji elektrokemijski potencial in zagotavlja največjo specifično energijo na težo. Problem je, da pri polnjenju in praznjenju litijeve baterije nastanejo dendriti, ki prodrejo v separator in povzročijo električni kratki stik med elektrodama. Temperatura celice se tako hitro dvigne in se približa tališču litija, kar povzroči topotno uhajanje (thermal runaway) in lahko pride do eksplozij in vžigov. (How do Lithium Batteries Work?, b. d.)

Inherentna nestabilnost kovinskega litija, zlasti med polnjenjem, je preusmerila raziskave na iskanje primerne litijeve anode, ki bi omogočila stabilno delovanje akumulatorjev.

Li-ionska baterija deluje na principu prehajanja litijevih ionov med katodo in anodo. Katoda je iz kovinskega oksida (običajno iz kobalta), anoda pa je sestavljena iz porognega ogljika (večinoma iz grafita, med novimi materiali sta zanimiva tudi silicij in grafen). Med praznjenjem ioni tečejo od anode do katode skozi elektrolit in separator; pri polnjenju pa poteka obratni proces. Na sliki 2 je shema Li-ionske baterije. (Bitenc, 2016)



Slika 2: Shema Li-ionske baterije, (Huš, 2014)

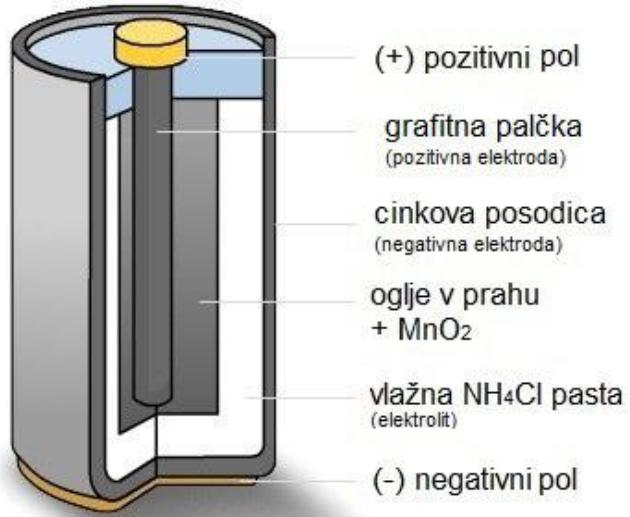
Prednosti litij-ionskih baterij so predvsem njihova visoka specifična energija, dolga življenska doba ter visoka zmogljivost. Prav tako je polnjenje preprosto in razmeroma hitro. Vendar z vsebnostjo kobalta in drugih kovin onesnažujejo okolje, zahtevajo pa tudi zaščitno vezje za preprečitev vžigov. (How do Lithium Batteries Work?, b. d.)

2.2.2 Cinkovi akumulatorji in primarne baterije

Cink se danes v baterijah uporablja večinoma le v cink-ogljkovih in cink-kloridnih primarnih baterijah, ki jih ne moremo več napolniti. Le-te so namenjene za naprave z nizko električno porabo, kot so na primer daljinci, otroške igrače in podobno. (What are zinc-carbon batteries?, 2020)

Cink-ogljkove baterije sestavljajo cinkova anoda, ki tvori ohišje, katoda, katero tvori ogljkova palica, obdana z manganovim dioksidom, separator in vlažna pasta amonijevega klorida, ki

deluje kot elektrolit. Njihova napetost je približno 1,5 V. Na sliki 3 je shema cink-ogljikove baterije. (What are zinc-carbon batteries?, 2020)



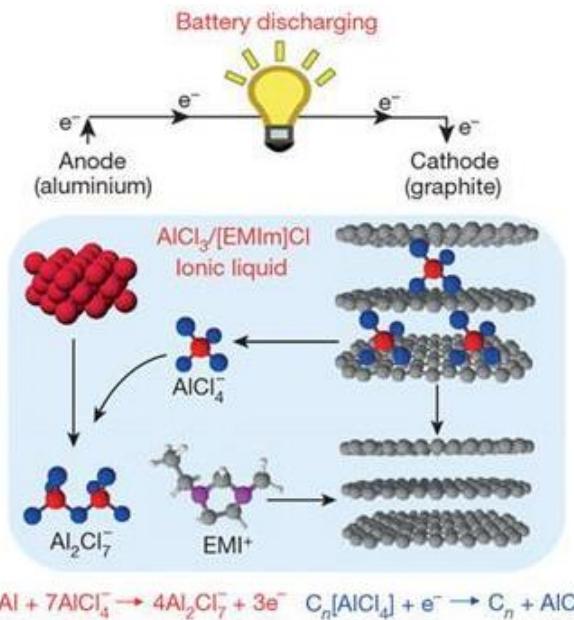
Slika 3: Shema cink-ogljikove baterije, (Štirn, b. d.)

Cink-kloridne baterije imajo drugačni elektrolit ($ZnCl_2$) in imajo daljšo življenjsko dobo ter večjo kapaciteto. Problemi cinkovih baterij so nizka kapaciteta, kratka življenjska doba in padanje napetosti z uporabo, zato jih vse bolj izpodrivatejo druge baterije. (What are zinc-carbon batteries?, 2020)

2.2.3 Aluminijevi akumulatorji in primarne baterije

Aluminij je privlačen zaradi velike volumetrične kapacitete in velike količine v zemeljski skorji ter posledično relativno nizke cene. Poznamo več vrst aluminijevih baterij, med drugim aluminij-zračne primarne baterije in zelo obetavne Al-ionske sekundarne baterije. (Elia, idr., 2021)

Al-ionska baterija je sestavljena iz aluminijeve anode, grafitne katode in kloridnega elektrolita. Med praznjenjem gredo ioni od anode do katode in obratno pri polnjenju. Na sliki 4 je predstavljena shema Al-ionske baterije. (Elia, idr., 2021)



Slika 4: Shema Al-ionske baterije, (Wogan, 2015)

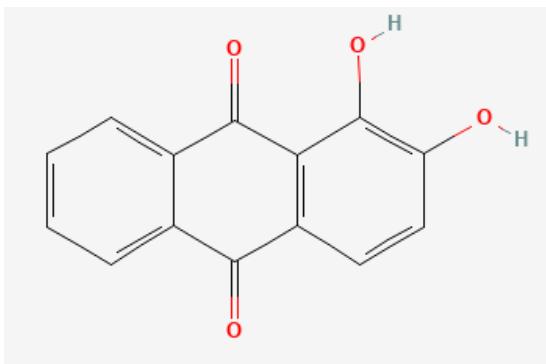
V primerjavi z Li-ionsko baterijo je ta veliko cenejša, prav tako pa se zelo hitro napolni in je pri večkratnem praznjenju in polnjenju razmeroma stabilna. Al-ionska celica sicer nima tako visoke energijske gostote.

2.3 Izbira organskih materialov

Ob trenutnem razvoju in trendih bo v prihodnosti potrebnih vse več baterij, ki bodo morale biti tudi zmogljivejše. Prej navedeni akumulatorji za svoje delovanje potrebujejo različne materiale, ki niso tako zelo pogosti. Če vzamemo pod drobnogled Li-ionske baterije, vidimo, da različne vrste vključujejo kobalt, nikelj, aluminij, mangan in litij. Ti materiali so z izjemo aluminija, niklja in mangana relativno redki in tudi dragi, njihovo pridobivanje pa je pogosto okolju neprijazno. Zato poteka veliko raziskav na temo organskih katod, ki bi te materiale lahko nadomestile. V raziskovalni nalogi smo izbrali dva materiala, alizarin in menadijon, ki sodelujeta v življenjskih procesih v organizmih, prav tako sta relativno pogosta in ju je preprosto pridobivati, zato sta teoretično obetavna za uporabo v baterijah. (Kritične surovine za ... , 2020)

2.3.1 Alizarin

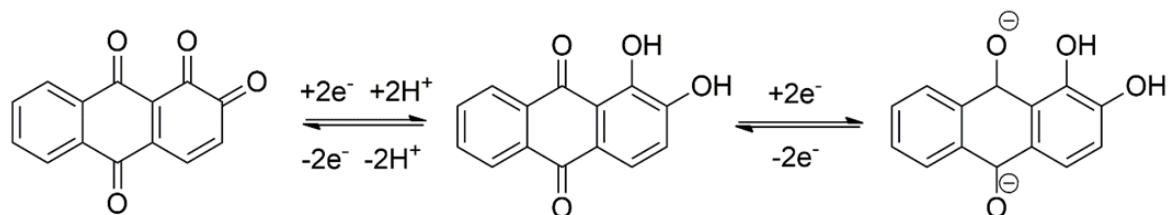
Alizarin je spojina, ki ima v rastlinah vlogo kromofora, barvila in rastlinskega metabolita. Kemijsko gledano je dihidroksiantrakinon, ki je antracen-9,10-dion, v katerem sta dve hidroksilni skupini na položajih 1 in 2. Njegova molekulska formula je $C_{14}H_8O_4$, molska masa pa 240,21 g/mol. (Alizarin, b. d.)



