

## **54. SREČANJE MLADIH RAZISKOVALCEV SLOVENIJE 2020**

### **ELEKTROKROMIZEM V DOMAČI KUHINJI**

**Raziskovalno področje:** Kemija in kemijska tehnologija

Raziskovalna naloga

**Šola:** Škofijska gimnazija Antona Martin Slomška, Maribor

**Avtorica:** Nika Fekonja

**Mentorji:** Andreja Navršnik Kačič, u. d. i. kem. teh., Martin Rozman, mag. kem., izr. prof.  
dr. Urban Bren

**Maribor, maj 2020**

## Kazalo vsebine

POVZETEK.....	5
ZAHVALA.....	6
1 UVOD.....	7
1.1 Namen raziskave.....	7
1.2 Hipoteze.....	7
1.3 Raziskovalna metoda.....	8
2 TEORETIČNO OZADJE.....	9
2.1 pH barvilo: Indikatorji.....	9
2.2 Črnilo.....	10
2.3 Natrijev acetat.....	11
2.3.1 Puferske lastnosti in natrijev acetat.....	11
2.4 Elektroliza.....	12
2.5 Galvanski člen.....	13
2.5.1 Razlika med galvanskim členom in elektrolizo.....	14
2.6 Elektrokromne naprave in tehnologija zaslonov.....	14
2.6.1 Elektrokromna vzvratna ogledala.....	14
2.6.2 Pametna okna.....	15
2.6.3 Elektrokromni zasloni (elektronsko črnilo).....	15
2.6.4 Druge naprave.....	16
2.7 UV-vis spektrofotometrija.....	16
2.8 Kronoamperometrija.....	17
3 MATERIALI IN METODE.....	18
3.1 Instrumenti.....	18
3.2 Materiali.....	18
3.3 Kemikalije.....	18
3.4 Metode.....	19
4 EKSPERIMENTALNI DEL.....	20
4.1 Postopki.....	21
4.1.1 Postopek priprave posameznih komponent.....	21
4.1.2 Postopek priprave elektrode.....	21
4.1.3 Postopek priprave elektrolita.....	21

4.1.4	Postopek priprave elektrokromnega barvila .....	22
4.1.5	Postopek priprave barvila – črnila .....	22
4.1.6	Postopek priprave končne elektrokromne celice .....	22
4.2	TESTIRANJE CELICE .....	24
4.2.1	Merjenje pH elektrolita.....	24
4.2.2	Priprava papirja.....	25
4.2.3	Nanos elektrolita in zapakiranje celice .....	25
4.2.4	Meritve transmissijske UV-Vis raztopin.....	25
4.2.5	Meritve kronoamperometrije z okometričnim opazovanjem .....	25
4.2.6	Meritve UV-Vis reflektančne spektroskopije.....	26
4.2.7	Združen eksperiment kronoamperometrija + UV-Vis reflektanca.....	26
5	REZULTATI.....	27
5.1	Rezultati priprave barvila.....	27
5.2	Rezultati UV-Vis transmisije .....	28
5.3	Rezultati izdelave celice .....	28
5.4	Rezultati kronoamperometrije .....	29
5.5	Rezultati UV-Vis reflektance.....	30
5.6	Rezultati kombiniranega eksperimenta.....	31
6	RAZPRAVA .....	33
7	IZVEDBENI PRIMERI – MENJAVANJE KOMPONENT .....	35
8	ZAKLJUČEK.....	38
9	BIBLIOGRAFIJA .....	39

## Kazalo slik

Slika 1:	Struktura indigo karmina v kislem in leuko-indigokarmina v bazičnem.....	11
Slika 2:	Elektroliza.....	13
Slika 3:	Galvanski člen.....	14
Slika 4:	Laboratorij.....	20
Slika 5 in 6:	Sestavljena celica in priprava natrijevega acetata.....	22
Slika 7:	Nanašanje barvila na papir. ....	23
Slika 8:	Izolirane palice iz alufolije.....	23

Slika 9 in 10: Skica sestavljene celice in sestavljena celica.....	24
Slika 11 in 12 : Sestavljena celica ob prvem priključku na pozitiven vir električne napetosti in sestavljena celica po drugem priključku na negativen vir električne napetosti. ....	27
Slika 13: Sestavljena celica in pojav mehurčkov po končanem barvanju.....	31
Slika 14: Raztopina črnila po dodatku NaOH in HCl. ....	33
Slika 15: Sestavljena celica s karijem. ....	35
Slika 16: Sestavljena celica s cimetom. ....	36
Slika 17: Sestavljena celica s tekočino za leče.....	36
Slika 18 in 19: Sestavljena celica z barvilom za barvanje pirhov po dodatku elektrolita, sprednja stran in zadnja stran. ....	37
Slika 20 in 21: Sestavljena celica z barvilom za barvanje pirhov po dodatku elektrolita, sprednja stran in zadnja stran. ....	37

## Kazalo grafov

<i>Graf 1 in 2: Predstavljena sta grafa UV-Vis transmisijske spektroskopije, graf črnila (levo) in indigo karmina (desno). Grafa predstavljata dve krivulji in sicer za kisle in bazične pogoje. Meritve so bile izedene v območju med 200 – 800 nm. ....</i>	28
<i>Graf 3: Graf kronoamperometričnih meritev. Graf prikazuje izvedene pulze pri različnih ciklih in sicer pri 1., 15., in 25. ....</i>	29
<i>Graf 4: Graf UV-Vis reflektance. Grafi predstavljajo podatke za kisle (rdeča) in bazične (modra) pogoje ter za sveže sestavljeno celico (črna). ....</i>	30
<i>Graf 5: Graf UV-Vis reflektance v odvisnosti od časa. ....</i>	31

## Kazalo tabel

Tabela 1: Najbolj znani indikatorji.....	9
--	---

## **POVZETEK**

Elektrokromizem je pojav, pri katerem gre za spremembo barve materiala pod električno napetostjo, kjer se le-ta po odklopu vira električne napetosti ohrani. Takšen material ob priklopu vira napetosti z nasprotnim predznakom dobi nazaj prvotno barvo materiala. Ta pojav je reverzibilen in ponovljiv. Elektrokromne naprave se uporabljajo kot elektronski bralniki, zatemnljiva ogledala in pametna okna.

Za potrebe sestave enostavne elektrokromne celice so avtorji preučili primer elektrokromne naprave, ki je sestavljena iz dveh neprosojnih elektrod, ločenih z izolatorjem, preko robov pa sta povezani z vodnim elektrolitom. Celotna naprava je vplaščena med dve stekli. Ko priklopimo vir napetosti, se barva naprave spremeni.

Cilj naloge je bil sestaviti napravo, s katero lahko demonstriramo, da je tudi z materiali doma mogoče izdelati elektronske komponente, ki spreminjajo barvo. Predstavljena naprava lahko prikazuje rumeno ali modro barvo, za spremembo pa potrebuje 45 s, barva pa je obstojna nekaj ur.

**Ključne besede:** elektrokromizem, elektrokromne naprave, reverzibilnost, črnilo, elektroliza

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorjem, ki so mi skozi celotno nalogo pomagali in me popeljali v svet kemije. Predvsem se zahvaljujem za čas, ki ste si ga vzeli in ga žrtvovali za mene ter mi pomagali priti do končnih ugotovitev in izdelka.

# 1 UVOD

Elektrokromnim materialom se spremeni svetlobna prepustnost ali sposobnost odboja svetlobe pod vplivom električne napetosti, kjer željena barva ostane tudi po odklopu iz električnega tokokroga. Poznamo tako organske kot tudi anorganske elektrokromne materiale, principi delovanja pa so lahko glede na izbrani material različni.

## 1.1 Namen raziskave

Namen raziskave je bil, da za izdelavo celice uporabimo komponente, ki jih najdemo doma, iz njih sestavimo novo elektrokromno celico ter demonstriramo, da je tudi z enostavnimi materiali mogoče izdelati enostavne elektronske komponente. Izkazalo se je, da lahko za takšno celico kot barvilo uporabimo črnilo nalivnika, za elektrode kot elektrolit pa lahko uporabimo mešanico kisa za vlaganje ter cevosan. Pričakujemo, da bo prišlo pri napravi do spremembe barve pod napetostjo, da bo imela reakcijski čas manj kot nekaj minut in da bo barva obstojna tudi po odklopu iz vira električne napetosti. Za samo osnovo poskusa bomo uporabili elektrokromno celico, predstavljeno v literaturi (Slovenija Št. patenta 201500168, 2017) (Rozman M. , Magistrsko delo, 2017).

## 1.2 Hipoteze

Kot najpomembnejši cilj smo si zadali, da bomo poiskali novo barvilo, ki bo obstojno ter bo pod vplivom napetosti lahko spremenilo barvo. Poleg iskanja optimalnega črnila smo iskali tudi ostale primerne komponente, kot so elektrode, papir in izolator, za le-te pa smo razvili ustrezne hipoteze, saj je bil cilj najti ustrezne komponente, ki bi lahko približale razvoj optoelektronskih naprav v srednje in osnovne šole.

