

# Litij-ionske baterije

---

**Beljan, Ilija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:388155>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-01**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni preddiplomski studij**

**LITIJ-IONSKE BATERIJE**

**Završni rad**

**Ilija Beljan**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac ZIP - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 13.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

|   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime studenta:</b>  | Ilija Beljan  |
| <b>Studij, smjer:</b>   | Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija   |
| <b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>   | 4348, 25.07.2017.   |
| <b>OIB studenta:</b>  | 79843031874   |
| <b>Mentor:</b>  | Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić  |
| <b>Sumentor:</b>  | Zvonimir Šimić  |
| <b>Sumentor iz tvrtke:</b>  |   |
| <b>Naslov završnog rada:</b>  | Litij-ionske baterije   |
| <b>Znanstvena grana rada:</b>   | <b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>   |
| <b>Predložena ocjena završnog rada:</b>   | Izvrstan (5)  |
| <b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b> | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda<br>Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda<br>Razina samostalnosti: 3 razina |
| <b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>   | 13.09.2021.   |
| <b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>   | 22.09.2021.   |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:         | Potpis:   |
|   | Datum:  |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 23.09.2021.

|   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime studenta:</b>          | Ilija Beljan  |
| <b>Studij:</b>                          | Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija |
| <b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b> | 4348, 25.07.2017.   |
| <b>Turnitin podudaranje [%]:</b>        | 10  |

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Litij-ionske baterije**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić

i sumentora Zvonimir Šimić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. UVOD</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2. KAKO SU NASTALE BATERIJE</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>3. LITIJ-IONSKE BATERIJE</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>3.1. Način rada litij-ionskih baterija</b> .....   | <b>3</b>  |
| 3.1.1. Katoda.....  | 4         |
| 3.1.2. Anoda .....  | 5         |
| 3.1.3. Separator.....   | 6         |
| 3.1.4. Elektrolit.....  | 7         |
| <b>3.2. Osnovne tehničke karakteristike Li-ion baterija</b> .....                               | <b>7</b>  |
| <b>3.3. Utjecaj na okoliš</b> .....   | <b>10</b> |
| 3.3.1. Zaštita okoliša i recikliranje.....  | 10        |
| 3.3.2. Sekundarne sirovine .....  | 12        |
| 3.3.3. Zakonska regulativa.....   | 12        |
| <b>3.4. Primjena litij-ionskih baterija</b> .....   | <b>14</b> |
| 3.4.1. Primjena kao neprekidno napajanje(engl. UPS - <i>Uninterruptible Power Supply</i> )..... | 14        |
| 3.4.2. Primjena za električna vozila .....  | 15        |
| 3.4.3. Primjena kao skladište energije proizvedene pomoću obnovljivih izvora.....               | 16        |
| 3.4.4. Primjena kao prijenosni punjači .....  | 16        |
| <b>4. BUDUĆNOST LITIJ-IONSKE TEHNOLOGIJE</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>4.1. Nova generacija litij-ionskih baterija</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>4.2. Litij-sumporne baterije</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>4.3. Baterija s krutim elektrolitom</b> .....  | <b>18</b> |
| <b>5. PUNJENJE I PRAŽNENJE LI-ION BATERIJA</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>5.1. Panasonic NCR18650B</b> .....   | <b>21</b> |
| 5.1.1. Punjenje .....   | 22        |
| 5.1.2. Pražnjenje .....   | 23        |
| <b>5.2. Samsung INR18650-15M</b> .....  | <b>25</b> |
| 5.2.1. Punjenje .....   | 26        |
| 5.2.2. Pražnjenje .....   | 27        |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>6. ZAKLJUČAK.....</b> | <b>29</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>  | <b>31</b> |
| <b>SAŽETAK.....</b>      | <b>35</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>    | <b>36</b> |

# 1. UVOD

U današnje vrijeme litij-ionske baterije se koriste u gotovo svim proizvodima kojima je potrebno skladištenje energije. One predstavljaju bitni izvor energije koji svakodnevno koristimo i teško bi bilo zamisliti život bez njih. Napajaju brojne uređaje kao što su laptopi i mobilni uređaji, služe kao prijenosni punjači, te ih nalazimo i u električnim vozilima i sl.

Sve više se radi na postizanju što većih mogućnosti samih baterija i napredak je u posljednjih nekoliko godina ogroman. Skladištenje velike količine energije u što manje pakiranje postao je izazov za razne industrije, a samim time i otvaranje mogućnosti za razne inovacije. Potreba za povećanom proizvodnjom energije dovelo je i do potrebe za njenim skladištenjem. Obnovljivi izvori postaju sve zastupljeniji te se okreće „zelenim“ tehnologijama u proizvodnji energije iako se i dalje većina energije potrebne za naše svakodnevne djelatnosti proizvodi u termoelektranama, nuklearnim elektranama itd. Često skladištimo energiju proizvedenu pomoću obnovljivih izvora (sunca, vjetra, vode) jer ta energija nije uvijek dostupna kada je trebamo, a u elektroenergetskom sustavu u svakom trenutku proizvodnja energije mora biti jednaka potrošnji uvećanoj za gubitke.

Kako bi se bolje upoznali s tehnologijom litij-ionskih baterija, u nastavku rada će biti objašnjeno na koji način rade litij-ionske baterije, kakve su im karakteristike, imaju li štetne posljedice za okoliš, koje su pogodnosti, a koji nedostaci litij-ionskih baterija, gdje ih najčešće susrećemo itd.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Glavna zadaća ovog završnog rada biti će:

1. Opisati način rada litij-ionskih baterija
2. Definirati osnovne tehničke karakteristike litij-ionskih baterija
3. Istražiti utjecaj na okoliš
4. Analizirati i pregledati primjene litij-ionskih baterija

## 2. KAKO SU NASTALE BATERIJE

Pojava elektrokemijskih ćelija, tj. baterija, za skladištenje energije je bila revolucionarna za industrije i njihovo korištenje električne energije. Već 1749. godine se prvi puta pojavljuje riječ „baterija“ (engl. *battery*) kada je Benjamin Franklin pomoću nje opisao skup međusobno povezanih kondenzatora koje je koristio u svojim pokusima. Njegovi kondenzatori su zapravo bile staklene ploče prekrivene metalom sa svake strane.

Prvi galvanski članak konstruirao je Alessandro Volta 1800. godine na temelju pokusa kojeg je 1780. godine proveo Luigi Galvani. Naime, Galvani je tokom postupka seciranja žabe koja je bila pričvršćena za brončanu kuku dodirnuo vlažnu površinu žabe sa metalnim skalpelom te je došlo do trzanja kraka žabe. Galvani je to nazvao „životinjski elektricitet“ jer je mislio da se radi o kontrakciji noge. Volta je došao do drugog zaključka te navodi da je do grčenja došlo radi spajanja dva različita metala preko vlažnog posredstva. Njegova baterija je nudila stabilnu energiju i malu potrošnju u stanju mirovanja, ali nedostaci su bili u kratkom životnom vijeku i curenju elektrolita.

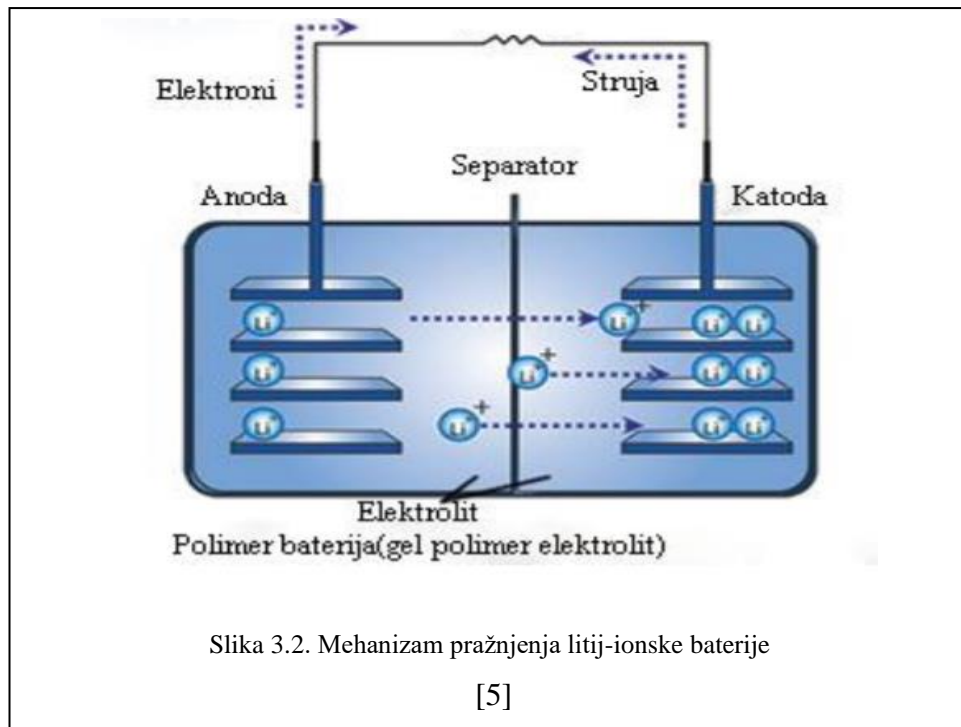
Godine 1859. se pojavila prva punjiva baterija koju je izumio Gaston Planté, a bila je teška i velika za količinu energije koju je nudila. Prvu tzv. „suhu“ bateriju ili cink-ugličnu bateriju je izumio Sakizo Yai koju koristimo i danas. Prva alkaloidna baterija je nastala 1899., a izumio ju je šveđanin Waldemar Jungner. Nikal-metal-hidridna baterija za manje uređaje se pojavila 1980.-ih te su bile izdržljivije i ekološki prihvatljivije od prijašnjih tehnologija.