Slika 5: Skeletna formula alizarina, (Alizarin, b. d.)

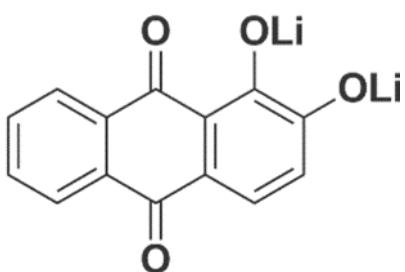
Na sliki 5 je prikazana skeletna formula alizarina. Alizarin najdemo v rastlini po imenu pravi brošč. V Anatoliji so v preteklosti razvili posebni postopek za pridobivanje močne, čiste škrlatne barve iz njenih korenin. Tkanine, pobarvane s to »turško rdečo«, so bile zelo zaželene v Evropi, kjer niso poznali skrivnosti pridobivanja tako čiste rdeče barve. Evropejci so si močno prizadevali, da bi tudi sami iznašli tako lepo barvo. To jim je uspelo leta 1862, ko so v Franciji izolirali alizarin. Leta 1871 so ga tudi umetno sintetizirali. (A Guide to Wild Madder Extract, b. d.)

Dve konjugirani karbonilni in dve konjugirani hidroksilni skupini teoretično omogočata izmenjavo 4 elektronov, kar je obetavno za delovanje baterije. Na sliki 6 je prikazan predvidevan proces izmenjave elektronov.



Slika 6: Shema izmenjanja elektronov v alizarinovi katodi

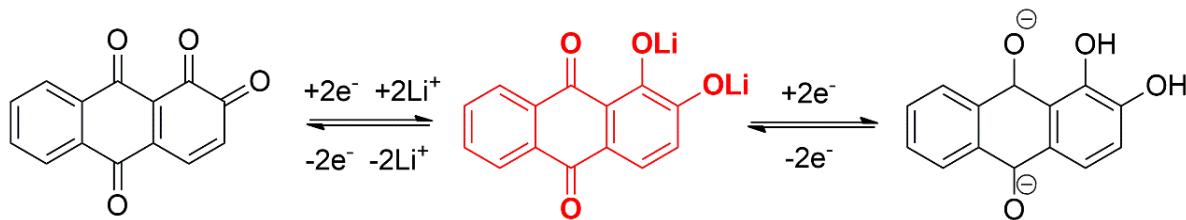
2.3.2 Alizarinova sol



Slika 7: Skeletna formula alizarinove soli

Na sliki 7 je skeletna formula alizarinove soli. Pri reakciji pridobivanja soli je potekla zamenjava vodikovih atomov v hidroksilnih skupinah z litijevimi ioni.

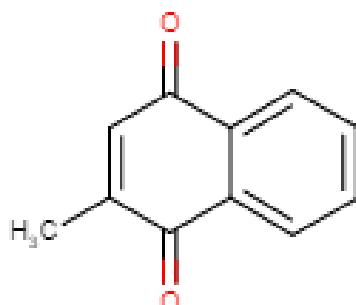
Izdelali smo jo zaradi slabega delovanja alizarina, saj smo sklepali, da bo bolje delovala – vsebuje namreč litijeve ione, ne pa tudi vodikovih protonov, ki lahko ovirajo elektrokemijski mehanizem v brezvodnih elektrolitih.



Slika 8: Shema izmenjavanja elektronov v katodi z alizarinovo soljo

Na sliki 8 je prikazana reakcija, ki poteka v katodi z alizarinovo soljo. Tako kot alizarin je tudi njegova sol sposobna izmenjati 4 elektrone.

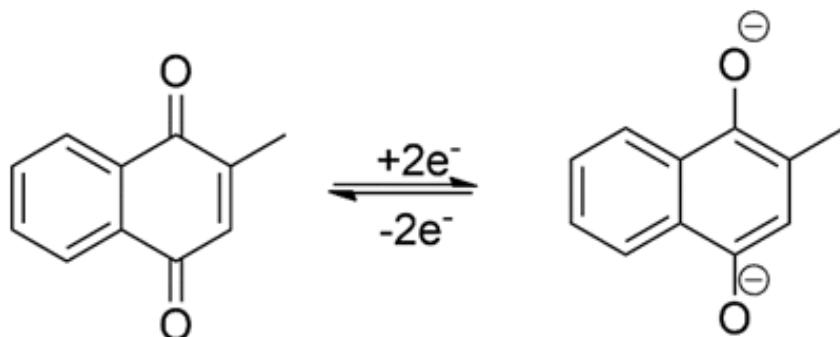
2.3.3 Menadion



Slika 9: Skeletna formula menadiona, (Menadione, b. d.)

Na sliki 9 je skeletna formula menadiona, ki je rumenkasta, sintetična kristalinična snov. Njegova molekulska formula je $C_{11}H_8O_2$, molska masa pa 172,18 g/mol. (Menadione, b. d.)

Iz elektrotehničnega vidika smo menadion izbrali zaradi dveh konjugiranih karbonilnih skupin, ki lahko izmenjata 2 elektrona. To je prikazano na sliki 10.



Slika 10: Shema izmenjevanja elektronov v menadionovi katodi

Menadion je bolj znan kot vitamin K₃. Veliko pozornosti je pritegnil, saj je izključno sintetični derivat naftokinona, ki ga v naravi ni, a se uporablja kot pomembni predhodnik za sintezo vitaminov K₁ in K₂. Vitaminji K, pridobljeni s hrano, imajo pomembno vlogo pri ohranjanju fiziologije živali, saj vplivajo na strjevanje krvi in uravnavajo kalcifikacijo kosti. Pri živalih se lahko menadion v črevesnem traktu s pomočjo črevesne mikrobiote pretvori v vitamin K₂. Pri ljudeh pride do pretvorbe menadion–vitamin K₂ po njegovi alkilaciji v jetrih. Delovanje menadiona v živih organizmih ni omejeno na njegovo uporabo kot biosintetičnega predhodnika vitaminov K₁ in K₂, različne študije so pokazale širok spekter bioloških aktivnosti, kot je protirakovo, protibakterijsko in protigliivično delovanje. Med najpogostejsimi metodami za

pripravo menadiona najdemo na primer oksidacijo 2-metilnaftalena ali 2-metilnaftola. Drugi manj pogosti, a enako učinkoviti pristopi za njegovo sintezo vključujejo demetilacijo 2-metil-1,4-dimetoksinaftalena, konstrukcijo naftokinonskega obroča, metilacijo 1,4-naftokinona in elektrokemično sintezo iz 2-metil-1,4-dihidroksinaftalena. (De Souza, idr., 2022)

2.4 Fizikalni parametri shranjevalnikov električne energije

2.4.1 Električna napetost

Gre za razliko v električnem potencialu med dvema točkama. Enota za električno napetost je volt (V). Napetost baterije lahko izmerimo z voltmetrom ali pa jo izračunamo iz standardnih elektrodnih potencialov tako, da potencialu katode odštejemo potencial anode. Ti dve vrednosti se ponavadi razlikujeta, saj sta odvisni od različnih parametrov, med drugim tudi od koncentracije ionov. Največjo napetost zagotavljajo materiali, ki so med seboj čim bolj narazen v redoks vrsti, torej so kovinski in organski materiali s tega vidika idealni. Kombinacija teh dveh pa ima sicer težave s polarizacijo ter reaktivnostjo z drugimi deli celice. (Linden, 2002)

2.4.2 Kapaciteta

Kapaciteta označuje količino naboja, katerega lahko dobimo pri praznjenju baterije. Najpogosteje jo opredeljujemo v enotah Coloumb (C) in amperske ure (Ah). Odvisna je od količine aktivnih snovi v elektrokemijski celici in toka. (Linden, 2002)

Za lažjo primerjavo kapaciteto izražamo na maso aktivne snovi (gravimetrična kapaciteta, enota je Ah/g) ali pa na prostornino (volumetrična kapaciteta, enota je Ah/ml). Kapaciteto, ki jo izračunamo, imenujemo teoretična kapaciteta, eksperimentalno dobljeno pa delovna kapaciteta. (Linden, 2002)

2.4.3 Energijska gostota

Energijsko gostoto baterij lahko prikažemo na dva različna načina: gravimetrično energijsko gostoto in volumetrično energijsko gostoto. Gravimetrična energijska gostota je merilo, koliko energije vsebuje baterija glede na svojo težo. Običajno je predstavljena v vatnih urah na kilogram (Wh/kg). Volumetrična energijska gostota je glede na prostornino baterije. Običajno je izražena v vatnih urah na liter (Wh/L). (Linden, 2002)

Energijsko gostoto izračunamo tako, da množimo napetost baterije z njeno kapaciteto in delimo z maso (gravimetrična) ali prostornino (volumetrična) baterije. (Linden, 2002)

3. Eksperimentalni del

3.1 Priprava elektrod

Elektrode smo pripravili iz aktivnega materiala (alizarin in menadion), prevodnega ogljika (Printex XE2) in veziva teflon PTFE v masnem razmerju 6 : 3 : 1. Ti materiali so prikazani na slikah 11, 12, 13 in 14.