Ko smo našli komponente z izbranimi karakteristikami, smo si zastavili naslednje hipoteze:

**Hipoteza 1:** Črnilo v napravi bo po dodanem napetostnem pulzu spremenilo svojo barvo.

**Hipoteza 2:** Barva črnila bo po spremembi napetosti zadostno obstojna.

**Hipoteza 3:** Črnilo se bo po dodanem napetostnem pulzu z nasprotnim predznakom napetosti vrnilo v prvotno barvo.

**Hipoteza 4:** Uporabimo lahko komponente, ki so cenejše in dostopnejše od obstoječih.

**Hipoteza 5:** Stare baterije lahko uporabimo za sestavo celice.

**Hipoteza 6:** Namočeni papir z elektrolitom, ki ga najdemo v kuhinji, zelo dobro prevaja električni tok.

**Hipoteza 7:** Nanos črnina na papir nima vpliva na kvaliteto delovanja celice.

**Hipoteza 8:** Za spremembo barve polariteta potenciala ni pomembna.

### **1.3 Raziskovalna metoda**

Predstavljena elektrokromna celica je bila narejena po postopkih, opisanih v različnih literaturah (Rozman, Lukšič, Gaberšček, & Jovanovič, 2017), (Rozman M. , Magistrsko delo, 2017), (Rozman, M., Gaberšček, M., Marolt, G., Bren, U., Lukšič, M., An Inverted Sandwich Electrochromic Device Architecture Does Not Require Optically Transparent Electrodes. *Adv. Mater. Technol.* 2019, 4, 1900389. <https://doi.org/10.1002/admt.201900389> ). Uporabili smo različne metode, tako elektrokemijske kot spektroskopske, prav tako pa smo opravljali enostavna optična opazovanja. Opazovanj smo se lotili postopoma, saj smo najprej poskusili najti ustrezno barvilo, ki se obnaša kot pH indikator ter je stabilno tako v kislih kot bazičnih pogojih. Po končanem iskanju ustreznega barvila smo se posvetili optimizaciji izgradnje elektrokromne celice, saj smo želeli, da le-ta vsebuje čimbolj cenene in lahko pridobljive komponente. Po končani optimizaciji celice smo se lotili karakterizacije le-te z različnimi raziskovalnimi metodami, kjer smo določevali elektrokemijske, spektroskopske in optične lastnosti sestavljenih celic.



## 2 TEORETIČNO OZADJE

### 2.1 pH barvilo: Indikatorji

Indikatorji so šibke kisline, ki dajo raztopini točno določeno barvo, po kateri lahko prepoznamo, ali gre za kislino ali bazo. Vsak indikator ima specifično barvo za kislo oziroma bazično okolje. Obstaja tudi univerzalni indikator, ki je kombinacija več indikatorjev skupaj in nam omogoča, da lahko izmerimo pH vrednost.

Spojine, ki spreminjajo barvo ob določenih pogojih, so kromoforji. Kromoforji ali kromoforne skupine so funkcionalne skupine, ki absorbirajo svetlobo in so sestavni del barvil. Barvila absorbirajo vidno svetlobo z valovno dolžino med 400 in 800 nm. Značilni deli kromofornih sistemov so skupine atomov s  $\pi$  vezmi.

Podzvrst kromoforjev so avksokromi (ang. auxochromes), katerih lep primer so pH indikatorji. Avksokromi ali avksokromne skupine lahko dodatno vplivajo na premik spektra absorbirane svetlobe, predvsem pa povzročijo večjo intenzivnost barve. Avksokromne skupine:  $-\text{COOH}$  (karboksilna skupina)  $-\text{OH}$  (hidroksilna skupina),  $-\text{NH}_2$  (aminoskupina), kjer sprememba pH vpliva na protonizacijo ali deprotonizacijo skupine, posledično pa to vpliva na verigo  $\pi$  vezi in posledično na absorbirano barvo (Brenčič Jurij, 1999).

Pogoji za spremembo barve so različni. To so lahko sprememba elektronske konfiguracije, redoks reakcije, dodatek ali primanjkljaj določene vrste ionov, temperatura. V kolikor je sprememba barve obstojna in pogojena z reverzibilno reakcijo, je indikator.

**Tabela 1: Najbolj znani indikatorji**

<b>INDIKATOR</b>	<b>pH – območje</b>	<b>BARVA INDIKATORJA V KISLEM</b>	<b>BARVA INDIKATORJA V BAZIČNEM</b>
METIL ORANŽ	3,1–4,4	RDEČ	RUMEN
FENOLFTALEIN	8,3–9,8	BREZBARVEN	VIJOLIČAST
INDIGO KARMIN	11,6–14,0	MODER	RUMEN
BROMTIMOL MODRO	6,0–7,6	RUMEN	MODER

LAKMUS	4,6–6,2	RDEČ	MODER
--------	---------	------	-------

V nalogi smo uporabili indikator fenoftalein, s katerim smo lahko določili ustrezno razmerje komponent za izdelavo elektrolita natrijeva acetata. Fenolftalein je indikator, ki razpada v bazičnem.

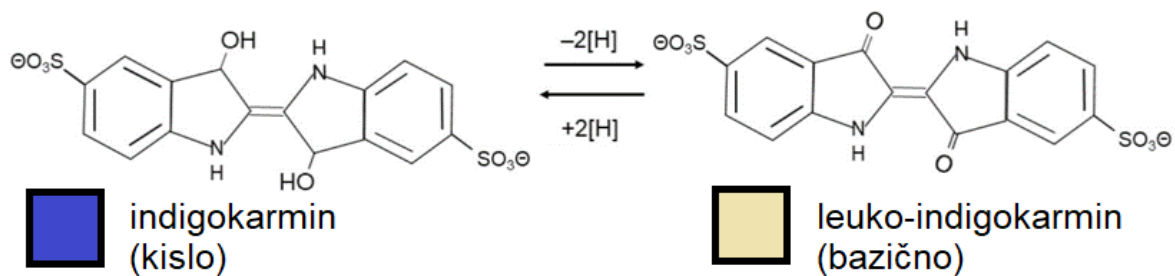
## 2.2 Črnilo

Črnilo, ki ga najdemo v nalivnem peresu, je sestavljeno iz različnih komponent in je obstojno. Eno izmed pomembnejših sestavin je barvilo indigo karmin (slika 1), ki mu daje modro barvo. Barvila so barvilne snovi, ki se na določen način vežejo na vlakna. Kemično so organske aromatske in heterociklične spojine. Vežejo se neposredno iz vodne raztopine, z raztopine baze ali soli, iz topila. S kuhanjem rdeče pese so pridobivali rdeče barvilo. Iz indigovca so pripravljali modro barvilo, imenovano indigo, ki se še dandanes nahaja v črnilih. V drugi polovici 19. stoletja so kemiki začeli barvila pridobivati s sintezo – sintetična barvila.

Indigo je najstarejše in zelo pomembno organsko barvilo. Sprva so ga pridobivali iz tropskih rastlin, ki vsebujejo glikozid indikan (*Indigofera tinctoria*, *Isatis tinctoria*). Kasneje so indigo začeli pridobivati predvsem iz aminobenzena. Med najpomembnejšimi redukcijskimi barvili je temno modri indigo, ki se nahaja v črnilu. Po redukciji nastane brezbarvna vodotopna levko oblika.

Črnilo najdemo v vseh kemičnih svinčnikih, nalivnih peresih, kartušah za printanje. Kemični svinčnik uporabljamo vsakodnevno in ga praktično najdemo skoraj vsepovsod. Črnilo je v kemičnih svinčnikih sestavljeno iz mastnih barvil, te so vezane na olein – maščobno kislino. Ta je brez barve, vonja in okusa ter ni topna v vodi.

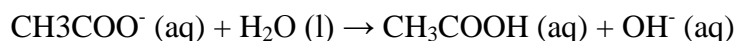
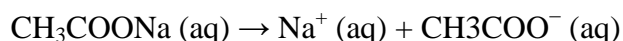
Indigo karmin je organska natrijeva sol, ki nastane zaradi kondenzacije indigo karmina z dvema ekvivalentoma natrijevega hidroksida. Je indikator pri pH 11,6–14, ki se spreminja iz modre v rumeno. Indikator indigo karmin je stabilen v kislem in bazičen. Ima vlogo barvila za živila, je histološko barvilo in dvobarvni indikator.



Slika 1: Struktura indigo karmina v kislem in leuko-indigokarmina v bazičnem.

## 2.3 Natrijev acetat

Natrijev acetat je brezbarvna bazična sol, ki nastane z reakcijo med šibko očetno kislino  $\text{CH}_3\text{COOH}$  in močnim natrijevim hidroksidom  $\text{NaOH}$ . pH raztopine je večji od 7.



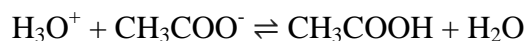
Natrijev acetat je zelo uporaben. Uporabljajo ga v tekstilni industriji za nevtralizacijo žveplove kisline. Prav tako se uporablja v predelavi bombaža za preprečevanje statične elektrike pri proizvodnji bombažnih blazinic. Kot tesnilo za vdor vode pri betonskih konstrukcijah se uporablja v gradbeništvu. Srečamo ga lahko tudi v hrani, kjer izboljšuje okus, na primer v čipsu, ki ima slano-kisel okus.

### 2.3.1 Puferske lastnosti in natrijev acetat

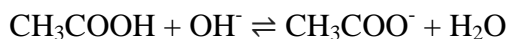
Pufri so raztopine, katerih pH se ob dodatku kislin ali baz le malo spremeni. Pufri torej uravnavajo kislost ali bazičnost raztopin. Za pufre uporabljamo raztopine zmesi šibkih kislin in njihovih soli v množinskem razmerju 1 : 1 (ali pa šibkih baz in njihovih soli).

Natrijev acetat je konjugirana baza očetne kisline in se v kombinaciji z očetno kislino uporablja kot puffer, ki da relativno konstantno vrednost pH. To je uporabno predvsem v biokemičnih aplikacijah, kjer so reakcije odvisne od pH v rahlo kislem območju (pH 4–6). Pufri imajo pomembno vlogo zlasti v bioloških sistemih (kri, želodčni sok, mlečna kislina v mišicah). (Brenčič Jurij, 1999)

Če raztopini očetne kisline in natrijevega acetata (molsko razmerje 1 : 1) v vodi dodajamo snovi, ki vsebujejo  $\text{H}_3\text{O}^+$  ione, se ti vežejo z acetatnimi ioni v slabo disociirano kislino.



Pri dodatku snovi, ki vsebujejo  $\text{OH}^-$  ione, le-ti reagirajo z očetno kislino.