Pojava litija u baterijama se dogodila 1990.-ih koji je omogućio da pomoću metala male gustoće dobijemo najveći mogući elektrokemijski potencijal. [1]





Dijelovi bitni za rad litij-ionskih baterija su prikazani na slici 2.1. na kojoj je prikazan mehanizam pražnjenja Li-ion baterije.



### 3.1.1. Katoda

U litij-ionskim baterijama, sastavni dio katodnog materijala je uvijek litij, ali u različitim oblicima kao što su:  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiNiO}_2$  i  $\text{LiFePO}_4$ . [7]



Prvoj generaciji katodnih materijala pripada litij-kobalt-oksidi ( $\text{LiCoO}_2$ ) uz druge okside metala, ali zbog njihove toksičnosti i visoke cijene kobalta dolazi do razvoja 2. generacije katodnih materijala. [9]

Drugo generaciji materijala za izradu katode pripada litij-mangan-oksidi ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) koji se istakao svojom ekološkom prihvatljivošću i pristupačnom cijenom. Njegova visoka razgradivost u elektrolitu uzrokuje pad kapaciteta baterije te je zbog toga ograničeno korištenje ovoga materijala. [10]

Treća generacija katodnih materijala se, za razliku od drugih tradicionalnih materijala, odlikuje stabilnošću, pristupačnom cijenom te energetskom prihvatljivošću. U nju ubrajamo litij-željezo-fosfat ( $\text{LiFePO}_4$ ) i njegove derivate. Unatoč pozitivnim stranama, postoji mala elektronska provodnost  $\text{LiFePO}_4$  i snižen koeficijent difuzije litijevih ( $\text{Li}^+$ ) iona što onemogućuje postizanje željenih radnih performansi materijala za katodu prilikom većih gustoća struje i predstavlja bitnu prepreku njegovoj široj primjeni te se na poboljšavanju njegove elektronske provodnosti neprekidno radi. [10]

### **3.1.2. Anoda**

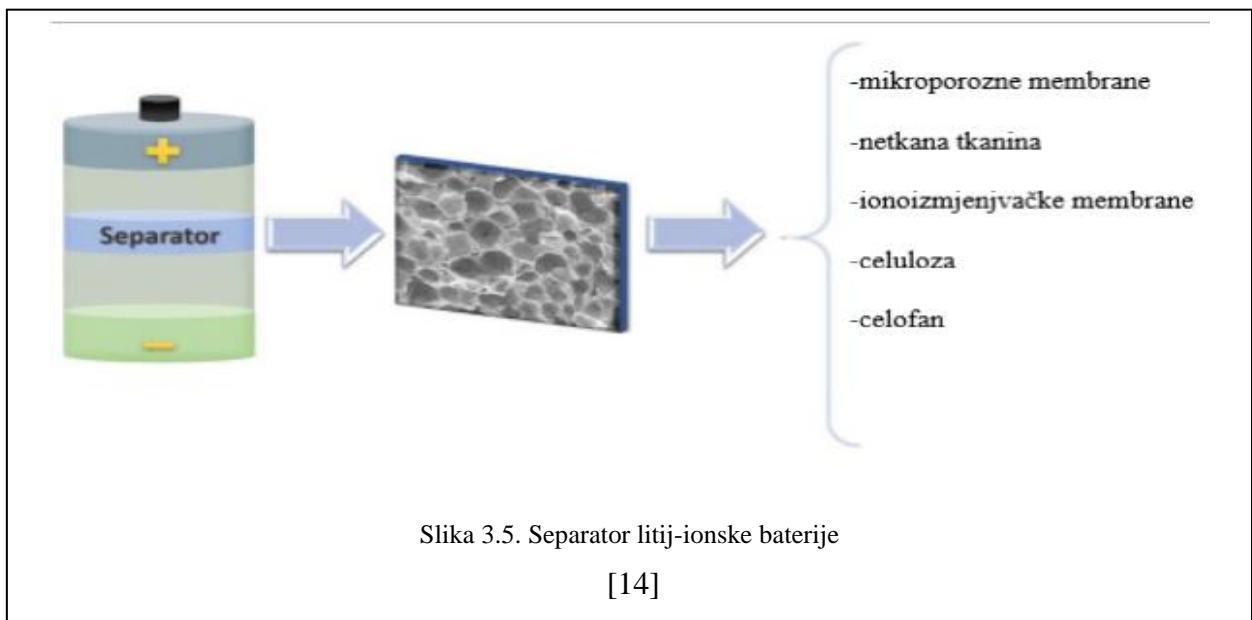
U početku razvijanja tehnologije litij-ionskih baterija, kao anoda se koristio čisti litij. Glavni razlog zašto to ne predstavlja dobro rješenje je što su Li-metal baterije bile u izravnoj vezi sa sigurnosti cijele baterije i s baterijinim kraćim vijekom trajanja te je moralo doći do promjena. Grafit zajedno sa bakrenom folijom koju obavija se kao materijal za anodu pojavljuje 1991. godine predstavljen kompanijom Sony. Ugljik ima više prednosti u odnosu na ostale anodne materijale, a neki od njegovih karakteristika su: poprilično niska cijena, dug vijek trajanja, uravnotežena gustoća energije i zastupljenost u okolišu. [10]

Zadnjih godina radi se na poboljšavanju radnih performansi i kapaciteta anodnog materijala u litij-ionskim baterijama. Nove vrste anodnog materijala su: ugljikova nanovlakna i nanocijevi, silicijev oksid, kositar, germanij, grafen, oksidi prijelaznih materijala, metalni sulfidi, nitridi itd. [11]



### 3.1.3. Separator

Separator predstavlja poroznu membranu koja onemogućava kratki spoj među elektrodama suprotnog naboja u jednoj ćeliji. Može biti izrađen od različitih vrsta materijala, a najčešće su to: celuloza, celofan, mikroporozne membrane tankog sloja izrađene od polimernih materijala, netkana tkanina i ionoizmjenjivačke membrane. [13]



Klasična litij-ionska ćelija je tipa 18650 te ta oznaka predstavlja njenu širinu (promjer) u milimetrima (18 mm) i duljinu u milimetrima (65 mm). Kod nje se koristi separatora površine otprilike 0,07 m<sup>2</sup> do 0,09 m<sup>2</sup>, što je otprilike 4% do 5% ukupne ćelijske mase. [15]

Separator prema elektrodnim materijalima i elektrolitu mora biti stabilan elektrokemijski i kemijski, treba biti prilagodljiv, imati željenu mehaničku čvrstoću, značajnu ionsku provodnost te željenu poroznost.

Osim navedenih zahtjeva, jedan od bitnih je cijena proizvodnje separatora. Ona velikim dijelom utječe na cijenu čitave baterije te se trenutno provode istraživanja usmjerena na nalaženje povoljnijih materijala i postupaka za proizvodnju separatora Li-ion baterija. [16]

#### **3.1.4. Elektrolit**

Omogućavanje efikasne difuzije iona Li između elektroda je osnovna i glavna uloga elektrolita kod tehnologije Li-ion baterija. Većina elektrolita su elektroliti koje nazivamo suhima u kojima se litij nalazi u obliku soli litij-heksafluoro-fosfata ( $\text{LiPF}_6$ ). Pomoću organskih karbonata je otopljen, zajedno sa etilen-karbonatom, dimetil-karbonatom, propilen-karbonatom, dietil-karbonatom i/ili etil-metil karbonatom. Te vrste elektrolita se koriste u tržišnim litij-ionskim baterijama. [17]

### **3.2. Osnovne tehničke karakteristike Li-ion baterija**

Među svim dostupnim vrstama punjivih baterija, litij-ionske trenutno imaju najbolje karakteristike.

Nekoliko značajnijih karakteristika baterija su:

- kapacitet (mAh),
- nominalni napon (V),
- minimalni napon pražnjenja (V),
- maksimalni napon punjenja (V),
- unutarnji otpor (Ohm),
- specifična snaga (W/kg),
- specifična energija (Wh/kg),
- C-faktor,
- stanje napunjenosti baterije,
- dubina ispražnjenosti baterije (%).

Kapacitet je mjera količine energije unutar baterije. [18] O vrsti aktivnih materijala u ćeliji što određuje kapacitet baterije u Ah ovisi količina energije koju sadrži elektrokemijski sastav.[19] Količina Ah nam prikazuje energiju koja se može povući iz pune baterije u specifičnim uvjetima pražnjenja. [20] Naprimjer, ako baterija ima kapacitet od 1 Ah, to znači da može davati struju pražnjenja od 1 A u vremenu od jednog sata. Struja koristi kapacitet baterije sve dok se napon ne snizi do određene vrijednosti (minimalnog dopuštenog napona) koja je definirana za svaku pojedinu ćeliju. [18]

Nominalni napon je naziv za karakteristični radni napon ili nazivni napon baterije. [20]

Minimalni napon pražnjenja (engl. *Cut-off voltage*) je određeni napon prilikom kojeg se pražnjenje baterije smatra cjelovitim. [20]

Maksimalni napon punjenja je određeni napon pri kojem se punjenje baterije smatra potpunim. [20]

Unutarnji otpor se opire prolaženju električne struje kroz ćeliju ili bateriju. [20] Što manji otpor, to je struja koja izlazi iz baterije veća.