Slika 11: Aktivni material alizarin



Slika 12: Aktivni material menadion



Slika 13: Vezivo teflon PTFE



Slika 14: Prevodni ogljik (Printex XE2)

Izdelovali smo 4 mg in 8 mg elektrode. Iz masnega razmerja posameznih spojin v elektrodah smo izračunali mase snovi. Za eno 4 mg elektrodo smo potrebovali 2,4 mg aktivnega materiala, 1,2 mg prevodnega ogljika ter 0,4 mg veziva teflona PTFE, ki je bil v obliki suspenzije v vodi. Potrebno količino smo izračunali iz njegovega masnega deleža v vodi (60 %) in gostote te suspenzije (1,5 g/ml). Izračunali smo zelo majhen volumen. V šolskem laboratoriju nimamo potrebne opreme za odmerjanje tako majhnih volumnov, zato smo dodali eno kapljico ob predpostavki, da nenatančno odmerjena količina veziva ne bo bistveno vplivala na delovanje naših elektrod. Pazili pa smo, da smo pri vsaki pripravi elektrod dodali približno enako količino. V 8 mg elektrodah so bile mase seveda dvakrat večje. Ker smo izdelovali 10 elektrod iz ene mešanice, da bi se izognili neenakomerni masi posameznih elektrod, smo dali 10-krat večje mase snovi. Upoštevali smo tudi odpadni material, ki nastane pri izsekavanju, in dodali nekaj rezervnega materiala.

Najprej smo natehtali aktivni material in prevodni ogljik. Nato smo dodali vezivo in vse skupaj dobro pregnetli s pestilom v terilnici.

K zmesi smo dodali tudi izopropanol (slika 15), ki omogoča lažjo homogenizacijo materiala in lažje valjanje zmesi, na koncu pa tako ali tako izhlapi in ne spremeni kemične sestave elektrod. Zmes smo gnetli tako dolgo, dokler ni iz nje nastala obstojna kepa materiala.



Slika 15: Izopropanol

Nato smo kepo (slika 16) položili med dve plasti papirja za peko in jo razvaljali z valjarjem v $15\text{--}20\text{ cm}^2$ veliko površino (slika 17). Iz nje smo s sekačem posebne velikosti izsekali elektrode. Sekač je prikazan na sliki 18. Vsakokrat, ko smo elektrodo izsekali, smo jo stehitali in maso primerjali z želeno. Ob prevelikem odstopanju smo elektrode ponovno dali v terilnico in dodali nekaj kapljic izopropanola. Postopek je zelo zamuden in ga je potrebno večkrat ponoviti, da dobimo elektrode z želenimi masami. Ko smo izdelali vse elektrode, smo jih postavili v sušilnik in jih pri $50\text{ }^\circ\text{C}$ sušili čez noč, dokler niso bile povsem suhe. Po sušenju smo jih zapakirali v neprodušno posodo, da smo preprečili dovod kisika in vlage (slika 19). Bistvenega pomena je, da so bile elektrode povsem suhe, preden smo z njimi v suhi komori pripravili celice, v katerih je potrebna atmosfera brez vode in kisika.



Slika 16: Kepa zmesi materiala



Slika 17: Razvaljana kepa



Slika 18: Sekač za izsekavanje elektrod



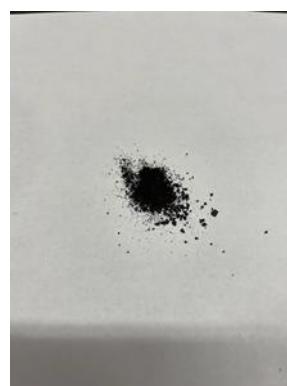
Slika 19: Posušene elektrode

3.2 Priprava alizarinove soli

Zaradi slabega delovanja alizarina smo se odločili, da bomo dodatno naredili še elektrodo z litijev alizarinovo soljo. Sol smo pripravili tako, da smo litijev hidroksid (slika 20) raztopili v vodi in dodali alizarin po stehiometričnem razmerju. Nato smo raztopino na magnetnem mešalu mešali en dan. Po mešanju smo odparili vodo in nastala je alizarinova sol temno vijolične barve (slika 21). Elektrode smo izdelali podobno kot prej, le da smo namesto aktivnega materiala uporabili alizarinovo sol.



Slika 20: Litijev hidroksid



Slika 21: Alizarinova sol

3.3 Pripomočki in vrste celic

Akumulatorji za raziskave v laboratoriju se sestavljajo v treh vrstah celic – gumbnih, »swagelokih« in »coffee bagih«. Pri naši raziskavi gumbnih celic nismo uporabljali. Litijeve in

aluminijeve celice se izdelujejo v suhi komori. Suha komora je neprodušno zaprta komora, v kateri lahko ustvarimo od zunanjosti neodvisno atmosfero. Prikazana je na sliki 22. V našem primeru je v bil v suhi komori argon, saj notranjost akumulatorja ne sme priti v stik z zrakom ali vlogo v zraku. Predvsem litijeve in aluminijeve anode ter nekateri elektroliti so občutljivi na zrak.



Slika 22: Suha komora

3.3.1 »Swagelok« celice

Swagelok je ameriško podjetje, ki izdeluje različne vrste cevi. Dele modifciranih cevi pa se v laboratoriju uporablja za izdelavo akumulatorjev. Tem celicam pravimo »swageloki«. Priročni so, ker se jih da relativno enostavno sestaviti, po uporabi razstaviti ter kasneje znova uporabiti. Problem nastane, če katera od komponent akumulatorja ni kompatibilna z ogrodjem celice, ki je običajno iz jekla. Celica (slika 23) je sestavljena iz treh delov: osrednjega z navojem na vsaki strani in dveh batov. Slednja vstavimo v osrednji del, po končanem sestavljanju pa s tesnili neprodušno zapremo akumulator.



Slika 23: »Swagelok« celica

3.3.2 »Coffee bag« celice

»Coffee bag« celice se izdelujejo iz neprepustne folije, iz katere so izdelane vrečke za kavo, od tod tudi njihovo ime. »Coffee bag« celico pred sestavljanjem pripravimo tako, da iz velikih kolutov folije izrežemo manjše pravokotnike, v našem primeru dimenzij 7 x 14 cm. Na daljši rob se nato nalepi še dva dodatna lističa drugačnih folij. Prvi je trak, ki se pri varjenju stali in zagotovi tesnjenje; črni trak, ki ga vidimo na sliki 24, pa služi samo za pritrditev prvega traku. Predpriprava se zaključi, ko tokovna nosilca zavarimo med plasti folij. Potem se celice prenese v suho komoro, kjer se sestava nadaljuje. Tam med tokovna nosilca vstavimo katodo, separator z elektrolitom in anodo, nato pa vse skupaj v vakuumskem aparatu zavarimo in znotraj celice ustvarimo vakuum. Prednost teh celic je, da se lahko v njih sestavi več različnih akumulatorjev kot v swagelokih. Slabost pa predstavlja zamudno sestavljanje in morebitno izhlapevanje elektrolita pri vakuumiranju.



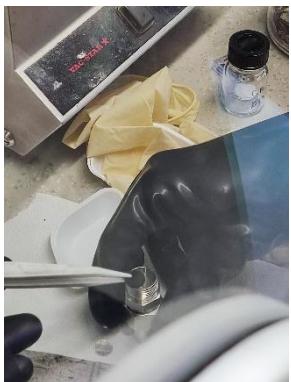
Slika 24: »Coffee bag« celici

3.4 Sestava celic

3.4.1 Litij

Litijeve akumulatorske sisteme smo izdelovali v suhi komori v »swagelok« celicah. V teh je sestava bistveno preprostejša in celica ni izpostavljena dodatnemu segrevanju ter vakuumiranju, torej elektrolit ne more izhlapeti.