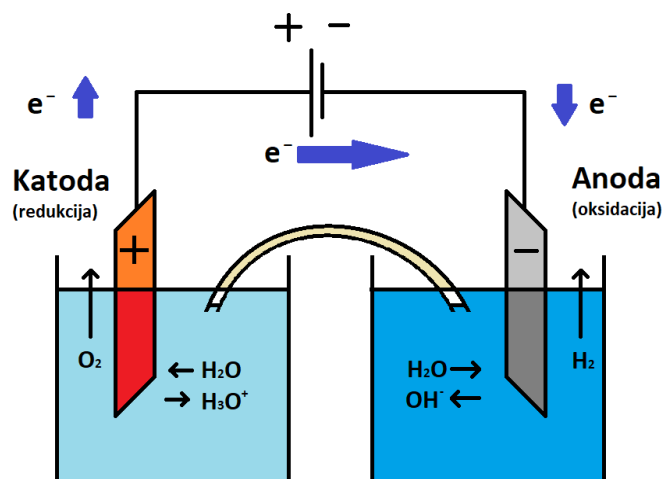
## 2.4 Elektroliza

Elektroliza je proces, pri katerem pride do razkroja snovi pod vplivom enosmernega električnega toka (slika 2). Poteka na površini elektrod, ki so potopljene v elektrolit. Pride do oksidacije oziroma redukcije. Pri elektrolizi se izločijo elementi ali spojine. Postopek ni uporaben za procesiranje tekočih organskih odpadkov ali viskozne katranske mase. Uporabnost omejujejo predvsem visoki stroški postopka.

V talini NaCl so prosto gibljivi ioni  $\text{Na}^+$  in  $\text{Cl}^-$ . Ko priključimo vir enosmerne napetosti na elektrode, se ioni začnejo gibati proti nasprotno nabitim elektrodam. Da pride na elektrodah tudi do izmenjave elektronov, je potrebna napetost, ki jo imenujemo razkrojna napetost.

Elektroliza se uporablja tudi za zaščito kovin. Ta postopek se imenuje galvanizacija. Prav tako je elektroliza glavna metoda za pridobivanje aluminija. S pridobivanjem aluminija se v Sloveniji ukvarja podjetje Talum.

Pri galvanizaciji nanašamo kovinsko plast ene kovine na predmet iz druge kovine z elektrolizo. Kovinski predmet, ki prevaja električni tok in ga želimo zaščititi, priključimo v elektrolitski celici kot negativno elektrodo – katodo. Kot anodo lahko uporabimo ustrezno kovino, ki se pri elektrolizi raztaplja in nato izloča na katodi. V kopeli morajo biti tudi razni dodatki, ki omogočajo enakomerno prevleko in lep sijaj prevleke.



Slika 2: Elektroliza je proces, kjer pride do razkroja snovi pod vplivom enosmernega električnega toka. Potekata oksidacija in redukcija.

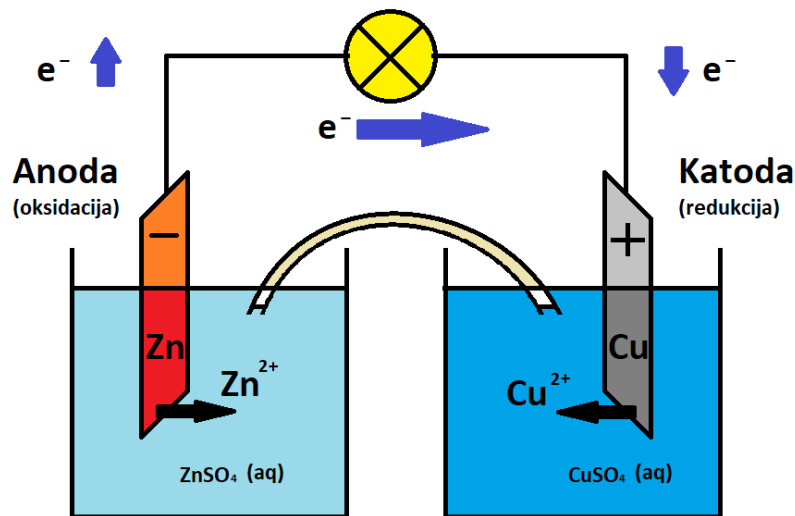
## 2.5 Galvanski člen

Galvanski člen je člen sistemov dveh polčlenov, v katerem poteka kemična reakcija oksidacije in redukcije (slika 3). V njem lahko hranimo električno energijo na daljši čas in jo lahko hitro in enostavno uporabimo. Med galvanske člene uvrščamo akumulatorje in baterije, ki jih priklopimo na enosmerno napetost.

Redoks reakcije potekajo v paru, istočasno potekajo redukcija in oksidacija. V galvanskem členu potečejo te reakcije spontano zaradi razlike v elektrodnem potencialu.

Polčlen je sestavljen iz kovine, ki je potopljena v raztopino soli. Raztopina soli je sestavljena iz pozitivno nabite katode in negativno nabite anode. Ker je katoda pozitivno nabita, je njen elektrodni potencial višji oziroma pozitivnejši kot od anode. Pozitivnejši elektrodni potencial pa pomeni, da ioni v takem elektrolitu radi sprejemajo elektrone in se pretvorijo v elementarno obliko. Na katodi torej poteka redukcija.

Anoda ima nižji elektrodni potencial. Negativnejši elektrodni potencial pomeni, da element odda elektrone in se pretvori v ionsko obliko. Na anodi poteka oksidacija.



Slika 3: Galvanski člen je člen sistemov dveh polčlenov, kjer poteka kemična reakcija oksidacije in redukcije.

### 2.5.1 Razlika med galvanskim členom in elektrolizo

- Galvanski člen je vir napetosti in daje električno energijo, medtem ko elektrolizna celica porablja električno energijo.
- Pri galvanskem členu in elektrolizni celici prihaja do pretvarjanje energije, in sicer v električno pri galvanskem členu in v kemijsko energijo v elektrolizni celici.

V galvanskem členu potekajo reakcije spontano, pri elektrolizi pa le tedaj, če je elektrolizna celica priključena na sam vir napetosti.

## 2.6 Elektrokromne naprave in tehnologija zaslonov

Področje uporabe elektrokromnih materialov se v zadnjih dvajsetih letih hitro večja. Uporabljajo se različni elektrokromni materiali – organski, anorganski, polimeri.

### 2.6.1 Elektrokromna vzvratna ogledala

Komercialno najuspešnejša so elektrokromna ogledala za avtomobilsko industrijo, ki jih izdeluje podjetje Gentex. Ogledala uporabljajo senzorje, ki ponoči zaznavajo luči zadaj vozečih vozil in ustrezno zatemnijo ogledalo. Vožnja ponoči je varnejša in manj obremenjujoča za voznika.

## 2.6.2 Pametna okna

Z uporabo pametnih oken želimo izboljšati bivalne pogoje z zmanjšanjem sončnega bleščanja. S pametnimi okni prispevamo k boljši energijski učinkovitosti (porabimo manj energije za hlajenje prostorov) in boljšemu počutju v prostorih.

## 2.6.3 Elektrokromni zasloni (elektronsko črnilo)

Med najpomembnejše elektrokromne naprave spadajo elektrokromni zasloni. Osnovna razlika med njimi in ostalimi napravami (televizorji, pametni telefoni, tablični računalniki itd.) je v tehnologiji zaslona.

Pri e-bralnikih vsebino beremo na elektronskem papirju, ki ga običajno imenujemo e-papir, s pomočjo e-črnila. Najpogostejši je sistem pigmentnih elektronskih črnih, ki je sestavljen iz več milijonov drobnih mikrokapsul. Vsaka mikrokapsula vsebuje pozitivno nabite bele delce in negativno nabite črne delce, združene v namenski tekočini. Ko tej tekočini dovedemo električni tok, se ustrezni delci premaknejo na vrh mikrokapsule, kjer postanejo vidni za bralca, v črni in beli barvi. Elektrokromni zasloni so pasivni, to pomeni, da ne emitirajo svetlobe in posledično potrebujejo zunanji vir svetlobe.

E-bralnik porablja energijo le pri obračanju strani, zato je poraba energije majhna in varčna. Baterija na samem bralniku nam ob ustrezni uporabi tako lahko zdrži tudi do več tednov, preden jo je potrebno ponovno napolniti.

Elektrokromni zasloni zaradi spominskega efekta za delovanje porabijo zelo malo električne energije, zlasti ko prikazujejo mirujočo sliko. Težava pri večjih elektrokromnih zaslonih je enakomernost obarvanja. Obarvanje pri elektrokromnih materialih je odvisno od pretečenega električnega naboja. Tok, ki pri obarvanju teče skozi tanko elektrodo in elektrokromni material, povzroči različne padce napetosti na različnih delih elektrode in posledično je električni tok nehomogen po prostoru. Tako je celoten vstavljen naboj po nekem času različen na različnih delih zaslona.

Dobre lastnosti zaslonov:

- Odličen kontrast. Črna barva na beli podlagi, kar omogoča enostavno branje.

- Pri prikazu statičnih objektov/slik/teksta ni osveževanja zaslona. Zaslون se osveži le pri menjavi strani, kar omogoča udobno branje brez večjega napora za oči – kot pri papirju ter ne potrebuje dodatne osvetlitve, kar doprinese k manjši porabi energije.
- Visoka energetska učinkovitost. Energija se porablja le pri listanju strani (ali pri brskanju po menijih), kar pomeni, da zaslon večino časa ne porablja energije.

Slaba lastnost elektrokromnih zaslonov je odzivni čas, ki je odvisen od tipa elektrokromnega materiala.

#### **2.6.4 Druge naprave**

Elektrokromni materiali so zanimivi za uporabo v elektronskem papirju, razne vrednostne in bančne kartice imajo lahko elektrokromni zaslon, s čimer se poveča varnost uporabe. Prav tako je zanimiva uporaba tam, kjer je velika možnost nedovoljenega kopiranja (vozovnice, žetoni, osebni dokumenti in bankovci). Z izdelavo dokumentov se v Sloveniji ukvarja podjetje Cetus.

Večina možnih aplikacij pa zaradi relativno visokih stroškov proizvodnje trenutno še ni zanimiva za masovno proizvodnjo.