Specifična snaga je omjer snage baterije ili ćelije prema njenoj masi (W/kg). [20]

Specifična energija je omjer izlazne energije baterije ili ćelije prema njenoj masi (Wh/kg). [20]

C-faktor govori kojom brzinom baterija može isprazniti čitav vlastiti kapacitet, odnosno koliko brzo se može isprazniti ili napuniti. [18] Povećavanjem C-faktora vrijeme pražnjenja se smanjuje, odnosno faktor 2C nam označava brzinu kojom će baterija se isprazniti za pola sata, dok faktor 1C označava da će se baterija isprazniti za jedan sat.

Stanje napunjenosti baterije (engl. *State of Charge*) je među najbitnijim parametrima baterije koji tumači njen učinak. Bitan je kod konstruiranja zaštite od prepunjavanja te njegovo precizno izračunavanje može produžiti životni vijek baterije radi ostvarivanja kvalitetnog korištenja baterije. [21]

Dubina ispražnjenosti baterije (engl. *Depth of Discharge*) je postotak ispražnjenog kapaciteta baterije iskazan kao postotak maksimalnog kapaciteta baterije. [22]

Nazivni napon litij-ionskih baterija je 3,6 V ili 3,7 V u usporedbi sa npr. NiMH baterijom čiji je nazivni napon 1,2 V, a sadrže gotovo dvostruko veću gustoću. [23]

Litij-ionske baterije imaju mali memorijski efekt, odnosno može se puniti ili prazniti u bilo kojem trenutku bez da se utječe na njen kapacitet i vijek trajanja za razliku od olovnih baterija koje se preporuča da se prazne samo do 50 % maksimalnog kapaciteta kako ne bi došlo do oštećenja. [23]

Dugotrajnost je jedan od velikih faktora za proizvođače baterija, a litij-ionske su pokazale da mogu izdržati oko 500 do 1000 čitavih ciklusa punjenja (od sasvim prazne do posve pune). [23]

Od svih ostalih vrsta punjivih baterija imaju također najveći kapacitet koji je moguće uskladištiti u svoje kućište.

Imaju sposobnost brzog punjenja te ne zahtijevaju održavanje. [24] Također, imaju nisku razinu samopražnjenja (od 2 % do 8 % mjesečno). Definira ih i visoka specifična energija (do 240 Wh/kg) i visoka energetska gustoća (640 Wh/L). [25]

Nešto što ne ide u korist litij-ionskim baterijama je osjetljivost na prepunjavanje i pretjerano pražnjenje. Ako se poveća napon baterije iznad dopuštenog (oko 4,3 V), ona prelazi u nestabilno stanje te se u njoj se povećava tlak zbog ispuštanje ugljičnog dioksida. Nastavljanjem punjenja, baterija se napuhuje, sigurnosna membrana prsne i zapali se. [26]

Termalni pobjeg (engl. *thermal runaway*) je uzrok povećanja temperature i zbog toga dolazi do zapaljivanja baterije. Kako bi spriječili prepunjavanje ili pretjerano pražnjenje koji uzrokuju smanjenje kapaciteta baterija, koristimo elektroničke uređaje. [26]

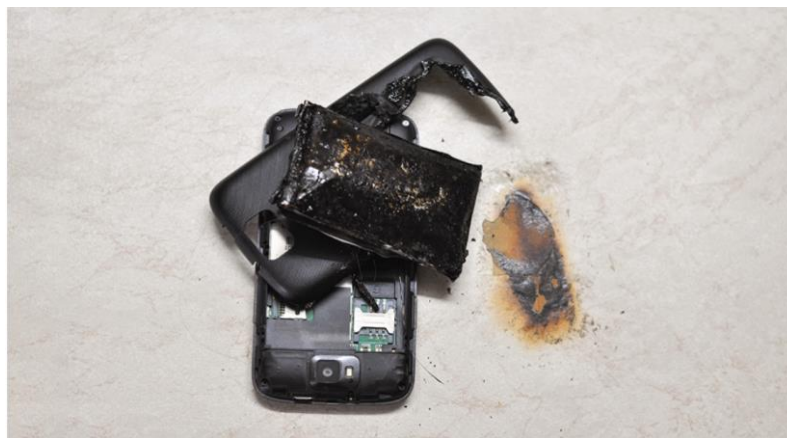
Kapacitet koji izgubimo skladištenjem se dijeli na 2 tipa: trajni i reverzibilni. Trajnom gubitku kapaciteta je nemoguće vratiti kapacitet, a reverzibilni se izgubi tokom skladištenja te se može vratiti ponovnim punjenjem.

### 3.3. Utjecaj na okoliš

Li-ion baterije sadržavaju veliku količinu komponenti i materijala, također i neke koje se smatraju opasnim tvarima, ali i nekolicinu koje smatramo iznimno bitnima u vidu sekundarnih sirovina.

#### 3.3.1. Zaštita okoliša i recikliranje

Neprijmjereno odlaganje litij-ionskih baterija može uzrokovati štetu ljudima i okolišu. Litij-ionske baterije se ne odlažu kao i ostali komunalni otpad jer lako dođe do samozapaljivanja i eksplozije baterije usred kratkog spoja ili neke vrste strukturnog oštećenja jer su burne reakcije litija sa vodom ili zrakom.



Slika 3.6. Posljedice pregrijavanja i eksplozije litij-ionske baterije

[27]

Takva pojava zbog lošeg zbrinjavanja može dovesti do požara na odlagalištu i emisije štetnih plinova u atmosferu. Plinovi koje ispuštaju pregrijane i zapaljene Li-ion baterije su kancerogeni i toksični, a razlog tome je materijal za izradu katode.



Masa Li-ion baterija koje u današnje vrijeme se ugrađuju u vozilima na električnu energiju je od 300 kg do 600 kg, a njihov životni vijek im je oko deset godina ili pri padu kapaciteta do 20% se preporuča mijenjanje baterije. [28] Baterije vozila na električnu energiju čine veći izvor vrijednih metala kao što su: litij, kobalt, aluminij i bakar za razliku od Li-ion baterija koje koristimo za mobilne uređaje i prijenosna računala. S time se povećava i količina otpada ako se nakon prestanka korištenja ne recikliraju.

Postupak reciklaže istrošenih ili neispravnih baterija je obrada materijala iz baterija koji nisu više mogući za korištenje u proizvodnom postupku, u prvobitnu ili u drugu svrhu osim uporabe u energetske svrhu. [29]

Reciklaža istrošenih baterija ima brojne prednosti, a neke su:

- smanjivanje otpada koje nalazimo na odlagalištu
- održanje prirodnih energenata
- štedi energiju
- smanjivanje ispuštanja stakleničkih plinova
- stvaranje novih proizvoda pomoću recikliranih materijala [30]

Litij-ionske baterije se prerađuju posebnim mehaničkim procesom pri sobnoj temperaturi bez prisustva kisika tokom kojeg se baterijske komponente odvajaju do krajnjih proizvoda. Ti proizvodi su:

- Co (kobalt) i soli litija,
- nehrđajući čelik,
- Cu (bakar),
- Al (aluminij),
- plastika.

Svi navedeni proizvodi se nakon procesa recikliranja stavljaju na tržište i koriste u drugim proizvodima. Sve komponente Li-ion baterija su pogodne za reciklažu. [10]

### 3.3.2. Sekundarne sirovine

Brojna istraživanja na temu recikliranja iskorištenih litij-ionskih baterija se bave postizanjem cilja za dobivanje što veće količine kobalta, litija, bakra, aluminijske, mangana, nikla i sl. zbog povećane cijene materijala koje nalazimo u baterijama.

**Tablica 3.1.** Komponente litij-ionskih baterija i njihove cijene u \$/kg u 2021. godini [31]

| <b>Materijali</b> | <b>Prosječna cijena (\$/kg)</b> |
|-------------------|---------------------------------|
| Aluminij (Al)     | 2,6705                          |
| Litij (Li)        | 14,278                          |
| Kobalt (Co)       | 50,430                          |
| Bakar (Cu)        | 9,5129                          |

Reciklaža baterija koje više nisu za korištenje može biti zamjena za eksploataciju i oplemenjivanje pojedinačnih mineralnih sirovina i njihovu metaluršku obradu. Daljnjim razvojem tehnologija reciklaže i potreba za manjim količinama sirovina u rudnicima će doći do pojeftinjenja recikliranja, a time i do isplativijeg recikliranja od eksploatacije mineralnih sirovina. [32]

### 3.3.3. Zakonska regulativa

Prema Pravilniku o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima te Direktivom 2006/66/EZ donesene su odluke o održivom gospodarenju otpadom pomoću kojeg se navodi da se pod djelatnosti upravljanja otpadom ubraja sakupljanje, prijevoz, uporaba, zbrinjavanje i ostale obrade otpada, nadgledanje tih postupaka i restrikcije provedene na područjima nakon zbrinjavanja otpada, te poduzete radnje trgovaca ili posrednika. [33]

Upravljanje iskorištenim ili neispravnim baterijama i akumulatorima započinje proizvođačima čija je dužnost informiranje korisnika na koji način ispravno postupiti sa otpadnim baterijama i akumulatorima te ih upoznati sa saznanjima o:

- mogućim efektima koje tvari zastupljene u baterijama i akumulatorima imaju na ljudsko zdravlje i okoliš
- obavezi odvajanja takvih baterija i akumulatora prilikom prikupljanja
- pomoći krajnjih korisnika pri reciklaži baterija i akumulatora koje nisu za korištenje.