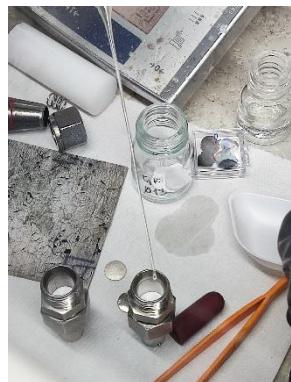
Izmed predpripravljenih organskih katod smo izbrali eno in jo stehtali. Nato smo jo vstavili v »swagelok« celico (slika 25) in nanjo položili separator (slika 26). Pomembno je, da je organska katoda dobro centrirana in popolnoma prekrita s separatorjem. Nato smo separator omočili z elektrolitom (slika 27). S škarjami smo odrezali kos litija za anodo in ga dodatno stanjšali z valjanjem po obeh straneh. S tem smo odstranili pasivno plast, ki se je na litiju nabrala med hranjenjem v suhi komori. Ta namreč vsebuje zelo majhne deleže drugih plinov, ki onesnažijo litij. Litij smo izsekali s posebnim sekačem in ga položili na z elektrolitom omočeni separator. Na litij smo postavili disk iz nerjavečega jekla, ki preprečuje kratki stik v akumulatorju, saj bi ga vzmet, ki zagotavlja dober kontakt, lahko predrla. Hkrati jekleni disk omogoča enakomerni pritisk na litijevo anodo, litij je namreč izjemno mehka kovina. Nato smo vse skupaj zaprli. V suhi komori smo izmerili tudi napetost akumulatorja pri odprtih zanki, da smo preverili, če napetost približno ustreza pričakovani. Če napetost ne bi ustrezzala pričakovani, bi bilo z akumulatorjem nekaj narobe med sestavljanjem, najbrž bi prišlo do kratkega stika in posledično izpraznitve baterije.



Slika 25: Polaganje elektrode v »swagelok«



Slika 26: Polaganje separatorja v »swagelok«



Slika 27: Omakanje separatorja z elektrolitom

3.4.2 Cink

Postopek sestave je precej podoben sestavljanju litijevih »swagelokov«, vendar jih ni treba sestavljati v suhi komori, saj cink ne reagira z zrakom. Na dno ravno tako položimo stehtano elektrodo, nanjo separator in nato cink ter disk iz nerjavečega jekla.

3.4.3 Aluminij

Aluminijeve celice smo izdelovali v »coffee bagih«, ker so aluminijevi elektroliti zelo korozivni, in tako ne moremo uporabiti jeklenih »swagelok« celic. »Coffee bag« celice imajo debel sloj plastike PE, ki preprečuje korozijo.

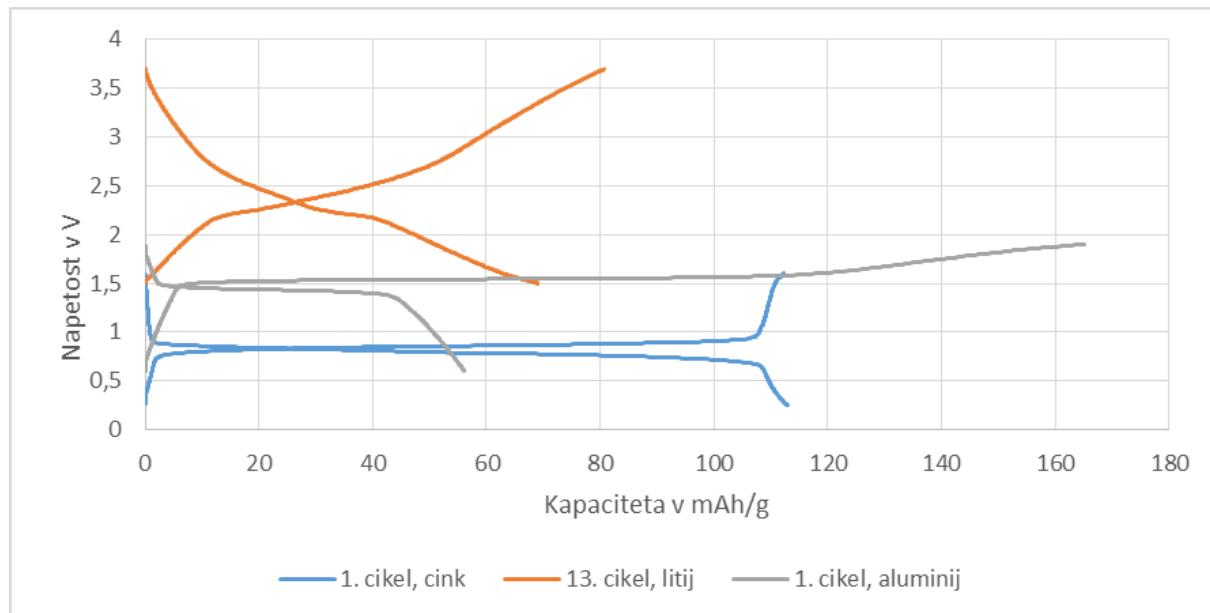
Na eno stran separatorja smo položili stehtano elektrodo, nanjo separator z elektrolitom in na to aluminij. Vse skupaj smo vstavili v »coffee bag« celico med dva molibdenova tokovna nosilca. Paziti je bilo treba, da sta bila tako elektroda kot aluminij v stiku s tokovnim nosilcem. To je zelo težko doseči, potrebna sta nekaj spretnosti ter čas. Nato smo vse skupaj vstavili v vakuumski aparat in zavarili. Na koncu smo preverili napetost, če je ta skladna s pričakovano.

3.5 Testiranje celic

Ko smo pripravili vse celice, smo njihovo delovanje testirali z galvanostatskim polnjenjem in praznjenjem. To pomeni, da smo pri konstantnem toku praznili do spodnje napetostne meje in jih nato polnili do zgornje napetostne meje ter ugotavljali spremembe. Poskuse smo izvedli na lažjih elektrodah (4 mg) in težjih elektrodah (8 mg). Rezultati se nanašajo le na katode. Anode so bile v presežku in smo predpostavljali, da delujejo idealno.

4. Rezultati

4.1 Celice z menadionom



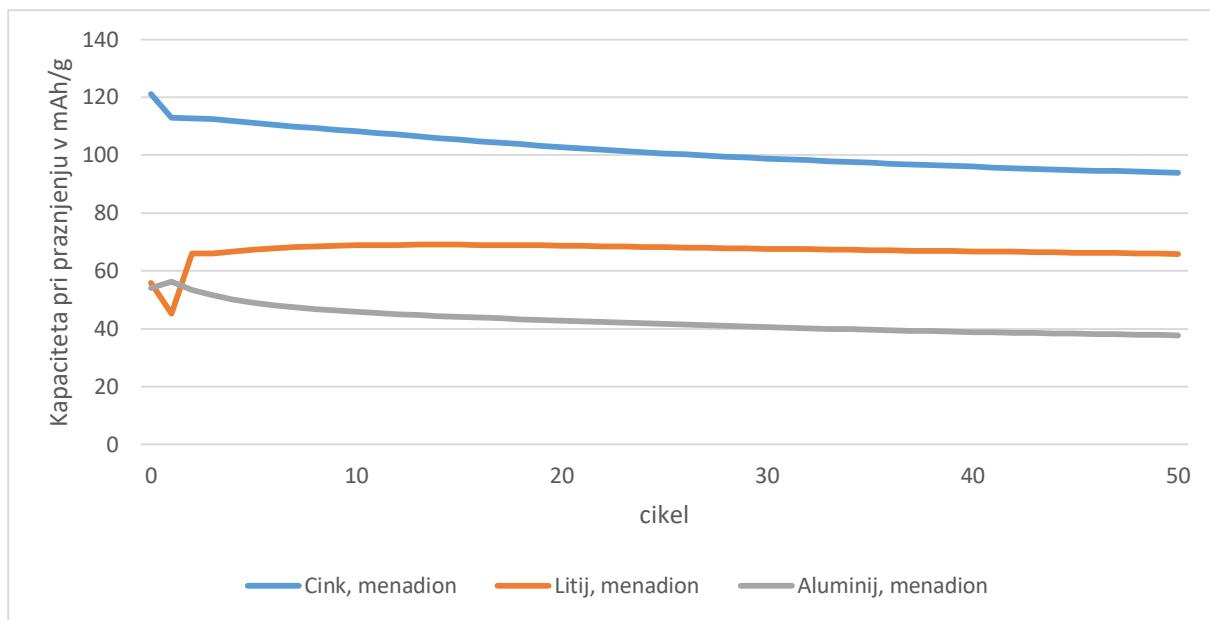
Graf 1: Napetost menadionovih celic v odvisnosti od njihove kapacitete

Graf 1 prikazuje napetost najboljšega cikla menadionovih celic v odvisnosti od njihove kapacitete. Napetost pri praznjenju pada in pri polnjenju narašča. Krivulja praznjenja je tista, ki se začne v levem zgornjem kotu, krivulja polnjenja pa ima začetek v levem spodnjem kotu. Kapaciteto predstavlja plato na grafu. Večji je plato, večja je kapaciteta. Vmesne vrednosti kapacitete pa predstavljajo, koliko naboja je iz akumulatorja že iztekel oziroma koliko ga je vanj priteklo. Strmina na začetku in koncu obeh krivulj je kondenzatorski učinek katode – na površini materiala se naberejo elektroni, za nadaljnjo raziskavo pa so dejansko pomembni položnejši deli, imenovani tudi napetostni platoji. Tam poteka elektrokemijska reakcija, ko elektroni prehajajo na molekule elektrode.