### **2.7 UV-vis spektrofotometrija**

Spektrofotometrijo uvrščamo med molekulske absorpcijske spektrometrije. V to skupino sodita tudi kolorimetrija in fotometrija. Spektrofotometrija temelji na merjenju absorpcije svetlobe pri prehodu skozi raztopino vzorca. Molekulam, ki jih vzbujamo, se spremenijo elektronska stanja. Spektrofotometer primerja delež svetlobe, ki preide skozi referenčno raztopino in skozi merjen vzorec. Del svetlobe se pri prehajanju skozi vzorec absorbira, prepuščena svetloba pa pride do detektorja. Absorpcijo svetlobe podaja Beer-Lambertov zakon, ki velja le za razredčene raztopine. Spektrofotometrijska merjenja absorpcije se izvajajo pri valovni dolžini, ki odgovarja absorpcijskemu maksimumu. V tej točki je sprememba absorbance na enoto koncentracije največja (Lobnik, 2013).

Med spektrofotometrijo uvrščamo UV, vidno in IR spektrofotometrijo. Z UV-Vis spektroskopijo preučujemo lastnosti snovi preko njihove interakcije z ultravijolično in vidno svetlobo. Molekulska spektroskopija, ki temelji na UV, vidnem in IR sevanju, se v veliki meri



uporablja za identifikacijo in detekcijo mnogih organskih in anorganskih spojin. Molekulska UV in vidna spektrofotometrija je pomembna za kvantitativno analizo in je izjemno pogosto orodje analitskih laboratorijev.

## **2.8 Kronoamperometrija**

Kronoamperometrija je elektrokemijska metoda, kjer nek izbran sistem vzbujamo s konstantnim električnim potencialom in merimo njegov tokovni odziv v odvisnosti od časa. Najpogosteje je izbran sistem elektrokemijska celica, kjer imamo dve ali več elektrod ter beležimo, kako se spreminja tok, ki teče po sistemu po času, zraven pa opazujemo, kaj se s sistemom dogaja. V kolikor se tok s časom spreminja, lahko preučujemo, ali neka reakcija poteka hitreje ali počasneje oz. če se neka elektrokemijsko aktivna komponenta porablja ali pa nastaja. V praksi je takšna metoda izjemno uporabna za testiranje baterij, kjer baterijo podvržejo električni napetosti ter opazujejo, kako se polni ali prazni.

## **3 MATERIALI IN METODE**

### **3.1 Instrumenti**

- krovna stekla
- urna stekla
- čaše
- epruvete
- merilni valji
- kapalke
- žličke
- magnetno mešalo

### **3.2 Materiali:**

- kovinske elektrode
- alu folija
- baterija 4.5 V
- izolirni trak

### **3.3 Kemikalije:**

- natrijev acetat
- cevosan
- fenolftalein
- mešanica kisa za vlaganje
- 10% raztopina očetne kisline
- raztopina HCl
- raztopina NaOH
- etanol
- karij
- žafranove nitke
- kurkuma

- čaj
- maskara
- parfum
- deodorant
- tekočina za shranjevanje leč
- barvila za barvanje pirhov (rdeče in zeleno)
- črnilo za nalivno pero

### **3.4 Metode:**

- UV-Vis transmissijski (Agilent Cary 50 UV-Vis z optično sondo, ZDA)
- UV-Vis reflektančni (Agilent Cary 50 UV-Vis na steklene kivete, ZDA)
- pH lističi (Machery – Nagel, Nemčija)
- pH-meter (Vernier pH Sensor, ZDA)
- Kronoamperometrija (Potenciostat/galvanostat Palmsens PalmSens4, Nizozemska)

## 4 EKSPERIMENTALNI DEL

Poskuse smo opravljali v laboratorijih na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo (slika 4) Univerze v Mariboru (UM FKKT) in v šolskem laboratoriju. V laboratorijih smo imeli na voljo vsa potrebna zaščitna sredstva.



*Slika 4: Laboratorij.*

Za začetek smo izdelali svojo prvo celico kot učni primer, ki je bila osnova za vse nadaljnje poskuse in je bila predstavljena v literaturi (Slovenija Št. patenta 201500168, 2017) (Rozman M., Magistrsko delo, 2017). S tem smo dobili vpogled v to, kako je celica sestavljena in kako deluje.

Začeli smo raziskovati tudi pH barvila, ki bi jih lahko uporabili kot elektrokromna barvila. Imeli smo več idej in večino od teh smo tudi izvedli. Za barvilo smo vzeli karij, žafranove nitke, kurkumo, čaj, maskaro, parfum, dedorant, tekočino za shranjevanje leč, barvila za barvanje pirhov in črnilo za nalivno pero.

## **4.1 Postopki**

### **4.1.1 Postopek priprave posameznih komponent**

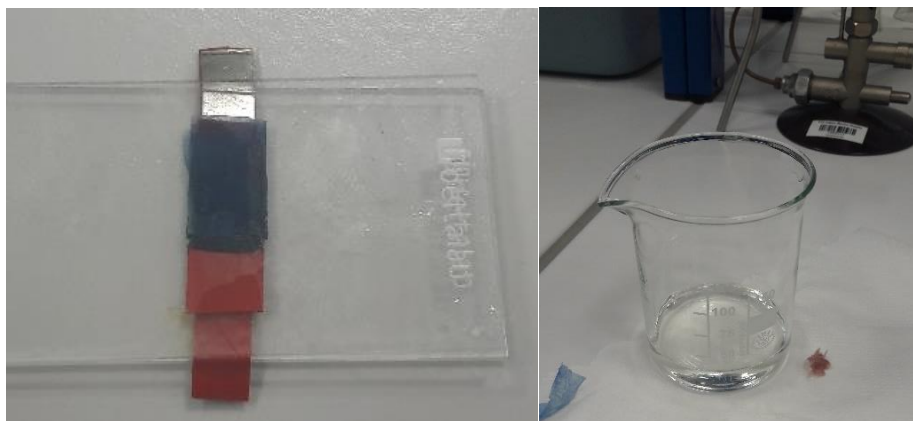
Za samo izvedbo poskusa smo najprej potrebovali elektrode. Elektrode, ki so bile iz kovine, smo lahko pridobili na različne načine. Vzeli smo neuporabne – prazne 4,5-V baterije, kjer smo odstranili kovinske dele, ki so bili za nas uporabni, ali pa smo vzeli kos čiste kovine (slika 5).

### **4.1.2 Postopek priprave elektrode**

Elektrode smo pripravili iz dveh kovinskih delov (kovinski del lahko odstranimo iz neuporabne 4,5-V baterije ali pa vzamemo kos kovine – širina 5 mm, višina 0,1 mm, dolžina 40 mm). Vsak kovinski del smo posebej izolirali z izolirnim trakom ter ju nato namestili eno na drugo, tako da sta se dotikali z izoliranima stranema. Elektrode smo dodatno fiksirali z izolirnim trakom. Elektrode smo očistili z etanolom, da na njih ni bilo sledov organskih snovi, ki bi motile prevodnost elektrode. Tako so bile elektrode pripravljene za dodatek nosilca elektrolita z elektrokromnim barvilom.

### **4.1.3 Postopek priprave elektrolita**

Za elektrolit smo uporabili natrijev acetat (slika 6). Vzeli bi lahko že pripravljen natrijev acetat iz očetne kisline in natrijevega hidroksida, ki ga najdemo v laboratoriju. A glede na to, da naša naloga temelji na elektrokromizmu v domači kuhinji, smo se lotili priprave natrijevega acetata sami. Večkrat smo poskusili, da smo dobili pravo razmerje in pH vrednost. V večini primerov je bilo preveč bazično, saj je cevosan zelo močna baza, medtem ko je mešanica kisa za vlaganje šibka kislina. Uporabili smo indikator fenolftalein, s katerim smo skušali priti do ekvivalentne točke. Ugotovili smo, da je za obstojen natrijev acetat potrebno dodati 10 mL kisa za vlaganje in 1,55 mL cevosana. Tako smo dobili razmerje 6,4 : 1. To je potrebno med seboj dobro premešati. Da smo prišli do pravega razmerja, smo večkrat pomerili pH vrednost. Pomagali smo si s pH lističi in napravo za merjenje pH vrednosti.



*Slika 5 in 6: Sestavljena celica in priprava natrijevega acetata.*

#### **4.1.4 Postopek priprave elektrokromnega barvila**

Raztopino pH barvila smo pripravili tako, da smo zmešali 10 mL etanola, 15 mL destilirane vode in barvilo. Če je barvilo v trdnem agregatnem stanju, se ga doda 1 g ali 12,5 mL, če se nahaja v tekočem agregatnem stanju.

#### **4.1.5 Postopek priprave barvila – črnila**

Vzeli smo bombico s črnilom (modra barva) za nalivno pero ter vrh prerezali s škarjami in raztopino zlili v kozarec (čšašo). Nato smo dodali 10 mL destilirane vode in 5 mL etanola. To smo z žličko dobro premešali. Tako smo dobili raztopino črnila v destilirani vodi in etanolu. Postopek priprave črnila je bil enak osnovnemu postopku priprave elektrokromnega barvila. Razlika je bila le v količini etanola in destilirane vode (manjša), razmerje je bilo enako.

#### **4.1.6 Postopek priprave končne elektrokromne celice**

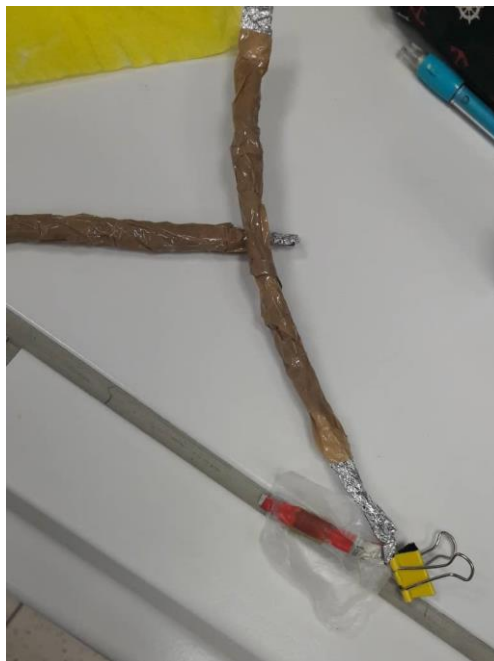
Raztopino smo premešali in s kapalko nakapljali na papir, kolikor se je dalo enakomerno. Nato smo papir z nanesenim barvilom posušili, pri čemer smo si pomagali s sušilnikom za lase (slika 7). Ko je bil papir z raztopino suh, smo odrezali trak papirja, ki smo ga 3-krat ovili okrog elektrode.