Takve baterije koje više nisu u mogućnosti biti upotrijebljene trebaju biti vraćene osobama koje su zadužene za njihovo pravilno skladištenje, zbrinjavanje i recikliranje. [29]

U zemljama europske unije definirano je gospodarenje baterijama i akumulatorima koje smatramo otpadnim pomoću Direktive 2006/66/EZ o baterijama i akumulatorima te o baterijama i akumulatorima za otpad. [29]

Direktivom 2006/66/EZ iz 2006. godine je određeno da članice EU trebaju postići minimalnu godišnju stopu sakupljanja potrošenih baterija i akumulatora od 25 % do 2012. i 45 % do 2016. [34]

Sukladno tome, reciklaža baterija i akumulatora određuje se kao obrada potrošenih ili neispravnih baterija i akumulatora za stvaranje proizvoda kojima je moguće ponovno se koristiti za dobivanje baterija i akumulatora ili za ostale svrhe. Prerada otpada u materijale koje možemo koristiti kao gorivo nije omogućena navedenom direktivom. [34]

Svrha sustava upravljanja potrošnim baterijama i akumulatorima je umanjivanje nepovoljnih efekata na prirodu. [34]

Želi se uspostaviti sustav sakupljanja, obrade i određenog nivoa reciklaže te funkcionalne uporabe i/ili ispravnog skladištenja preostalog dijela nakon obrade i reciklaže potrošenih ili neispravnih baterija i akumulatora usprkos njihovoj masi, volumenu, obliku i materijalima od kojih su proizvedeni. Ispravna reciklaža omogućuje uklanjanje štetnih supstanci poput kadmija, olova i žive iz komunalnog otpada te dobitak značajnih energenata koji se ponovno mogu iskoristiti u nastavku obrađivanja.

### 3.4. Primjena litij-ionskih baterija

Primjena litij-ionskih baterija je vrlo široka i koriste se u brojnim industrijama kao što su:

- automobilska industrija,
- industrija mobilnih uređaja,
- Elektronička industrija itd.

Koristimo ih za pokretanje mobilnih uređaja, tableta, laptopa, električnih vozila, električnih alata, medicinske opreme i sl. Tehnologiju litij-ionskih baterija i njihov napredak trenutno najviše susrećemo u automobilskoj industriji koja iz dana u dan dolazi do sve većih postignuća i usavršavanja litij-ionskih baterija i njihovih performansi.

#### 3.4.1. Primjena kao neprekidno napajanje(engl. UPS - *Uninterruptible Power Supply*)

Imati tehnologiju skladištenja energije pomoću litij-ionskih baterija je od velike koristi u hitnim situacijama ukoliko dođe do prekida opskrbe električnom energijom u određenom razdoblju, kratkog spoja ili nekog drugog događaja koji može utjecati na isporuku električne energije do mjesta u kojem je ona nužna. [35]

UPS omogućuje gotovo trenutno električnu energiju potrebnu za pokretanje npr. servera, alata ili medicinskih uređaja ili njihovo sigurnosno gašenje te se u tome razlikuje od klasičnog generatora. [35]



Slika 3.7. UPS napajanje

Izvor: [36]

### 3.4.2. Primjena za električna vozila

Kao prijenosno skladište električne energije bilo za vozila na velike udaljenosti ili kraće relacije, moramo imati potpuno povjerenje i sigurnost u bateriju pomoću koje će se vozilo pokretati i omogućiti obilazak udaljenih mjesta. Dugačak vijek trajanja omogućuje bezbrižno korištenje električnih vozila uz minimalno smanjenje kapaciteta u periodu između 7 i 10 godina. [35]



Slika 3.8. Baterija električnog vozila

[37]

Na slici 8.1. prikazano je pakiranje litij-ionskih baterija koje se izravno koriste kao napajanje za električna vozila. Ovisno o potrebnom napajanju moguće je više pakiranja povezati i omogućiti veći kapacitet potreban za veća i/ili brža vozila, ali također utjecati na samu udaljenost koju vozilo može prijeći bez potrebe punjenja.

Električna vozila koja su postala novo normalno zahvaljujući implementaciji litij-ionskih baterija su električni bicikl, električni romobil, električni skuter/motocikl, električni automobili, hibridni automobili itd.

Razlika između potpuno električnog automobila i hibridnog je što se električni automobil može puniti na neki vanjski izvor (utičnica, punionica za električna vozila i sl.), dok se baterija kod hibridnog vozila ne može puniti vanjskim izvorom nego samo regenerativnom energijom kočenja i pomoću motora sa unutrašnjim izgaranjem. U današnje vrijeme pojavljuju se i priključni hibridi koje je potrebno puniti baš kao električne automobile jer imaju baterije većeg kapaciteta od običnog hibridnog vozila. Na taj način se povećava domet vožnje samo na električnu energiju.

### 3.4.3. Primjena kao skladište energije proizvedene pomoću obnovljivih izvora

Proizvodnja energije pomoću obnovljivih izvora sve je više zastupljena i pokušava se sve više prijeći na alternativne metode proizvodnje električne energije.

Solarni sustavi su sve zastupljeniji kako u industrijskim postrojenjima tako i u domaćinstvima. Mogućnost iskorištavanja sunčevog zračenja i pretvaranja takvog oblika energije u električnu energiju svakako znači biti manje ovisan o neobnovljivim izvorima energije kojih je sve manje i manje. Kako bi mogli imati što bolju iskorištenost sunčeve energije, koristimo spremnike energije u obliku litij-ionskih baterija. To nam omogućuje da tokom dana iznimnog sunčevog zračenja možemo uskladištiti proizvedeni višak električne energije kojeg kasnije možemo iskoristiti tokom dana kada sunčeva svjetlost ne bude dovoljna za pokrivanje dnevnih potreba. [35]

### 3.4.4. Primjena kao prijenosni punjači

Zbog mogućnosti punjenja te malih dimenzija i težine, litij-ionske baterije su izvor za rad laptopa, tableta, mobilnih uređaja koje svakodnevno koristimo. Jedna od uloga litij-ionskih baterija je da posluži kao dodatni izvor napajanja kada nam ugrađena baterija u našim uređajima nije dovoljno velikog kapaciteta, a nemamo pristup utičnici da bi spojili bateriju unutar uređaja na punjenje. Vrlo malih dimenzija možemo pronaći prijenosne baterije (Slika 9.1.) koje su u mogućnosti napuniti određene uređaje (laptose, mobilne uređaje i sl.) više puta u punim ciklusima. [35]



Slika 3.9. Prijenosne baterije

[38]

## **4. BUDUĆNOST LITIJ-IONSKE TEHNOLOGIJE**

Litij-ionske baterije postižu sve veće tehnološke napretke iz godine u godinu. Iako se radi na novim tehnologijama koje bi potencijalno mogle zamijeniti ovu vrstu tehnologije skladištenja energije, litij-ionska tehnologija će sigurno biti najzastupljenija idućih nekoliko godina.