Cinkova celica ima od vseh najnižjo platojsko napetost, in sicer 0,85 V, ta je podobna napetosti, ki nam jo pove redoks vrsta. Plato je zelo lepo definiran.

Litijeva celica ima najvišjo platojsko napetost, okoli 2,30 V, vendar je plato slabše definiran.

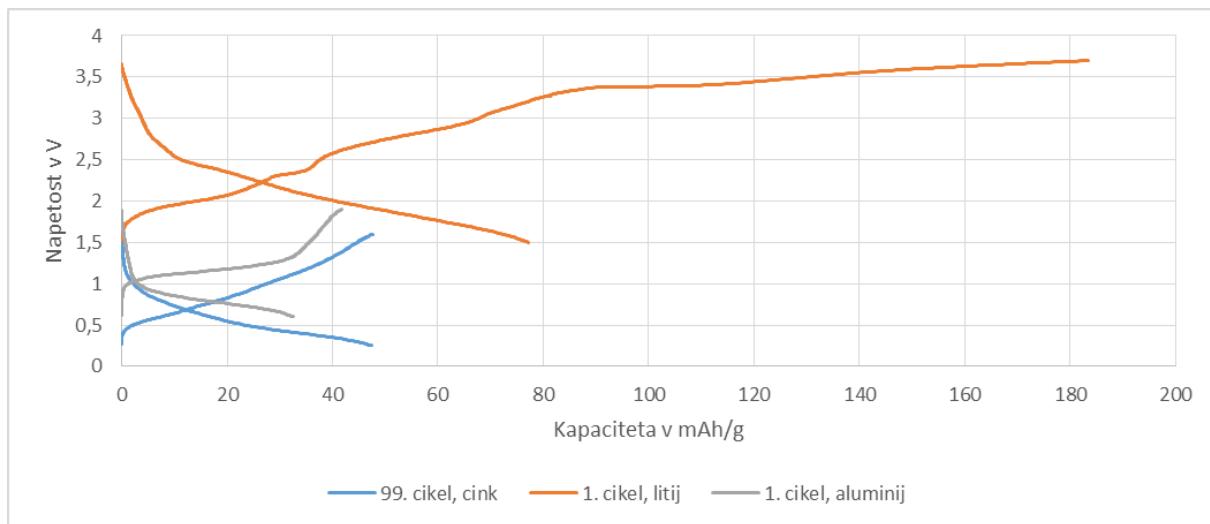
Aluminijeva celica ima platojsko napetost približno 1,45 V. Plato je slabše definiran kot pri cinkovi, a bolje kot pri litiji.



Graf 2: Kapaciteta pri praznjenju menadionovih celic v odvisnosti od števila ciklov

Na grafu 2 je prikazana kapaciteta celic pri praznjenju v odvisnosti od števila ciklov za menadionove celice. Cinkova celica ima največjo kapaciteto (121,0 mAh/g), ki s cikli počasi pada. Pri 50. ciklu je kapaciteta 93,9 mAh/g. Stabilnost celice s cikli je razmeroma dobra. Konkretno manjšo kapaciteto, le 69,0 mAh/g, ima litijeva celica. V prvih nekaj ciklih kapaciteta niha. Stanje se v naslednjih ciklih izboljša, kapaciteta pa se bistveno ne spreminja. Najmanjšo kapaciteto ima aluminijeva celica, samo 56,2 mAh/g. Enako kot pri litiju je v prvih ciklih prisotna ireverzibilnost, nato pa kapaciteta pada počasneje, do 50. cikla na 37,8 mAh/g.

4.2 Celice z alizarinom



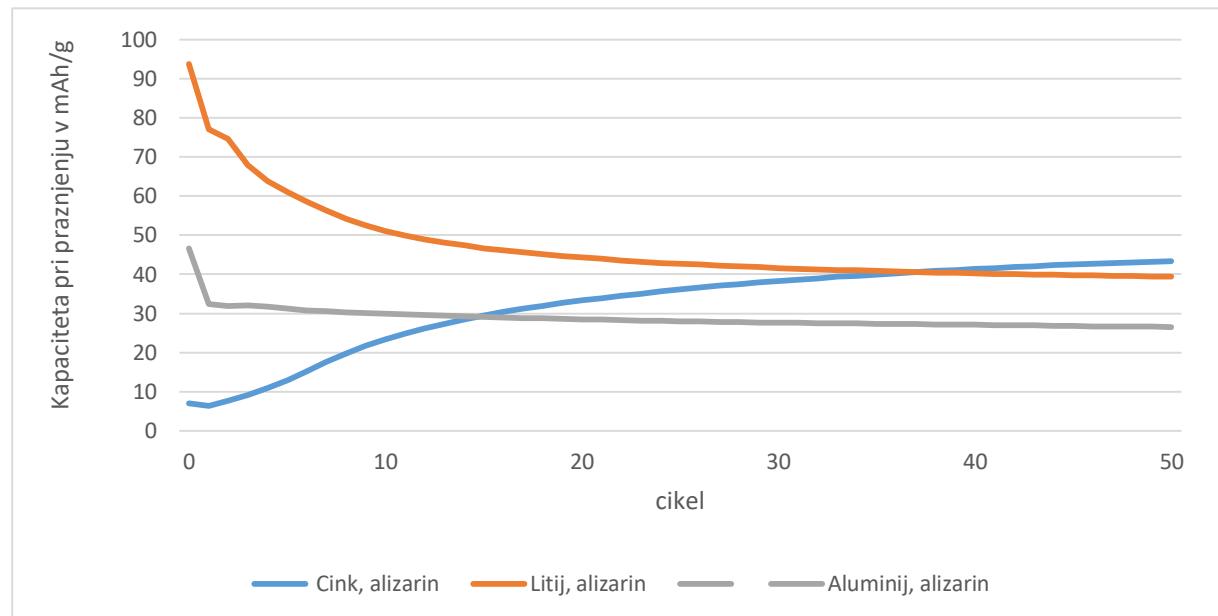
Graf 3: Napetost alizarinovih celic v odvisnosti od njihove kapacitete

Na grafu 3 je prikazana napetost najboljšega cikla celic z alizarinom v odvisnosti od njihove kapacitete.

Cinkova celica ima od vseh najnižjo platojsko napetost, in sicer približno 0,70 V. Plato je slabše definiran.

Litijeva celica ima najvišjo platojsko napetost, okoli 2,30 V, sicer je plato slabo definiran.

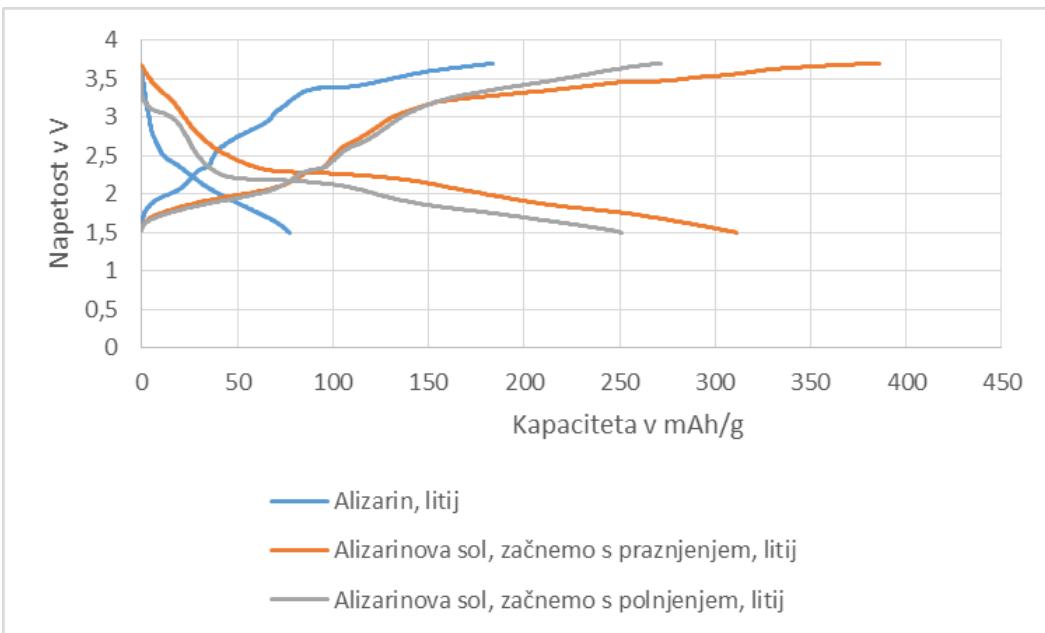
Aluminijeva celica ima platojsko napetost približno 1,10 V. Plato je tudi tukaj slabo definiran.