Nato smo pripravili dve krovni stekli. Na raztopino smo kanili 2 kapljici elektrolita. Pri nas je bil ta elektrolit natrijev acetat, ki je bil sestavljen iz cevosana in mešanice kisa za vlaganje. Elektrode smo dali med stekli.

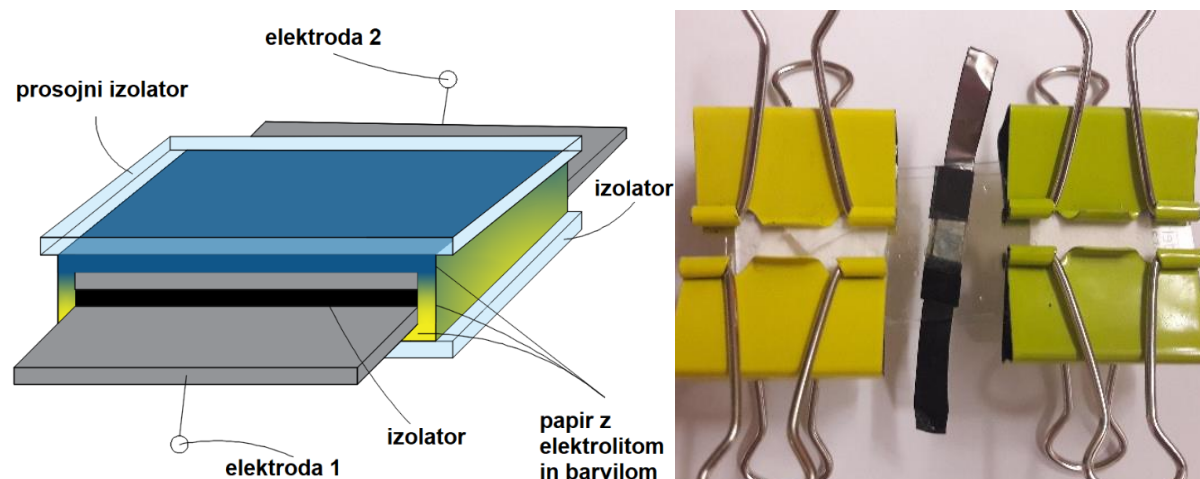


*Slika 7: Nanašanje barvila na papir. Na sliki vidimo barvilo črnilo v raztopini, ki ga nanašamo na papir za brisanje.*

Pripravili smo dve palici zvite alufolije (slika 8). Na vsaki strani smo pustili 20–30 mm prostora, ostali del pa smo prelepili s selotejpom. Nato smo vzeli polno 4,5-V baterijo in na en konec na obeh palicah alufolije dali elektrodo, ki smo jo pritrdili s ščipalkami. Tista dva konca na palici, ki sta ostala prazna, pa smo priključili na + oziroma – na 4,5-V bateriji (slika 9 in 10).



*Slika 8: Izolirane palice iz alufolije.*



Slika 9 in 10: Skica sestavljene celice in sestavljena celica.

## 4.2 TESTIRANJE CELICE

Da smo se prepričali, da nov tip sestavljene celice res deluje, smo jo najprej priklopili na 4.5 V za 25 s in opazovali spremembo barve ter jo nato priklopili na -4.5 V za 45 s in ponovno opazovali spremembo barve. S tem smo se prepričali, da je novo sestavljen tip celice sposoben reverzibilne spremembe barve ter da dejansko deluje kot elektrokromna naprava. V kolikor se to ni zgodilo oziroma ni šlo po načrtu, smo sklepali, da je prišlo do kratkega stika oziroma do nepravilnosti črnila in elektrolita. Kot drugo je možno, da ko smo celico priklopili dvakrat pri isti napetosti (recimo dvakrat 4.5 V za 25 s) se v drugem primeru barva ni spremenila, prav tako pa smo tvegali, da celico pretiramo »prebarvamo« oziroma privedemo elektrolizo do stopnje, ko reverzibilna barva ni več mogoče. To ima za posledico nedelovanje celice.

### 4.2.1 Merjenje pH elektrolita

Glede na to, da smo se sami lotili priprave natrijevega acetata, ki predstavlja elektrolit, smo večkrat pomerili pH vrednost. pH smo pomerili na različne načine, in sicer pomerili smo ga s pomočjo pH lističev in naprave za merjenje pH vrednosti – pH-metrom. pH listič smo potopili v elektrolit in ga čez nekaj sekund vzeli iz raztopine. Barvne spremembe, ki so bile na lističu, smo primerjali z barvno lestvico in tako odčitali pH vrednost. Za natančnejše meritve smo uporabili napravo za merjenje pH vrednosti. Velikokrat je bilo bolj bazično kot kislo.



Pomerili smo tudi pH posameznih raztopin z barvilom. Prav tako smo pH pomerili s pH lističi in napravo za merjenje pH vrednosti.

#### **4.2.2 Priprava papirja**

Vzeli smo navaden kuhinjski papir (proizvajalec Paloma MultiFun). Papir smo razslojili, tako da smo dobili samo eno plast od dveh. Položili smo ga na urno steklo in nanj enakomerno po celotni površini papirja nakapljali elektrokromno barvilo. Papir z barvilom smo posušili s sušilnikom za lase. Ko je bil papir suh, smo ga narezali na ozke trakce širine 0.5 cm, ki smo jih trikrat ovili okoli elektrod. Po končanem ovijanju smo na papir najprej nadeli ščipalko, da je papir ostal na elektrodnem sklopu.

#### **4.2.3 Nanos elektrolita in zapakiranje celice**

Elektrolit smo nanесли na papir z elektrokromnim barvilom. Pozorni smo morali biti na to, da smo elektrolit nakapljali enakomerno po celotni površini papirja. Ko smo natrijev acetat enakomerno nanесли na papir, smo ta del zaprli s folijo za ovijanje zvezkov, tako da ni prepuščalo.

#### **4.2.4 Meritve transmissijske UV-Vis raztopin**

Meritve smo izvajali na instrumentu Agilent Cary 50. Posneli smo posamezne raztopine v območju med 200 in 800 nm, s časom preleta 600 nm/min. Predhodno smo instrument umerili, tako da smo v kiveto nalili 2 mL deionizirane vode in izmerili kalibracijski spekter. Pred meritvijo smo v kiveto nalili 2 mL preiskovane raztopine in posneli spekter. Med vsako posamezno meritvijo smo kiveto sprali z deionizirano vodo ter kiveto osušili s stisnjanim zrakom in riževim papirjem.

#### **4.2.5 Meritve kronoamperometrije z okometričnim opazovanjem**

Kronoamperometrija se je izvajala s potenciostatom/galvanostatom PalmSens 4. Testirano celico smo priklopili tako, da smo delovno elektrodo (začetni pozitivni pol) priklopili na opazovano stran, protielektrodo, združeno z referenčnim terminalom (začetni negativni pol), pa smo priključili na neopazovano stran. Napetost je variirala med vsakim posameznim pulzom med + 4.5 V in - 4.5 V. Prvi pulz je trajal 25 s pri - 4.5 V, vsak nadaljnji pa 45 s, z 1 minuto pavze med posameznim pulzom. Posamezen cikel je bil sestavljen iz dveh pulzov, z

izjemo prvega pulza, ki je štel kot ogrevalni polcikel. Skupno je bilo izvedenih 25 ciklov. Med ciklanjem je bila celica občasno slikana, da smo dokumentirali spremembo barve pri posameznem pulzu.

#### **4.2.6 Meritve UV-Vis reflektančne spektroskopije**

UV-Vis reflektančna spektroskopija se je izvajala z instrumentom Agilent Cary 50 s priklopljenim optičnim vlaknom. Spektre smo posneli v razponu valovnih dolžin med 200 in 800 nm, s časom preleta 600 nm/min. Sestavljeno celico smo postavili tako, da je bila optična sonda pritisnjena na opazovano stran celice. Sestavljeno celico smo obrnili tako, da je bila na zgornji strani opazovana stran, nato pa smo celico postavili na merilni okvir ter prislonili sondo z optičnim vlaknom na opazovano površino. Celico s postavljenim vlaknom smo zakrili s črno krpo, da smo preprečili vdor zunanje svetlobe in posledične motnje pri sami meritvi.

Najprej smo celico posneli v prvotnem stanju brez izpostavljenosti električnim pulzom, nato pa smo na celici naredili ogrevalni polcikel, ki je trajal 25 s pri potencialu 4.5 V, nato pa smo pričeli s snemanjem. Pred posameznim snemanjem drugega spektra smo pritisnili ustrezen pulz + 4.5 V za 45 sekund in počakali 60 s, da se je celica ustalila. Po končanem snemanju drugega spektra smo pritisnili pulz z nasprotnim predznakom in ponovno počakali 60 s ter nato posneli spekter.

#### **4.2.7 Združen eksperiment kronoamperometrija + UV-Vis reflektanca**

Združena meritev je potekala podobno kot samostojna kronoamperometrija (instrument PalmSens4) s to izjemo, da je bilo na opazovano površino celice pritisnjeno optično vlakno (instrument Cary 50 z optičnim vlaknom). Razlika v izvedbi meritve je bila, da smo najprej postavili vzorec na merilni okvir, prislonili sondo, nato smo priklopili električne kontakte iz potenciostata/galvanostata, šele nato pa smo celoten sistem zakrili s črno krpo. Reflektančni spekter je bil sneman pri valovni dolžini 600 nm, pogoji dovajanja pulzov pa so bili enaki kot pri samostojni kronoamperometriji: - 4.5 V s trajanjem 25 s za ogrevalni pulz, nato pa izmenjajoče + 4.5 V in - 4.5 V s trajanjem 45 s in 60 s z vmesnimi pavzami med posameznim pulzom.