### **4.1. Nova generacija litij-ionskih baterija**

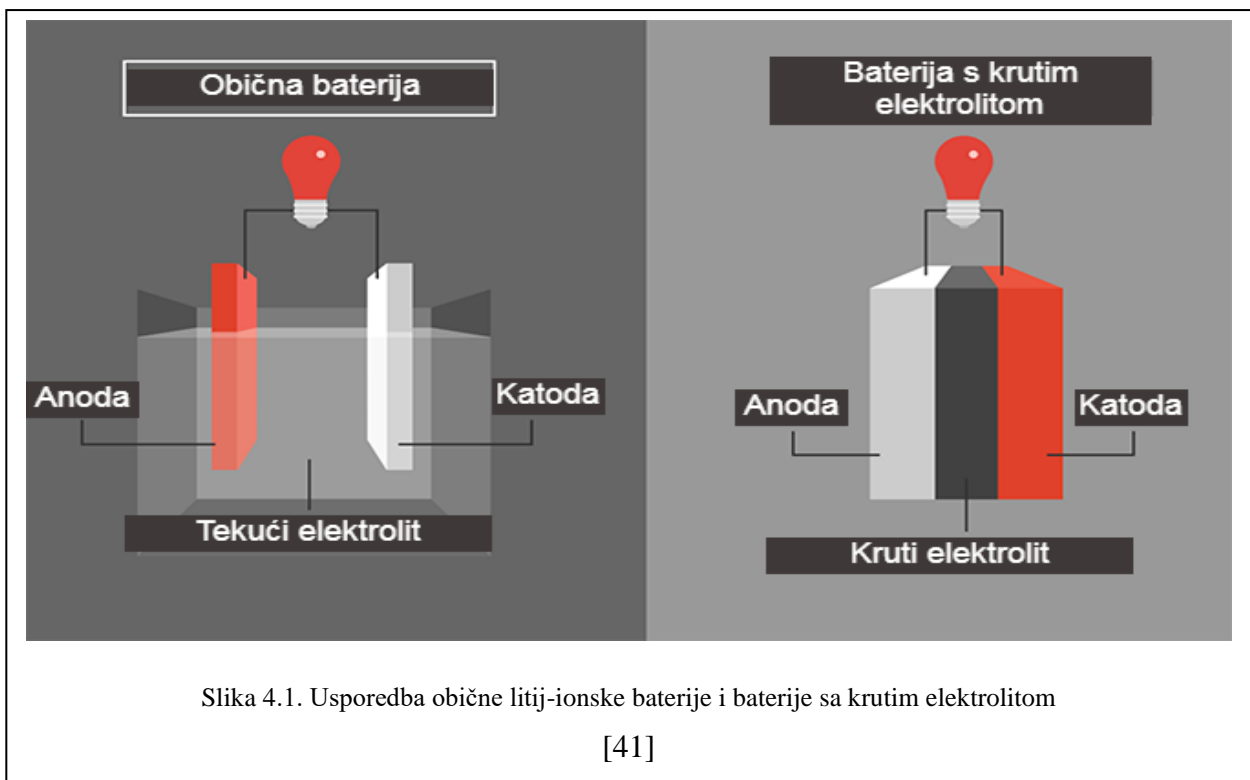
Istraživanja na trenutnim litij-ionskim baterijama doseći će svoj vrhunac u narednim godinama. Zbog tehnoloških ograničenja materijala koji se koriste za proizvodnju litij-ionskih baterija, već su započela brojna istraživanja u svrhu nalaženja zamijene za navedenu tehnologiju koja dominira današnjicom. Također, došlo je i do poboljšanja u već postojećim litij-ionskim baterijama te se pomoću novih spojeva omogućuje skladištenje još više energije unutar jednakog volumena, odnosno postigla se još veća energetska gustoća. Dodatno smanjenje pražnjenja baterija u stanju mirovanja, duži vijek trajanja i povećan broj ciklusa punjenja i pražnjenja doprinosi činjenici da će Li-ion tehnologija biti vodeća tehnologija skladištenja energije još nekoliko godina. [39]

### **4.2. Litij-sumporne baterije**

Litij-sumporne baterije koriste lakše aktivne materijale, odnosno sumpor u katodi i litij kao anoda. Teoretska energetska gustoća ove tehnologije je veoma visoka, čak četiri puta veća od litij-ionskih baterija. Zbog toga predstavlja adekvatno rješenje u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Unatoč poboljšanju performansi, cijena bi također trebala biti manja ako uzmemo u obzir da su sirovine korištene za proizvodnju baterija presudni trošak. Sumpor zamjenjuje nikal-kobalt katodu te se smatra otpadnim proizvodom kojeg možemo pronaći lakše od prethodno navedenih sirovina. Ekološki ih smatramo boljima jer mogu koristiti sumpor proizveden u naftnoj industriji koji se reciklira te može biti upotrijebljen za proizvodnju baterija. Mnoge prepreke u istraživanju ove tehnologije su već savladane, ali i dalje postoje kao što su sama stabilnost baterije te se ćelija ubrzano troši. Patenti za taj problem već postoje i očekuje se komercijalizacija ovih vrsta baterija kroz nekoliko godina kako bi bile u potpunosti sigurne za plasman na tržište. [39]

### 4.3. Baterija s krutim elektrolitom

Kod baterija s krutim elektrolitom, tekući elektrolit koji se inače koristi u litij-ionskim baterijama je zamijenjen krutim spojem koji također omogućuje gibanje litijevih iona. Zahvaljujući brojnim istraživanjima postigla se ionska provodljivost krutog elektrolita skoro jednakog kao tekući elektrolit. Kruti elektrolit ima veoma veliku prednost u odnosu na tekući ako gledamo sa stajališta sigurnosti. Kruti elektrolit izložen visokoj temperaturi ne može se zapaliti te ga smatramo revolucionarnim rješenjem u automobilskoj industriji kao zamjena za litij-ionske baterije koje su podložne termalnom pobjegu. Također, kruti elektrolit omogućuje uporabu novih spojeva i materijala kako bi se postigla još veća energetska gustoća, vijek trajanja baterije, veći naponi te manje pražnjenje u stanju mirovanja same baterije. Visokim faktorom snage prema težini baterije, postiže se idealna baterija koju možemo primijeniti u automobilskoj industriji kako bi dobili bolje performanse električnih vozila pri manjoj cjelokupnoj težini baterija i cjelokupnog vozila. [39] Minimalna poboljšanja u tehnologiji baterija imaju veliki utjecaj radi sve većeg interesa za električna vozila te povećani broj novih konkurenata na tržištu proizvođača električnih vozila. Moguće povećanje u specifičnoj energiji koju trenutno nude litij-ionske baterije od 50% do 100% značajno je za nastavak istraživanja. Istraživanja također uključuju određivanja materijala koji su najefikasniji, jeftinije postupke izrade, određivanje separatora itd. [40]





## 5. PUNJENJE I PRAŽNjenje LI-ION BATERIJA

Na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku su provedena mjerenja punjenja i pražnjenja litij-ionskih baterija u sklopu praktičnog dijela rada. Uređaj kojim je obavljeno punjenje i pražnjenje baterija se zove Junsu iCharger 4010 Duo koji je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1. Junsu iCharger 4010 Duo

Uređaj omogućuje punjenje/pražnjenje na dva odvojena kanala strujom do 40 A. Pomoću njega možemo puniti ili prazniti baterije različitih tehnologija, a neke od njih su: litij-ionske (Li-ion), litij-polimerne (Li-Po), litij-željezo-fosfatne (Li-Fe), nikal-metal-hibridne (NiMH), nikal-kadmijeve (Ni-Cd) i olovne (Pb).

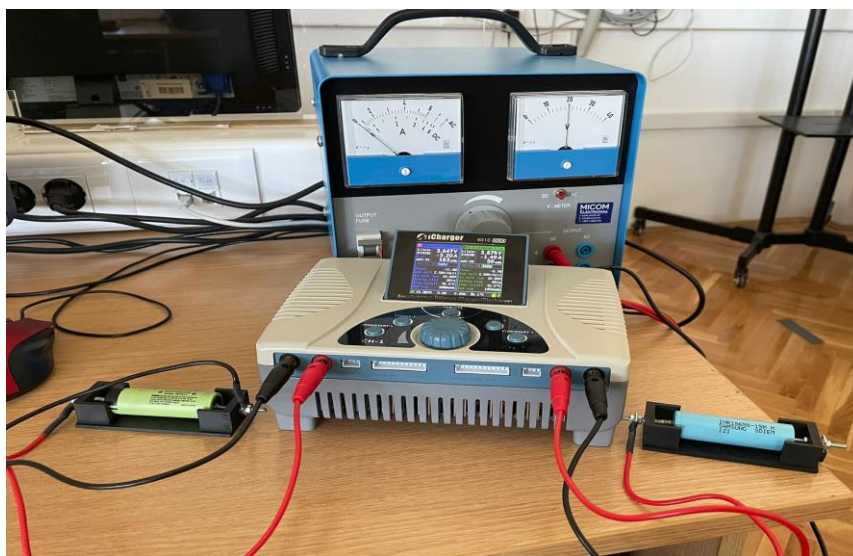
Prije punjenja/pražnjenja ovim uređajem, potrebno je odabrati koja se tehnologija baterija koristi. U uređaj se unosi ukupni kapacitet baterije, vršni napon punjenja te struja punjenja baterije. Način na koji se odvija punjenje je takav da u početku punjač puni bateriju strujom punjenja koju smo odabrali te tu vrijednost održava konstantnom (CC - engl. *constant current*) do trenutka kada napon postigne svoju gornju graničnu vrijednost. Tada dolazi do promjene iz konstantne struje CC u konstantni napon CV ( engl. *constant voltage*) te dolazi do postepenog smanjivanja vrijednosti struje. Punjač će prekinuti punjenja kada struja punjenja padne do određene vrijednosti postotka podešene struje punjenja.

Prilikom pražnjenja baterije potrebno je unijeti podatke o kapacitetu baterije, željenu struju pražnjenja te donji napon pražnjenja. Prvo se baterija prazni konstantnom strujom pražnjenja dok napon baterije ne padne do donjeg napona pražnjenja. Napon pražnjenja tada postaje konstantan

te struja pražnjenja opada i uređaj se isključuje kada struja padne do određene vrijednosti postotka podešene struje pražnjenja.

Junsi iCharger 4010 Duo se priključuje na istosmjerni izvor napajanja te omogućuje spajanje baterija na dva dostupna kanala. Prilikom postavljanja baterija potrebno je paziti na polaritet, odnosno kako ih stavljamo u držače jer će se u suprotnom pojaviti pogreška. Nakon spajanja na istosmjerni izvor i priključivanja baterija na kanale, USB kabelom spajamo uređaj sa računalom. Pomoću softverskog programa Logview moguće je pratiti karakteristike u stvarnom vremenu kao što su: napon, struja, kapacitet, snaga itd. Prvo se postavlja snimanje karakteristika za oba kanala u softveru te nakon toga pokreće proces punjenja ili pražnjenja na punjaču. Kada punjač izvrši zadanu operaciju, zaustavlja se snimanje te je potrebno u programu zaustaviti snimanje karakteristika kako bi se omogućilo prebacivanje podataka u Excel za daljnju obradu rezultata.