Graf 4: Kapaciteta pri praznjenju alizarinovih celic v odvisnosti od števila ciklov

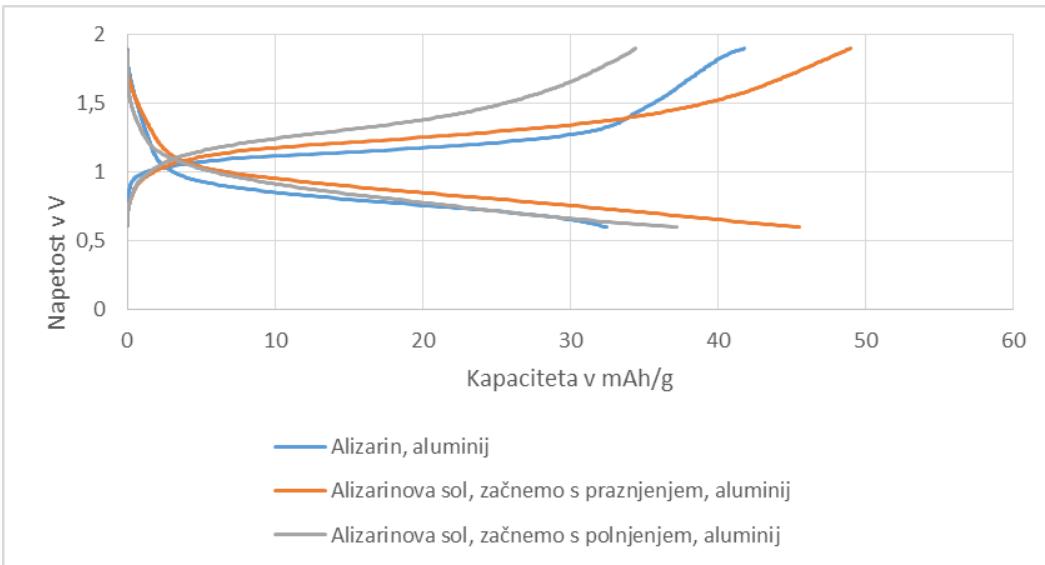
Na grafu 4 je prikazana kapaciteta alizarinovih celic pri praznjenju v odvisnosti od števila ciklov. Litijeva celica ima največjo kapaciteto (93,8 mAh/g), ki pa predvsem s prvimi 10 cikli močno upada. Do 50. cikla pada samo na skromnih 39,4 mAh/g. Obratno je pri cinkovi celici. V prvih nekaj ciklih je kapaciteta zelo nizka (6,4 mAh/g), vendar potem narašča (do 50. cikla kar na 47,5 mAh/g). Aluminijeva celica se je odrezala slabše kot drugi dve, njena kapaciteta je zelo nizka (največja je pri 1. ciklu, znaša 46,6 mAh/g) in upada s cikli (do 50. cikla na 26,6 mAh/g).

4.3 Celice z alizarinovo soljo



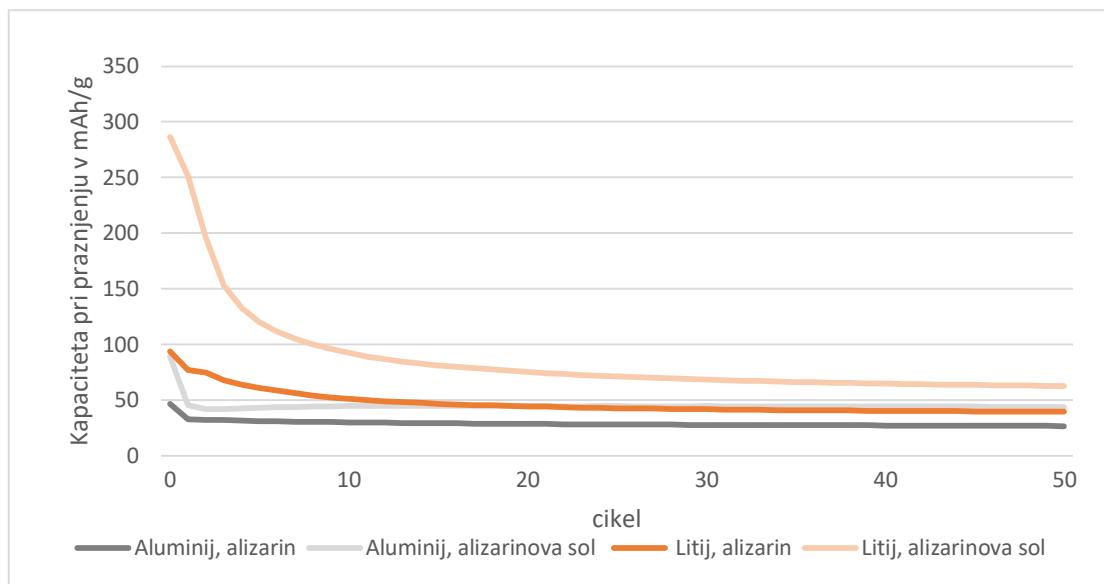
Graf 5: Napetost litijevih celic z alizarinom/alizarinovo soljo v odvisnosti od njihove kapacitete

Graf 5 prikazuje napetost najboljšega cikla v odvisnosti od kapacitete pri celicah z litijem in alizarinom ali alizarinovo soljo. Platoji so slabo definirani, vendar bolje pri celicah z alizarinovo soljo. Kapaciteta celice, ki jo začnemo najprej prazniti, je v prvih nekaj ciklih večja od kapacitete celice, kjer smo najprej začeli s polnjenjem, vendar se stanje z večjim številom ciklov obrne.



Graf 6: Napetost aluminijevih celic z alizarinom/alizarinovo soljo v odvisnosti od njihove kapacitete

Graf 6 prikazuje napetost najboljšega cikla v odvisnosti od kapacitete za aluminijeve celice z alizarinom ali alizarinovo soljo. Alizarinova sol se je spet odrezala bolje, saj je plato lepše definiran in celici imata večjo kapaciteto. Celica deluje rahlo bolje, če jo najprej začnemo prazniti.

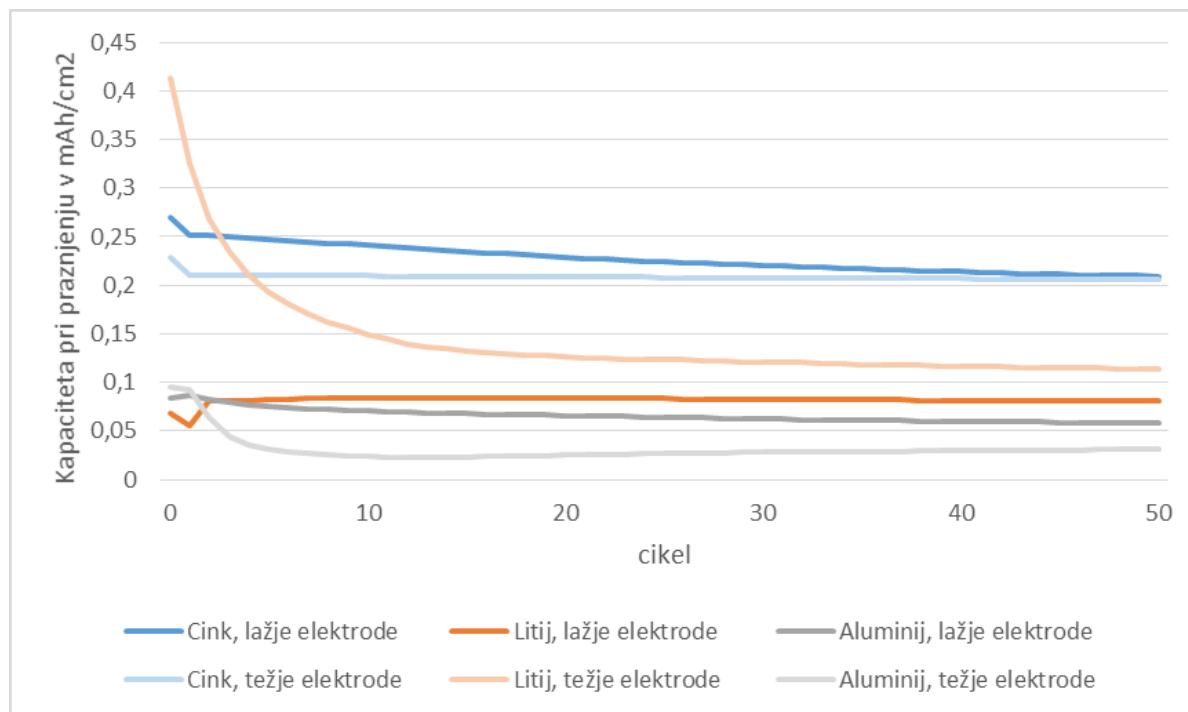


Graf 7: Kapaciteta pri praznjenju litijevih in aluminijevih celic z alizarinom/alizarinovo soljo v odvisnosti od števila ciklov

Graf 7 prikazuje kapacitete pri praznjenju v odvisnosti od števila ciklov. Pri alizarinovi soli smo vzeli vrednosti kapacitet za celice, ki so boljše delovale, torej smo pri litiju vzeli vrednosti za tisto celico, pri kateri smo začeli s polnjenjem, pri aluminiju pa obratno. Graf potrjuje dvig kapacitete pri uporabi alizarinove soli, še posebej v prvih ciklih. Pri obeh celicah z alizarinovo soljo kapaciteta na začetku močno pade, nato pa se stanje stabilizira in kapaciteta pada manj.