## 5 REZULTATI

V tem poglavju predstavljamo rezultate in opazovanja izdelane celice. Za pripravo poskusa s črnilom smo potrebovali 5 mL etanola, 10 mL destilirane vode in 1 bombico črnila za nalivno pero. Prišlo je do spremembe barve iz modre (slika 10) v bež (svetlo rumeno) (slika 11).

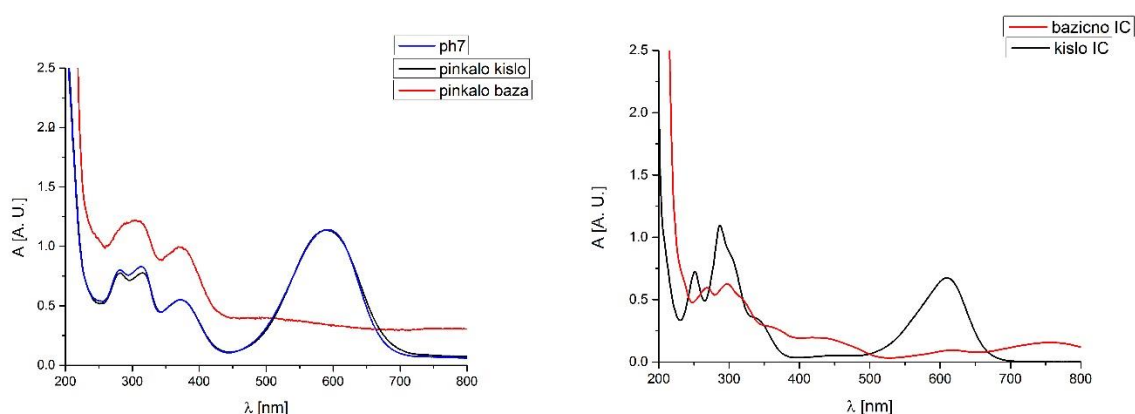


*Slika 10 in 11 : Sestavljena celica ob prvem priključku na pozitiven vir električne napetosti in sestavljena celica po drugem priključku na negativen vir električne napetosti.*

### 5.1 Rezultati priprave barvila

Barvilo je v osnovi modre barve, in ko smo nanesti elektrolit, se barva ni spremenila. Opazovano (zgornjo) elektrodo smo priključili na pozitivni pol vira napetosti, neopazovano (spodnjo) elektrodo pa na negativni pol. Pri prvem pulzu na opazovani strani nismo opazili spremembe, pri drugem pulzu, ko smo opazovano površino priključili na negativni pol vira napetosti, pa smo opazili, da se je barva spremenila iz modre v bež. Barvna sprememba nakazuje, da je pH raztopine na opazovanem mestu presežek ekvivalentno točko pH indikatorja. Barva se je po odklopu še kakšnih 10–15 s spreminjala do končne zaželjene barve, nato pa je bila stabilna in se ni več spreminjala. Eksperiment smo nato ponovili, kjer smo opazovano stran priključili na pozitivni pol, kjer smo opazili, da se je barva spremenila iz bež nazaj v modro barvo. Ponovno smo opazili zakasnitveni efekt, kjer se je opazovana stran še kakšnih 10–15 s spreminjala do končne željene barve. Za spremembo barve ob priklopu na vir napetosti smo v povprečju potrebovali 60 s.

## 5.2 Rezultati UV-Vis transmisije



Graf 1 in 2: Predstavljena sta grafa UV-Vis transmisijske spektroskopije, graf črnila (levo) in indigo karmina (desno). Na levi fotografiji vidimo spekter pri nevtralnih (modra barva), kisljih (črna barva) in bazičnih (modra barva), na desni sliki pa vidimo spekter barvila v kisljih (črna barva) in bazičnih (modra barva). Meritve so bile izvedene v območju med 200 in 800 nm.

Za izvajanje meritev ciklične voltametrije smo uporabili instrument PalmSens4. Ciklična voltametrija je bila izvedena na razredčenem vzorcu raztopine penkala.

Na grafih je prikazan maksimum na intervalu med 500 in 700 nm. Čas preleta je bil v vseh primerih 600 nm/min.

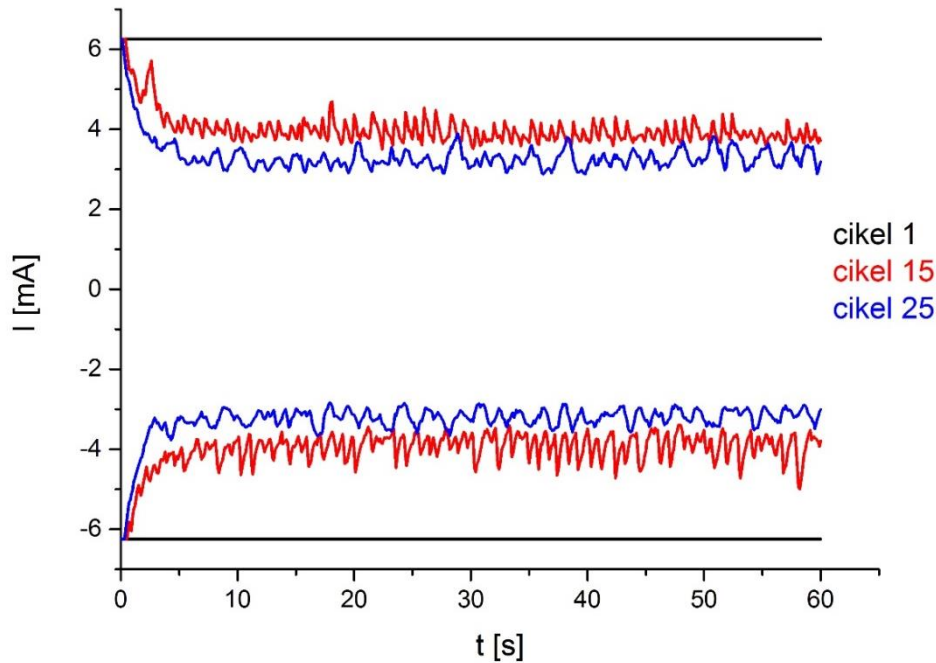
## 5.3 Rezultati izdelave celice

Problem elektrolize so mehurčki, kjer se lahko mehurček ujame v celici na opazovanem mestu in potem na tem mestu ni elektrolita ter posledično ne pride do spremembe barve (ker tam celica ne prevaja). Zaradi tega pride do artefaktov: to je pojav, ko celica kljub zagotavljenemu toku na določenem mestu nima ustrezne spremembe, čeprav vsi ostali podatki, obarvanje preostanka celice, kronoamperometrični signal kažejo, da celica dela.

Barva se je spreminjala glede na kislost oziroma bazičnost elektrolita. Prehajala je iz modre v bež v kislem in iz modre v svetlo rumeno v bazičnem.

Celica je potrebovala 45 s, da je prešla v drugo barvo. To je potakalo pod napetostjo 4,5 V.

## 5.4 Rezultati kronoamperometrije

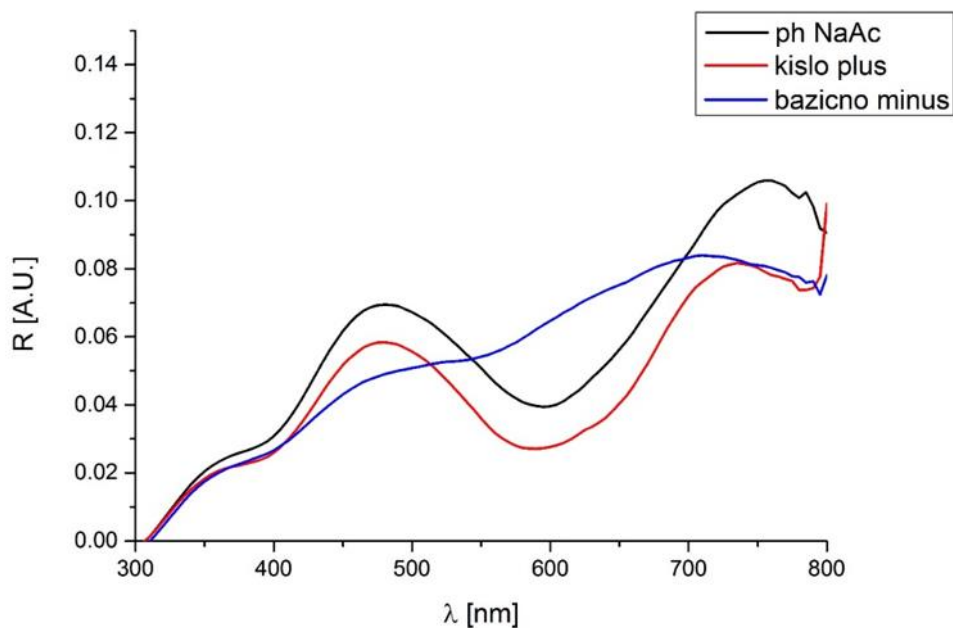


*Graf 3: Graf kronoamperometričnih meritev. Graf prikazuje izvedene pulze pri različnih ciklih, in sicer pri 1. (črna barva), 15. (rdeča barva), in 25. ciklu (modra barva).*

Graf prikazuje ciklanje celice in njeno obstojnost. Cikel 1 prikazuje najnižjo in najvišjo dovoljeno mejo. Cikel 15 in cikel 25 sta podobna, to pomeni, da je celica elektrokemijsko obstojna, saj na istih mestih prihaja do sprememb. Skupaj je bilo izvedenih 25 ciklov.

Celico smo pripravili po postopku, opisanem v prejšnjem poglavju. Celico smo priklopili na instrument PalmSens4, na katerem smo za metodo izbrali kronoamperometrijo.