Uz navedeni uređaj koji je glavni za obavljanje praktičnog dijela rada, korišten je i vanjski izvor METREL Power supply MA 4853, vodiči, držači baterija te dvije vrste litij-ionskih baterija: Panasonic NCR18650B i Samsung INR18650-15M.



Slika 5.2. Punjač priključen na istosmjerni izvor te dvije baterije priključene na njegova dva kanala

U ovome praktičnom radu odrađeno je punjenje i pražnjenje baterija Panasonic NCR18650B i Samsung INR18650-15M te će rezultati mjerenja biti opisani u nastavku.

## 5.1. Panasonic NCR18650B

Istovremeno se odrađivalo punjenje/pražnjenje obje baterije sa postavljenim različitim parametrima. Ova baterija je kapaciteta 3250 mAh, nazivnog napona 3,6 V, vršnog napona punjenja 4,2 V, maksimalne struje punjenja 1,625 A, nazivne struje pražnjenja 0,65 A, donjeg napona pražnjenja 2,5 V, maksimalne struje pražnjenja 6,5 A, specifične energije 243 Wh/kg te gustoće energije 676 Wh/l.

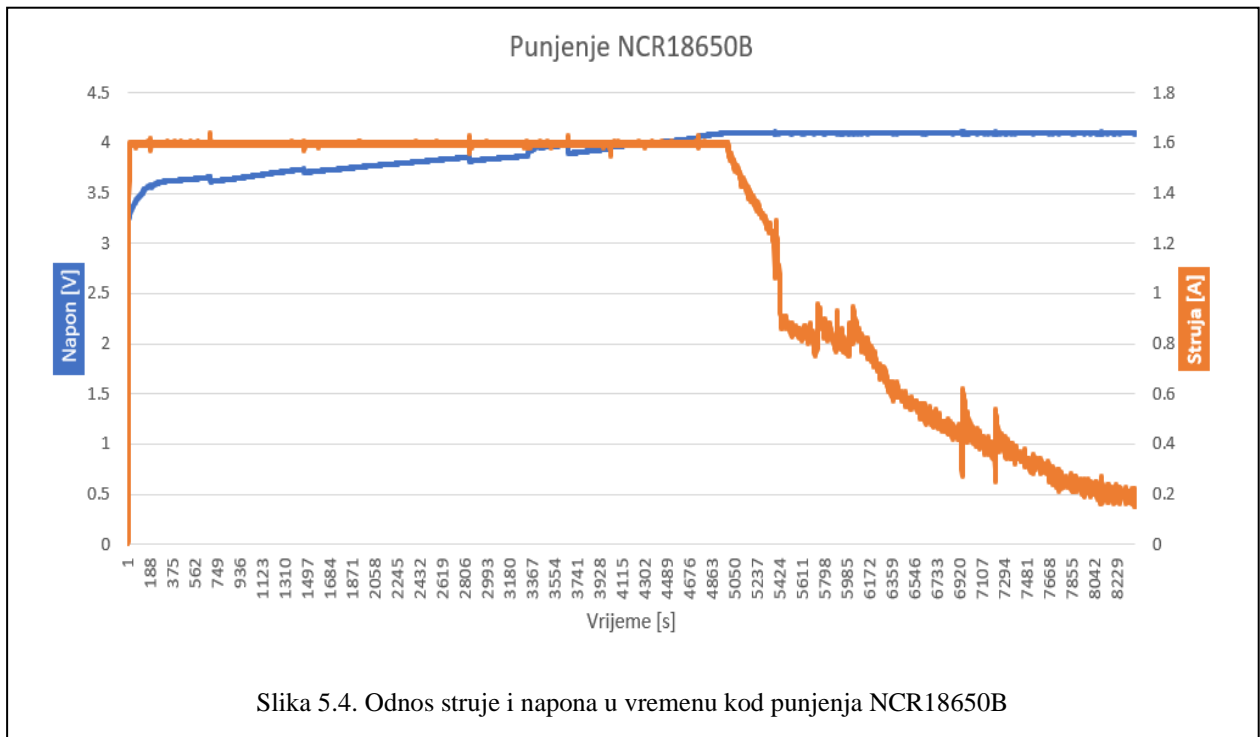


Slika 5.3. Panasonic NCR18650B

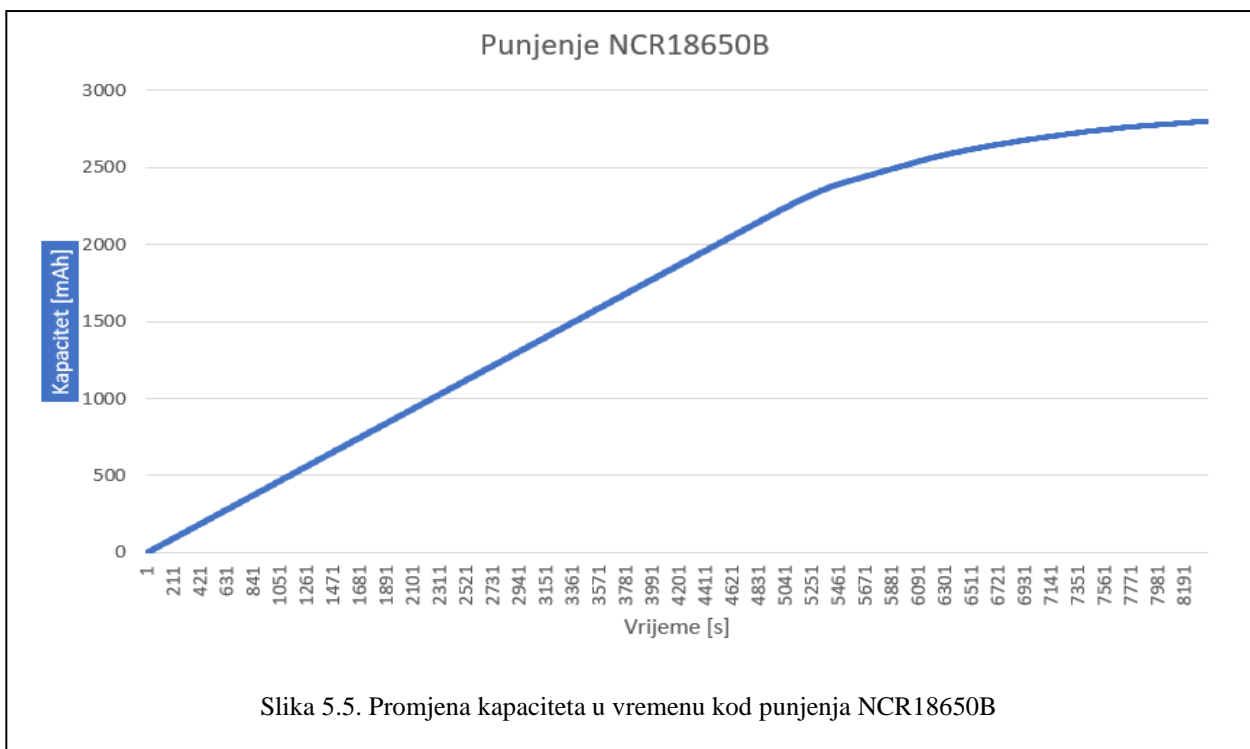
Navedena baterija se punila strujom punjenja od 1,6 A što odgovara 0,5C faktoru punjenja, a napon pri kojemu je struja počela opadati iznosio je 4,1 V te održavao tu vrijednost do prestanka punjenja. Struja kojom je pražnjena baterija iznosila je 3,2 A (1C), a minimalni napon pražnjenja je iznosio 2,5 V.

Grafički će biti prikazan odnos struje i napona u vremenu, promjena kapaciteta u vremenu te promjena snage u vremenu za cikluse punjenja i pražnjenja baterije.