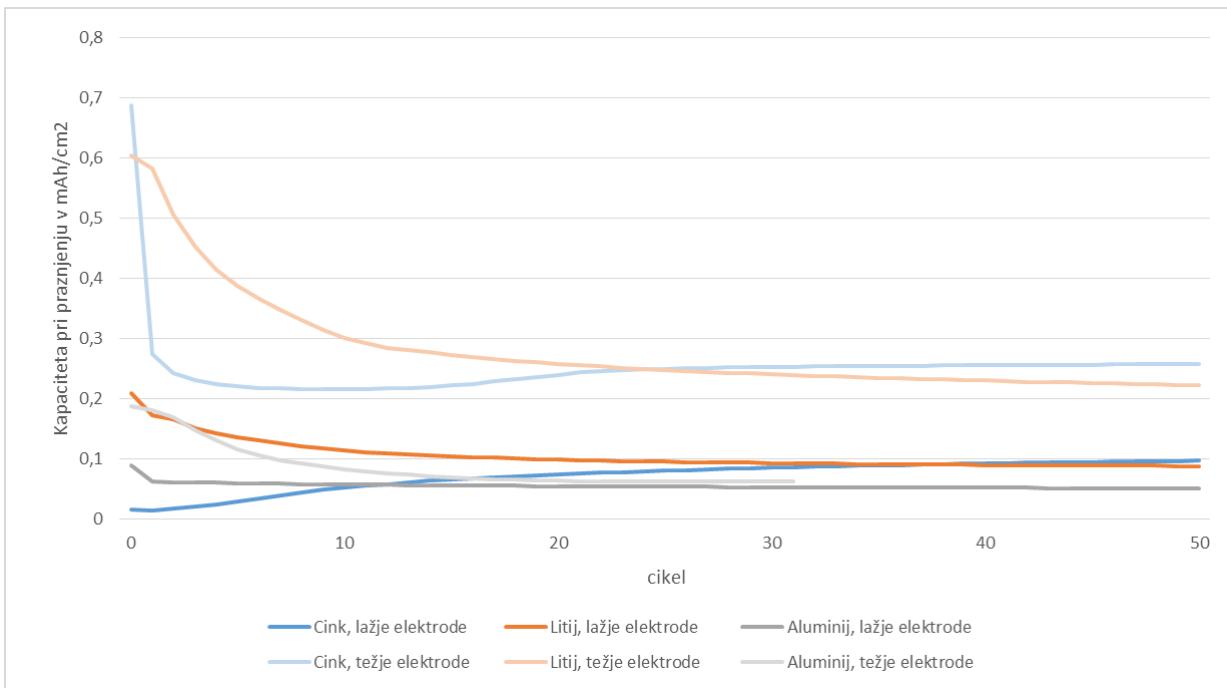
4.4 Primerjava celic glede na maso elektrod

Celice smo želeli primerjati tudi glede na maso aktivnega materiala, zato smo uporabili 8 mg elektrode. Zavedamo se, da so praktične kapacitete v Li-ion akumulatorjih 1–3 mAh/cm², česar mi z našimi elektrodami nismo dosegli, vendar nas kljub vsemu zanima vpliv povečanja količine aktivnega materiala v naših elektrodah.



Graf 8: Kapaciteta pri praznjenju menadionovih celic z različnimi masami glede na površino elektrod v odvisnosti od števila ciklov

Graf 8 prikazuje kapaciteto celic z menadionom pri praznjenju glede na površino elektrod v odvisnosti od števila ciklov. Kapaciteti sta pri cinku približno enaki. Tista z večjo maso ima na začetku malenkost manjšo kapaciteto, ki pa s cikli pada manj kot pri lažji elektrodi, torej je tista z večjo maso bolj stabilna. Litijeva celica z večjo maso ima večjo kapaciteto, ki v prvih ciklih močno pada. Aluminijeva celica z večjo maso ima nižjo kapaciteto, ki v poznejših ciklih rahlo narašča. Celice s težjimi elektrodami imajo sicer nižjo gravimetrično specifično kapaciteto, izjema je le nekaj prvih ciklov pri litijevi celici. Ker so dvakrat težje, bi morale za večjo gravimetrično specifično kapaciteto imeti več kot dvakrat večjo kapaciteto na površino.



Graf 9: Kapaciteta pri praznjenju alizarinovih celic z različnimi masami glede na površino elektrod v odvisnosti od števila ciklov

Graf 9 prikazuje kapaciteto celic z alizarinom pri praznjenju glede na površino elektrod v odvisnosti od števila ciklov. Kapacitete pri težjih elektrodah so bile v tem primeru povsod večje. Pri cinkovi celici je opazna velika irreverzibilnost v prvih ciklih, ki se pozneje izboljša. Rahla irreverzibilnost je prisotna tudi v začetnih ciklih pri aluminijevi celici. Po 30. ciklu smo imeli pri aluminijevi celici težave z dendriti in kratkimi stiki, zato smo morali tiste vrednosti zavreči, saj niso bile več relevantne. Največjo kapaciteto ima litijeva celica z večjo maso. V prvih 10. ciklih sicer kapaciteta močno upada, pozneje pa bistveno manj. Celice s težjimi elektrodami imajo višjo gravimetrično specifično kapaciteto, izjema je le aluminijeva celica. Litijeva in cinkova celica imata namreč več kot dvakrat večjo kapaciteto glede na površino kot celici z lažjimi elektrodami. Veliko boljše delovanje težjih elektrod je povezano s topnostjo alizarina, saj se pri večjih masah raztopi manjši delež slednjega.

4.5 Kapacitete, napetosti in energijske gostote celic

Tabela 1: Delovna in teoretična kapaciteta, izkoristek slednje, platojska napetost in teoretična energijska gostota menadionovih celic

	Največja delovna kapaciteta (mAh/g)	Teoretična kapaciteta (mAh/g)	Platojska napetost (V)	Delež izkoriščene teoretične kapacitete	Teoretična energijska gostota (Wh/kg)
Cink	121,0	311	0,85	39 %	264
Litij	69,0	311	2,30	22 %	715
Aluminij	56,2	311	1,45	18 %	451

Tabela 2: Delovna in teoretična kapaciteta, izkoristek slednje, platojska napetost in teoretična energijska gostota alizarinovih celic

	Največja delovna kapaciteta (mAh/g)	Teoretična kapaciteta (mAh/g)	Platojska napetost (V)	Delež izkoriščene teoretične kapacitete	Teoretična energijska gostota (Wh/kg)
Cink	47,5	446	0,70	11 %	312
Litij	93,8	446	2,30	21 %	1026
Aluminij	46,6	446	1,10	10 %	491

Tabeli 1 in 2 prikazujeta kapacitete, platojske napetosti, teoretične energijske gostote ter deleže izkoriščenih teoretičnih kapacitet posameznih celic za njihov najboljši cikel. Merili smo samo kapacitete katod in ne celotnih celic, saj so bile anode v presežku. Za anode smo predpostavili, da delujejo idealno.

Alizarinova katoda ima bistveno večjo teoretično kapaciteto kot menadionova. V praksi pa temu ni tako. Alizarinova katoda ima večjo delovno kapaciteto le v kombinaciji z litijevo anodo. V kombinaciji s cinkom in z aluminijem pa ima manjši kapaciteti. Najbolje sta se odrezali menadionova katoda v kombinaciji s cinkovo anodo ter alizarinova katoda v kombinaciji z litijevo anodo. Boljše delovanje menadionovih katod potrjujejo tudi deleži izkoriščene teoretične kapacitete, ki so pri njih bistveno višji kot pri alizarinovih. Tudi napetosti so večje pri menadionovih celicah, razen pri litiju, pri katerem sta enaki.

Primerjali smo tudi teoretične energijske gostote katod z energijskimi gostotami katod Li-ionskih baterij.

Maksimalna energijska gostota katod Li-ionskih baterij znaša 800 Wh/kg (Eshetu, idr., 2021). Iz tabele je razvidno, da je teoretična energijska gostota naših katod manjša kot energijska gostota katod Li-ionskih baterij. Izjema so katode v alizarinovih celicah z litijem. Energijska gostota je sorazmerna z napetostjo, zato so energijske gostote v skladu z redoks vrsto. Naše teoretične energijske gostote katod so primerljive z energijskimi gostotami katod Li-ionskih baterij, vendar naše celice v praksi ne dosežejo takih številk in so veliko slabše.