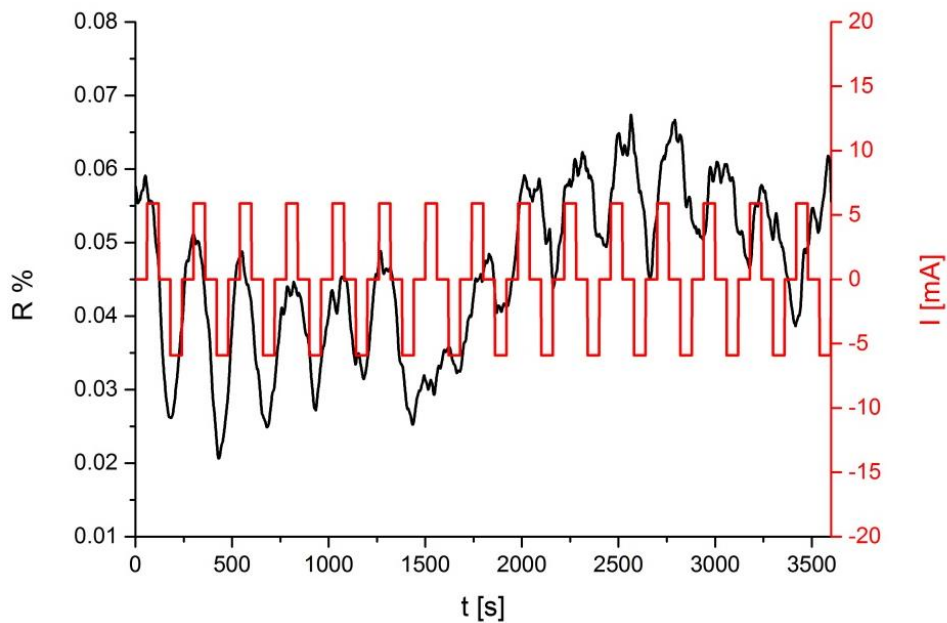
## 5.5 Rezultati UV-Vis reflektance



Graf 4: Graf UV-Vis reflektance. Grafi predstavljajo podatke za kisle (rdeča) in bazične (modra) pogoje ter za sveže sestavljeno celico (črna).

Spektre smo posneli med 300 in 800 nm. Čas preleta je bil 600 nm/min. Minimum je prikazan na območju med 500 in 700 nm. Najprej smo celico posneli v prvotnem stanju, nato pa naredili ogrejevalni polcikel (25 s pri potencialu  $-4.5$  V). Skupaj je bilo opravljenih 5 ciklov.

## 5.6 Rezultati kombiniranega eksperimenta



Reflektanca + kronoamperometrija sestavljene celice snemana pri 600 nm.

*Graf 5: Graf UV-Vis reflektance sklopljen s kronoamperometrijo v odvisnosti od časa. Črna barva prikazuje odvisnost reflektance po času, medtem ko rdeča barva prikazuje tokovni odziv celice.*



*Slika 12: Sestavljena celica in pojav mehurčkov po končanem barvanju.*

Graf prikazuje rezultate kombiniranega eksperimenta reflektance in kronoamperometrije. Sestavljene celice so bile snemane pri 600 nm. Skupno je bilo opravljenih 15 ciklov. Iz grafa je razvidno, da je prvih šest meritev podobnih, nato pa je prišlo do motenj oziroma artefaktov, sklepamo, da je prišlo do tega zaradi pojava mehurčkov v celici (slika 13).



## 6 RAZPRAVA

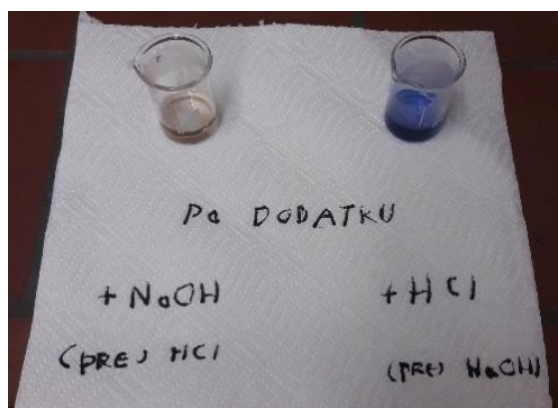
V samem začetku naloge smo si zadali cilj, da najdemo novo barvilo, ki bo obstojno in bo pod vplivom napetosti lahko spremenilo barvo. Ugotovili smo, da ima črnilo izbrane karakteristike.

### 1. Črnilo v napravi bo po dodanem napetostnem pulzu spremenilo svojo barvo.

Hipotezo potrjujemo, saj je črnilo v napravi spremenilo svojo barvo. Ko smo dodali napetostni pulz, se je barva spremenila iz modre v bež (svetlo rumeno) barvo.

### 2. Barva črnila bo po spremembi napetosti zadostno obstojna.

Barva pri črnilu je dovolj obstojna, da brez kakršnih koli zapletov uspešno izvede najmanj 5 ciklov. To smo tudi dokazali s poskusom, ko smo dodali bazično NaOH in kislino HCl raztopino (slika 14). Tako smo ugotovili, da lahko celico kar nekajkrat ciklamo. Po vseh ugotovitvah lahko to hipotezo potrdimo.



Slika 13: Raztopina črnila po dodatku NaOH in HCl.

### 3. Črnilo se bo po dodanem napetostnem pulzu z nasprotnim predznakom napetosti vrnilo v prvotno barvo.

Črnilo se po zamenjavi predznaka napetosti vrne v prvotno barvo. To hipotezo potrdimo, saj je prišlo do spremembe barve in ta se je tudi vrnila v prvotno barvo. Predstavljena celica lahko prikazuje bež (svetlo rumeno) ali modro barvo.

### 4. Uporabimo lahko komponente, ki so cenejše in dostopnejše od obstoječih.

To hipotezo smo skozi celotno nalogo dokazovali. Za elektrode namesto čiste kovine vzamemo neuporabne prazne 4,5-V baterije, kjer odstranimo kovinske dele, ki so za nas uporabni. Uporabimo lahko poceni izolirni trak, ki ga najdemo v gospodinjstvu. Tudi elektrolit smo pripravili sami in v kuhinji poiskali poceni komponente: cevosan in mešanico kisa za vlaganje. Za črnilo smo uporabili bombice, ki jih najdemo praktično v vseh pisalnih doma. Namesto dragega papirja smo uporabili kuhinjski papir, ki ga doma potrebujemo za veliko stvari. Da smo celico priključili na napetost, smo čisto preprosto naredili dve palici iz alufolije, s pomočjo katerih smo elektrode priklopili na polno 4,5-V baterijo. Tako lahko to hipotezo v celoti potrdimo, saj smo vse komponente zamenjali s cenejšimi in tudi dostopnejšimi.

#### **5. Stare baterije lahko uporabimo za sestavo celice.**

Ta hipoteza drži, saj smo za elektrode namesto čiste kovine uporabili neuporabne prazne 4,5-V baterije, kjer smo odstranili kovinske dele, ki so bili za nas uporabni.

#### **6. Namočen papir z elektrolitom, ki ga najdemo v kuhinji zelo dobro prevaja električni tok.**

Namesto dragega papirja smo uporabili kuhinjski papir, ki ga doma potrebujemo za veliko stvari. Nanj smo nanесли doma narejen elektrolit in ugotovili, da dobro prevaja električni tok. Tako da lahko to hipotezo potrdimo.

#### **7. Nanos črnila na papir nima vpliva na kvaliteto delovanja celice.**

To hipotezo popolnoma ovržemo, saj smo ugotovili, da je zelo pomembno, kako nanesimo črnilo na papir. Zelo pomembno je, da ga nanesimo enakomerno po celotni površini papirja, saj pride do neenakomernega spreminjanja barve.

#### **8. Za spremembo barve polariteta potenciala ni pomembna.**

Hipotezo lahko ovržemo, saj je polariteta potenciala pomembna, saj moramo izvesti pravilno zamenjavo pola, če želimo doseči, da res pride do spremembe barve. Ni pa pomembno, na katero stran damo najprej plus in na katero minus pri prvem ciklu. Pravilen vrstni red pulzov je prav tako pomemben, saj bi lahko pretirano dodajanje potenciala s samo pozitivnim ali negativnim predznakom zaradi pretirane korozije elektrod ter zakisanja ali zabaziranja raztopine nepopravljivo poškodovalo celico oz. jo pripeljalo do stanja, ko ne bi mogli več spremeniti barve iz enega v drugo barvno stanje.

## 7 IZVEDBENI PRIMERI – MENJAVANJE KOMPONENT

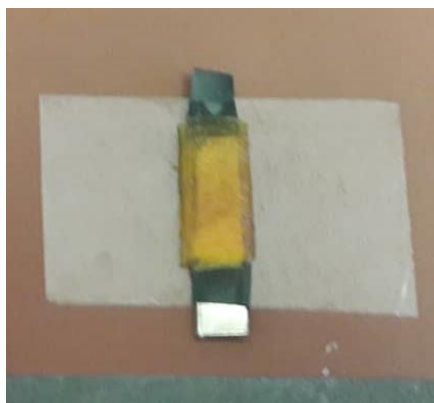
Med samim raziskovanjem se mi je porodilo veliko novih vprašanj. Med drugimi tudi, ali bi lahko barvilo – črnilo zamenjali s katerim drugim elektrokromnim barvilom. Zato smo za novo barvilo poskusili še več komponent, s katerimi smo poskušali izdelati elektrokromno celico, vendar je bila barvna sprememba manj opazna kot pri celici, ki uporablja črnilo penkala.

### Čaj divje češnje

Poskusili smo s čajem divje češnje, kjer smo raztopino pripravili tako, da smo vzeli 70 mL etanola, 105 mL destilirane vode in 7 g čaja divje češnje. Vse to smo skupaj zmešali in nato segreli na gorilniku do 60 stopinj. Pustili smo stati 2 h, da se je ohladilo. Nato smo izvedli enak postopek, kot je opisan zgoraj. Pri poskusu ni bilo videti vidnih sprememb. Barva se je spremenila samo na svetlejšo.