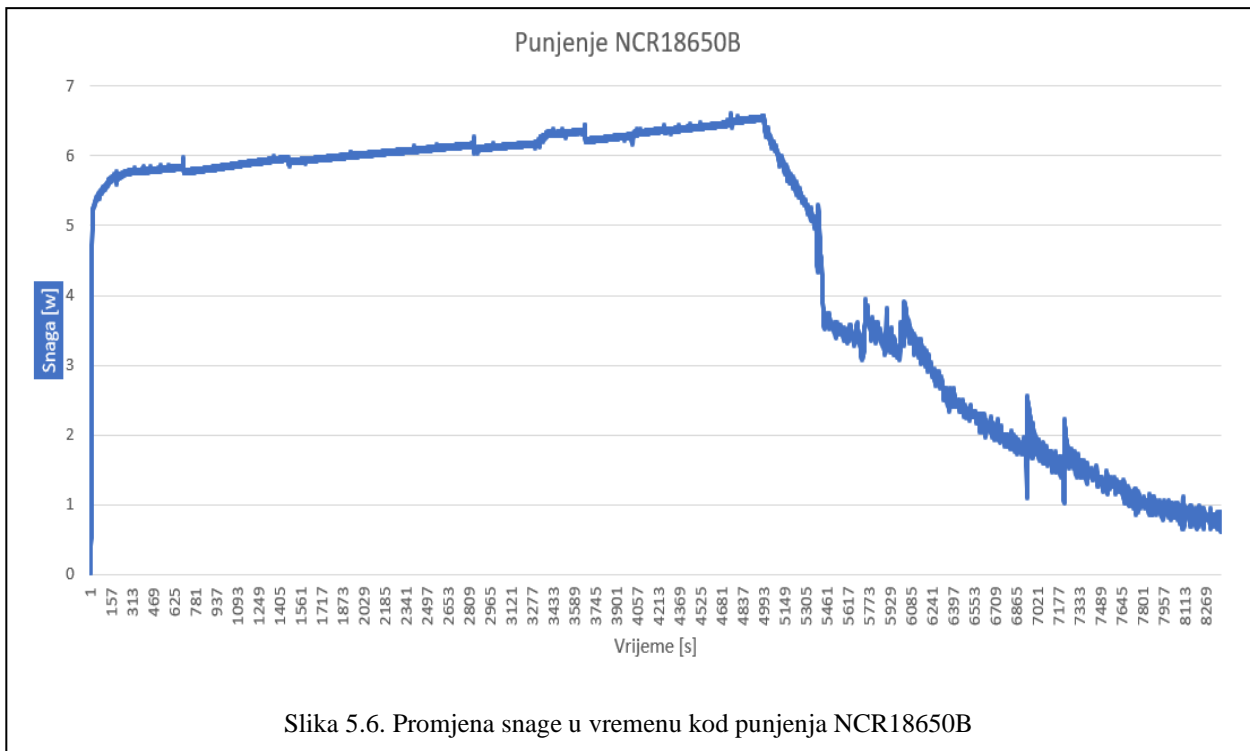
### 5.1.1. Punjenje



Na grafu se vidi da se baterija punila konstantnom strujom od 1,6 A (0,5C) sve dok napon nije došao do svoje vršne vrijednosti. Tada napon postaje konstantan, a struja počinje padati.

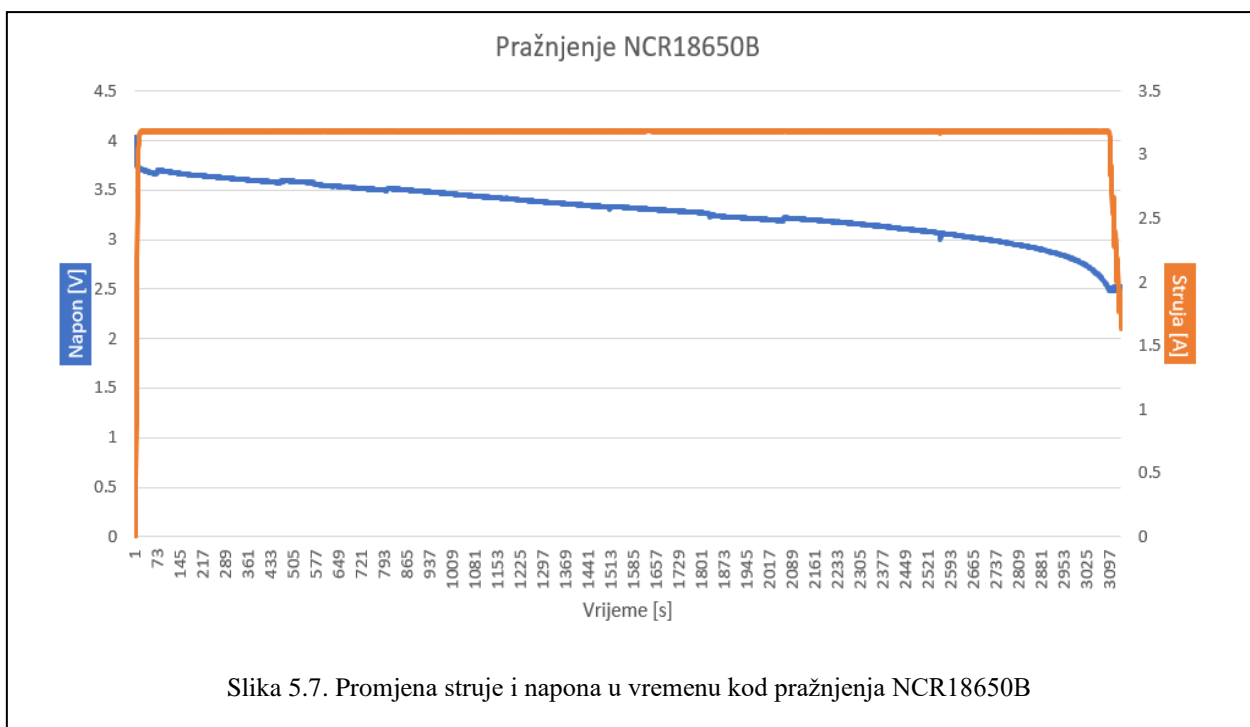


Kapacitet baterije se u vremenu linearno povećavao do trenutka kada napon postaje konstantan, a zatim se povećava u obliku parabole malog nagiba.

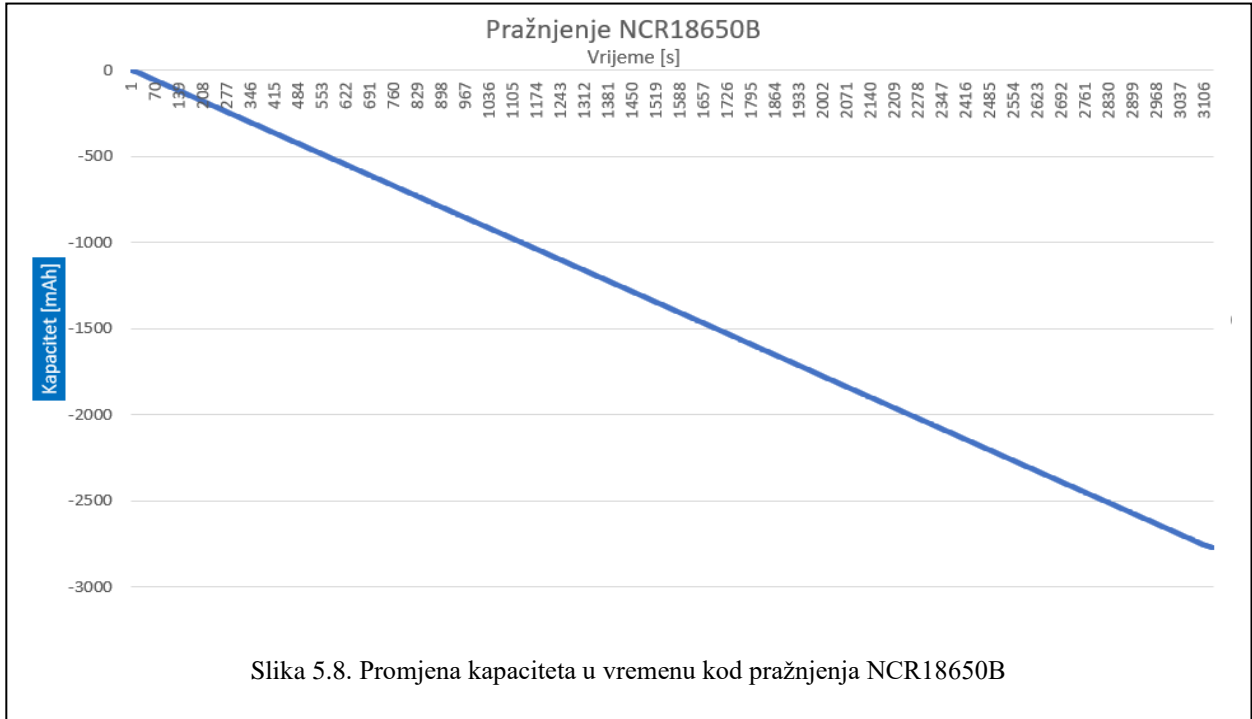


Linearan porast snage u početku punjenja je uzrok linearnog porasta napona i konstantne struje. Snaga predstavlja umnožak napona i struje te počinje padati kada napon postane konstantan i struja započne opadati. Snaga proporcionalno ovisi o struji i naponu, odnosno povećavanjem struje/napona povećavat će se i snaga.