5. Zaključki

V raziskavi smo primerjali akumulatorje z različnimi kovinskimi anodami in različnima organskima katodama glede na njihove fizikalno-kemijske lastnosti. Zanimali so nas napetosti akumulatorjev, njihova kapaciteta in spremenjanje teh lastnosti glede na maso aktivnega materiala. Spodaj zbrani rezultati so povzetek celotne raziskave, ki preko hipotez ovrednoti delovanje kovinsko-organskih akumulatorjev.

Organske spojine lahko uporabimo kot katode v kombinaciji z različnimi kovinskimi anodami (litijeva, aluminijeva, cinkova).

To sklepamo na podlagi dejstva, da obstaja že veliko primarnih in sekundarnih baterij, ki uporablajo organsko katodo. Prav tako poteka veliko raziskav, povezanih z njimi.

Hipoteza je potrjena. Celice so v vseh kombinacijah delovale. Je pa res, da so bile njihove kapacitete daleč od teoretičnih, izkoristki so bili namreč okoli 20 %. Takšne kapacitete so v primerjavi s kapacitetami komercialnih celic neuporabne. Prav tako smo se predvsem v prvih nekaj ciklih soočali s problemom močnega upadanja kapacitete ter problemom irreverzibilnosti.

Napetosti celic bodo različne glede na uporabljeno anodo ter njeni mesto v redoks vrsti.

Na podlagi tega bo litijeva celica imela največjo napetost, najmanjšo pa cink. Elektrodní potencial slednjega znaša namreč $-0,76\text{ V}$, aluminija $-1,66\text{ V}$, litija pa kar $-3,04\text{ V}$.

Hipoteza je potrjena. Napetosti so pri vseh tipih celic ne glede na mase skladne z redoks vrsto. Litij ima največjo napetost, sledita mu aluminij in nato cink.

Akumulatorski sistemi z alizarinom bodo imeli večjo kapaciteto kakor akumulatorski sistemi z menadionom.

To smo predvidevali zaradi možnosti izmenjave štirih elektronov pri alizarinu, medtem ko lahko menadion izmenja samo dva.

Hipoteza je ovržena. Menadionovi akumulatorski sistemi imajo pri vseh kombinacijah, razen pri litiju, večjo kapaciteto.

Kapacitete posameznega materiala v različnih akumulatorskih sistemih bodo podobne.

Hipoteza je ovržena. Med različnimi akumulatorskimi sistemi posameznega materiala so bile velike razlike, še posebej pri menadionu. To je verjetno povezano z različnimi elektroliti ter tudi z razliko v valenci kationov.

Elektrode z večjimi masami aktivnega materiala bodo imele večjo kapaciteto glede na površino elektrode, vendar manjšo gravimetrično specifično kapaciteto.

Predvidevali smo, da bo kapaciteta glede na površino elektrode večja, saj smo uporabili več aktivnega materiala, ki pa ne bo tako dobro izkoriščen kot pri elektrodah z manjšimi masami.

Hipoteza je potrjena. Kapacitete, izmerjene glede na površino katod, so bile pri vseh akumulatorskih sistemih s težjimi elektrodami, razen pri aluminijevemu ter cinkovemu sistemu z menadionom, večje od tistih pri celicah z manjšimi masami elektrod. Gravimetrična specifična kapaciteta je povsod pri težjih elektrodah, razen pri litiju in cinku z alizarinom, manjša kot pri lažjih elektrodah. Zato je hipoteza potrjena.

Takšna raziskava predstavlja zanimivo možno pot razvoja akumulatorjev, saj cink in aluminij omogočata uporabo kovinskih anod, organske katode pa so okolju prijaznejše kot trenutno

razširjene anorganske, hkrati pa so teoretično zelo obetavne. Hipotetični koraki za prihodnost bi lahko bili iskanje novih, potencialno še boljših organskih materialov, ki pa ne bi imeli težav z dendriti, topnostjo v elektrolitu in hitrim padanjem kapacitete. V primeru nadaljnega razvijanja te raziskovalne naloge bi razvili kombinacije kovinskih anod z najbolj optimalnimi organskimi katodami in jih preizkusili v praksi ter odpravljali morebitne težave. Ta in podobne raziskave imajo velik pomen za prihodnost, saj bomo brez učinkovitejših baterij res težko v celoti prišli do brezogljične družbe.

6. Viri in literatura

A Guide to Wild Madder Extract. (b. d.). Pridobljeno iz Shepherd Textiles:
<https://shepherdtextiles.com/guides/wild-madder-extract>

Alizarin. (b. d.). Pridobljeno iz PubChem:
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Alizarin>

Bhosale, M. E., Chae, S., Kim, J. M. in Choi, J. Y (14. september 2018). *Organic small molecules and polymers as an electrode material for rechargeable lithium ion batteries.* Pridobljeno iz Royal Society of Chemistry:
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ta/c8ta04906h>

Bitenc, J. (oktober 2016). Materiali za magnezijeve akumulatorje [Doktorska disertacija].
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo.

De Souza, A. S., Ribeiro, R. C., Costa, D. C., Pauli, F. P., Pinho, D. R., De Moraes, M. G., . . . in Ferreira, V. F. (11. april 2022). *Menadione: a platform and a target to valuable compounds synthesis.* Pridobljeno iz National Library of Medicine:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9039524/>

Dominko, R. (2002). *Karakterizacija novih kompozitnih elektrod za litijeve ionske akumulatorje [Doktorska disertacija].* Ljubljana.

Elia, G. A., Kravchyk, K. V., V., K. M., Chacón, J., Holland, A. in Wills, R. G. (1. januar 2021). *An overview and prospective on Al and Al-ion battery technologies.* Pridobljeno iz Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775320311745>

Eshetu, G. G., Zhang, H., Judez, X., Adenusi, H., Armand, M., in Passerini, S. i. (15. september 2021). *Production of high-energy Li-ion batteries comprising silicon-containing anodes and insertion-type cathodes.* Pridobljeno iz nature communications: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-25334-8>

How do Lithium Batteries Work? (b. d.). Pridobljeno iz Battery University:
<https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>

How does Electrolyte Work? (25. oktober 2021). Pridobljeno iz Battery University:
<https://batteryuniversity.com/article/bu-307-how-does-electrolyte-work>

Kritične surovine za strateške tehnologije in sektorje v EU - Študija o predodločitvi. (2. september 2020). Pridobljeno iz European Comission:
<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>

Linden, D. R. (2002). *Handbook of batteries (Third edition).* New York: McGraw – Hill.

Lower, S. (1. marec 2022). *Galvanic cells and Electrodes.* Pridobljeno iz Libre Texts Chemistry:
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_Chem1_\(Lower\)/16%3A_Electrochemistry/16.02%3A_Galvanic_cells_and_Electrodes](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_Chem1_(Lower)/16%3A_Electrochemistry/16.02%3A_Galvanic_cells_and_Electrodes)

Menadione. (b. d.). Pridobljeno iz DrugBank: <https://go.drugbank.com/drugs/DB00170>

Sources, E. o. (24. 9. 2022). *ScienceDirect.* Pridobljeno iz Primary Battery:
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/primary-battery>

Vpliv na okolje. (b. d.). Pridobljeno iz ZEOS: <https://e-odpadki.zeos.si/sl/stari-aparati/vpliv-na-okolje.html>

What are zinc-carbon batteries? (1. junij 2020). Pridobljeno iz Battery Guy:
<https://batteryguy.com/kb/knowledge-base/what-are-zinc-carbon-batteries/>

Wood, J. (b. d.). *Batteries are a key part of the energy transition. Here's why.* Pridobljeno iz World Economic Forum: <https://www.weforum.org/agenda/2021/09/batteries-lithium-ion-energy-storage-circular-economy/>

6.1 Viri slik

Alizarin. (b. d.). Pridobljeno iz PubChem:

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Alizarin>

Huš, M. (26. avgust 2014). *Litij, ki poganja mobilni svet.* Pridobljeno iz Monitor:
<https://www.monitor.si/clanek/litij-ki-poganja-mobilni-svet/159566/>

Menadione. (b. d.). Pridobljeno iz DrugBank: <https://go.drugbank.com/drugs/DB00170>

Štirn, S. (b. d.). *Baterije - e-učna enota.* Pridobljeno iz Napredne učne kocke:
<http://www.nauk.si/materials/6893/out/index.html#state=1>

Vidmar, M. (12. december 2020). *Galvanski člen.* Pridobljeno iz Arnes:
https://h5p.splet.arnes.si/2020/12/12/galvanski-clen_vidmar/

Wogan, T. (7. april 2015). *Super-fast charging aluminium batteries ready to take on lithium.* Pridobljeno iz Chemistry World: <https://www.chemistryworld.com/news/super-fast-charging-aluminium-batteries-ready-to-take-on-lithium/8427.article>

Druge slike so iz lastnega arhiva.