### Karij (zmes več vrst začimb)

Za pripravo raztopine smo vzeli 10 mL etanola, 15 mL destilirane vode in 1 g karija. Postopek je bil enak, kot je opisan zgoraj. Prišlo je do spremembe barve iz rumene v rdečo (slika 15).



Slika 14: Sestavljena celica s karijem.

### Cimet

Raztopino smo pripravili iz 10 mL etanola, 15 mL destilirane vode in 1 g cimeta. Pri reakciji so pod steklom nastali mehurčki, pri sami barvi ni bilo velikih sprememb. Postala je samo malo temnejša (slika 16).



*Slika 15: Sestavljena celica s cimetom.*

### **Tekočina za leče**

Vzeli smo 5 mL etanola, 10 mL destilirane vode in 5 mL tekočine za leče. Prišlo je do rahle spremembe v barvi, in sicer iz bele v rahlo rumeno (slika 17).



*Slika 16: Sestavljena celica s tekočino za leče.*

### **Deodorant FA**

Vzeli smo 5 mL etanola, 10 mL destilirane vode in 5 mL deodoranta. Prišlo je do rahle spremembe v barvi, in sicer iz bež v rahlo rumeno.

### **Barvilo za barvanje pirhov – rdeča barva**

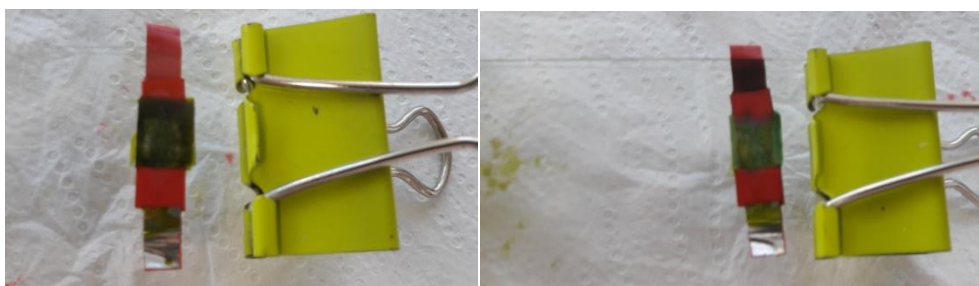
Za pripravo smo vzeli 5 mL etanola, 10 mL destilirane vode in 1 g prahu za barvanje. Po dodatku elektrolita so se pojavile črne pike (slika 18), na drugi strani je barva postajala svetlo rdeča (slika 19). pH raztopine je 6,21.



*Slika 17 in 18: Sestavljena celica z barvilom za barvanje pirhov po dodatku elektrolita, sprednja stran in zadnja stran.*

### **Barvilo za barvanje pirhov – zelena barva**

Vzeli smo 5 mL etanola, 10 mL destilirane vode in 1 g prahu za barvanje. Po dodatku elektrolita se je spremenila barva iz zelene v rumeno (z obeh strani, z ene bolj kot druge) (slika 20 in 21). pH raztopine je 6,24.



*Slika 19 in 20: Sestavljena celica z barvilom za barvanje pirhov po dodatku elektrolita, sprednja stran in zadnja stran.*

## 8 ZAKLJUČEK

V raziskovalni nalogi smo se lotili izdelave celice, za katero smo uporabili komponente, ki smo jih našli doma. Iz njih smo sestavili novo elektrokromno celico in s tem dokazali, da je tudi z enostavnimi materiali mogoče izdelati enostavne elektronske komponente. Ugotovili smo, da lahko za celico kot barvilo uporabimo črnilo nalivnika, ki je obstojno, saj smo brez zapletov uspešno izvedli 5 ciklov, in reverzibilno, saj je prišlo do spremembe barve v modro ali rumeno. Za elektrode smo uporabili neuporabne prazne 4,5-V baterije. Namesto dragega papirja smo uporabili kuhinjski papir in nanj nanесли doma narejen elektrolit iz mešanice kisa za vlaganje ter cevosa. Ugotovili smo, da dobro prevaja električni tok. Pri vsem tem je bilo pomembno, da smo na papir enakomerno nanесли črnilo.

Novost predstavljene naprave je, da lahko demonstriramo elektrokromni efekt s ceneniimi komponentami, ki jih lahko najdemo doma ali v vsaki trgovini. Glavna uporabnost sestavljene naprave je, da je odličen, enostaven in zanimiv eksperiment, ki ga lahko izvajajo tudi mlajši učenci, v osnovnih in srednjih šolah, prav tako pa je dovolj poceni, da lahko vsak učenec izvede samostojen eksperiment. Takšne naprave lahko z osnovnim znanjem fizike in kemije povežemo tudi v kompleksnejše sisteme in iz njih naredimo živahno dekoracijo. Več takšnih naprav bi lahko sestavili v novoletno okrasitev, ki za delovanje ne potrebuje veliko energije ter je okolju prijazna.

Raziskovalna naloga je zanimiva tudi s stališča premikanja barrier, saj do sedaj ni bilo veliko eksperimentov, ki bi se dotikali elektronskih črnih in tehnologije zaslonov ali polprevodnikov. Še najbližje temu so eksperimenti izdelave sončnih celic, ki pa se jih zaradi cene materialov in zapletenosti izdelave srednje šole po navadi izogibajo, saj pri izgradnji le-teh pogosto pride do napak, zaradi česar sončne celice ne delujejo. Elektrokromni efekt, ki smo ga demonstrirali v raziskovalni nalogi, je za razliko od dosedanjih eksperimentov precej enostavnejši, prav tako pa je napake, narejene tekom eksperimenta, zelo lahko odpraviti. Upamo, da bo predstavljeni primer naprave elektronskega črnila služil kot navdih za bralce, da je tudi z omejenimi sredstvi mogoče sestaviti zanimive laboratorijske eksperimente.

## 9 BIBLIOGRAFIJA

- Atkins, P., Frazer, M., Clugston, M., & Jones, R. (1997). *Kemija — Zakonitosti in uporaba*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije .
- Benck., J. D., Pinaud., B. A., Gorlin, Y., & Jaramillo, T. F. (2014). *Substrate Selection for Fundamental Studies of Electrocatalysts and Photoelectrodes: Inert Potential Windows in Acidic, Neutral, and Basic Electrolyte*. Australia: Vipul Bansal, RMIT University.
- Bončina, M., Cerar, J., Godec, A., Hribar, B., Jamnik, A., Lah, J., . . . Vesnaver, G. (2011). *Fizikalna kemija – praktikum*. Ljubljana .
- Brenčič Jurij, L. F. (1999). *Splošna in anorganska kemija*. Ljubljana: DZS.
- Brite. (brez datuma). Pridobljeno 5. januarja 2020 z <https://www.britesolar.com/>
- Bukovec, N., & Brenčič, J. (2000). *Kemija za gimnazije 1*. Ljubljana: DZS.
- Cetis. (brez datuma). Pridobljeno 5. januarja 2020 z <https://www.cetis.si/en>
- Douglas A. Skoog, J. F. (2007). *Principles of instrumental analysis, sixth edition*. ZDA.
- Helmenstine, A. M. (brez datuma). *Edible pH Indicators Color Chart*. Pridobljeno z <https://www.thoughtco.com/edible-ph-indicators-color-chart-603655>
- Kač, M. (2004). *Zbirka Tematski leksikon, kemija*. Ljubljana: Euroadria, d. o. o.
- Kobal, E. (1994). *Kemija za vedoželjne*. Ljubljana: DZS.
- Lewis, M. (2007). *Kemija – Shematski pregledi*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- Maroh Tomaž, R. D. (2016). Pridobljeno 2. decembra 2019 z <https://www.knjiznica-celje.si/raziskovalne/4201604212.pdf>
- Monk, P., Mortimer, R., & Rosseinsky, D. (2007). *Electrochromism and Electrochromic Devices* . ZDA: University Press, Cambridge.
- Petelin, J. (maj 2009). *Elektrokromni materiali in naprave*. Ljubljana, Ljubljana. Pridobljeno 30. novembra 2019 z <http://www-f1.ijs.si/~ziherrl/ElektrokromniMaterialiinNaprave.pdf>
- Prosen, H., Kralj, I., & Strlič, M. (2010 ). *Praktikum iz analizne kemije*.
- Rozman, M. (avgust 2014). *Primerjava potenciometrične in sprektrofotometrične titracije anorganskih kislin*. Ljubljana, Ljubljana, Slovenija.

- Rozman, M. (september 2017). Magistrsko delo. Izdelava in karakterizacija elektrokemijskih sistemov za elektrokromne in fotovoltaične aplikacije. Ljubljana, Ljubljana, Slovenija.
- Rozman, M., Lukšič, M., Gaberšček, M., & Jovanovič, P. (2017). Slovenija Št. patenta 201500168.
- Rozman, M.; Gaberšček, M.; Marolt, G.; Bren, U.; Lukšič, M., An Inverted Sandwich Electrochromic Device Architecture Does Not Require Optically Transparent Electrodes. *Advanced Materials Technologies* 0 (0), 190039
- Science Company. (brez datuma). US. Pridobljeno 4. januarja 2020 z [https://www.sciencecompany.com/ph\\_indicator\\_ranges.aspx](https://www.sciencecompany.com/ph_indicator_ranges.aspx)
- Smrdu, A. (2008). *Kemija, Snov in spremembe 2*. Ljubljana: Založništvo Jutro.
- Šurca, A. (brez datuma). Določanje elektrokemijskih lastnosti elektrokromnih tankih plasti. Ljubljana, Ljubljana. Pridobljeno 29. novembra 2019 z [http://www.dvts.si/arhiv/1999/1999\\_1/1999\\_1\\_3\\_100dpi.pdf](http://www.dvts.si/arhiv/1999/1999_1/1999_1_3_100dpi.pdf)
- Zmazek, B., Smrdu, A., Ferk, V., Glažar, S., & Vrtačnik, M. (brez datuma). *Kemija 2*. Pridobljeno 15. novembra 2019 z <https://eucbeniki.sio.si/kemija2/619/index1.html>