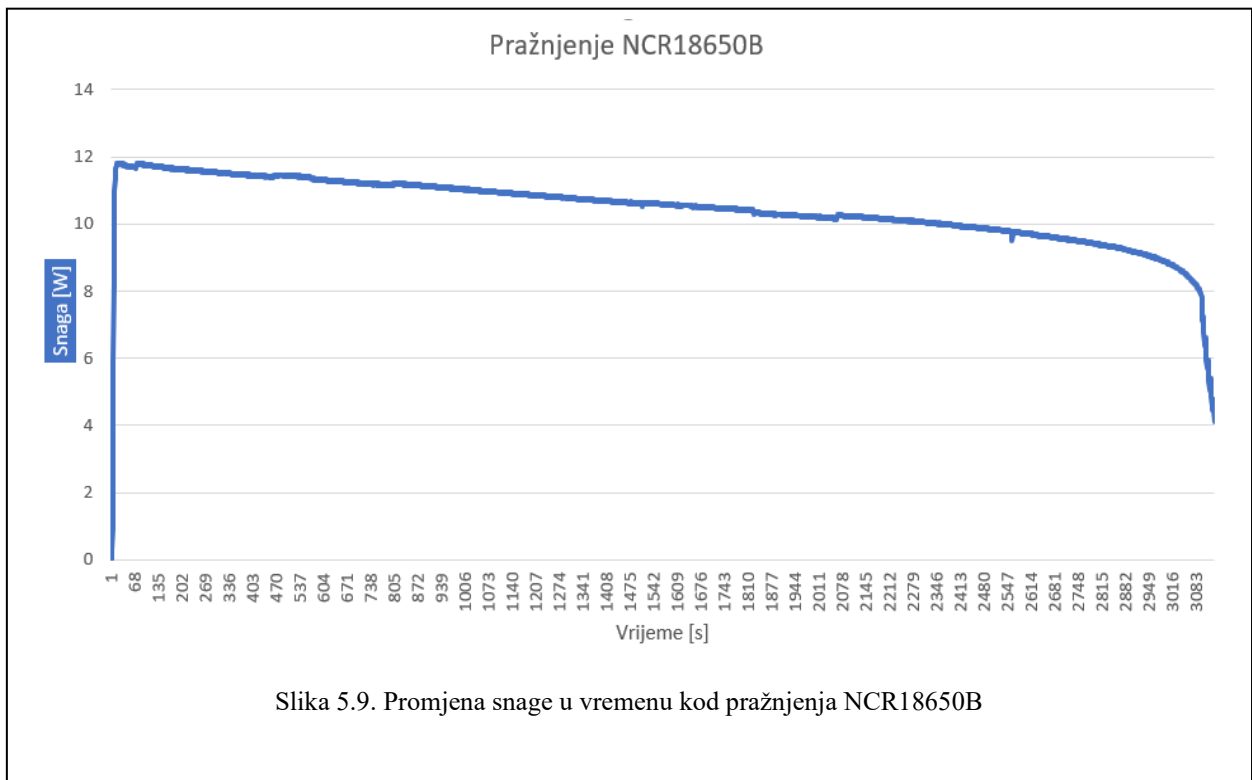
### 5.1.2. Pražnjenje



Napon pražnjenja pada linearno do vrijednosti donjeg napona pražnjenja od 2,5 V, a struja pražnjenja ostaje konstantna 3,2 A do trenutka kada se baterija isprazni, odnosno jednaka onoj vrijednosti koja je na početku pražnjenja unesena u uređaj.



Kod pražnjenja baterije Panasonic NCR18650B kapacitet u vremenu linearno pada.



Snaga linearno pada jer je konstantna struja pražnjenja, a napon linearno pada prilikom pražnjenja baterije.

## 5.2. Samsung INR18650-15M

Baterija Samsung INR18650-15M je kapaciteta 1500 mAh, nazivnog napona 3,6 V, vršnog napona punjenja 4,2 V, maksimalne struje punjenja 0,75 A, nazivne struje pražnjenja 0,3 A, donjeg napona pražnjenja 2,5 V, maksimalne struje pražnjenja 23 A, specifične energije 120 Wh/kg i gustoće energije 318 Wh/l.

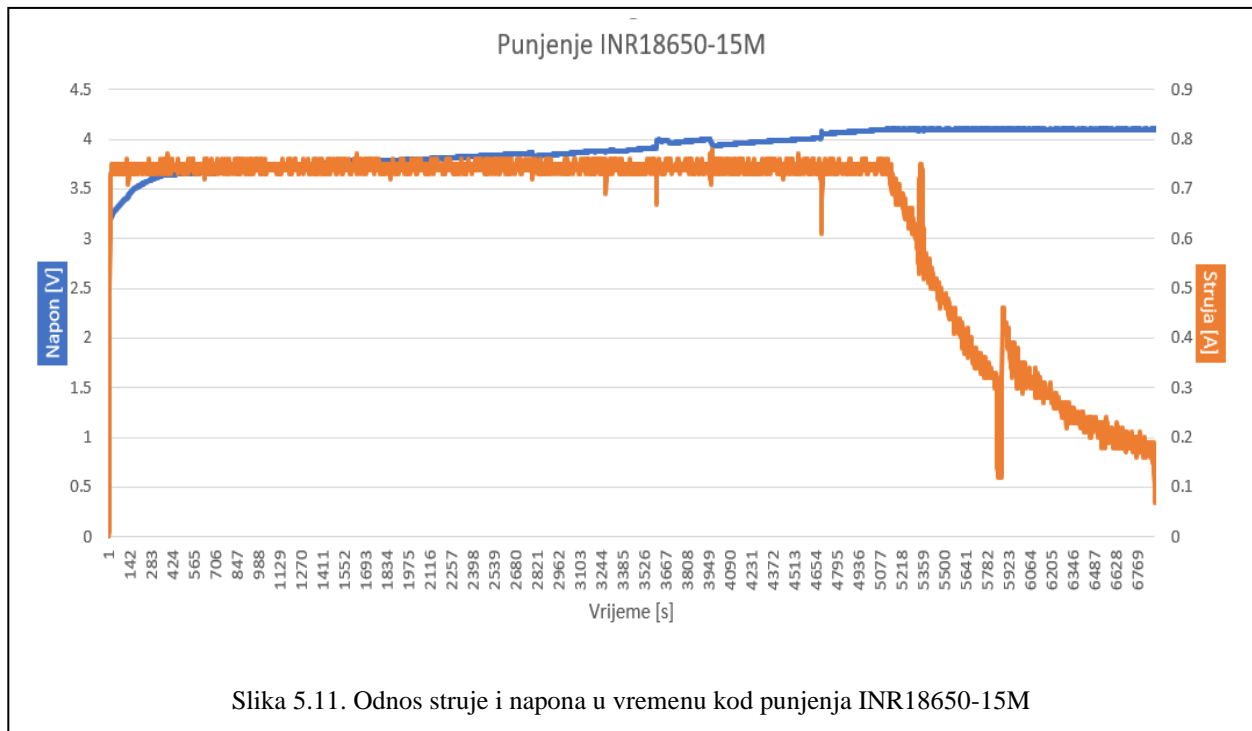


Slika 5.10. Samsung INR18650-15M

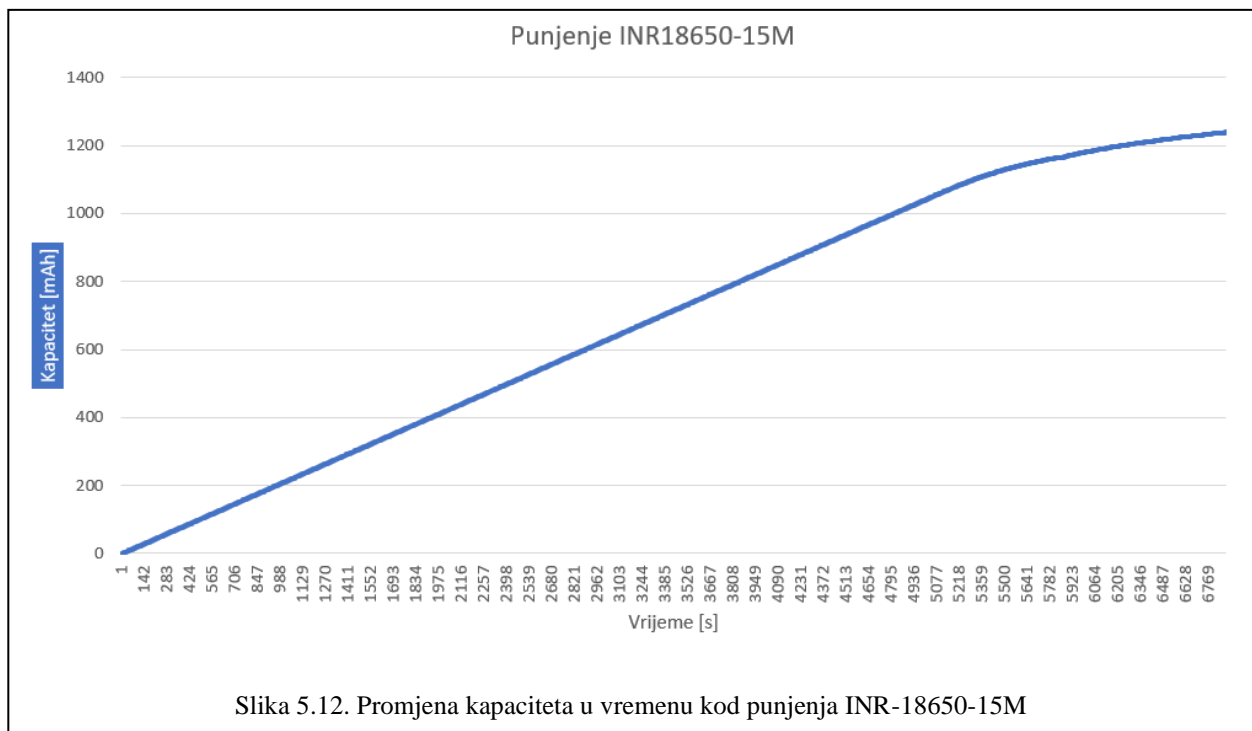
Baterija na slici 5.10. se punila strujom 0,75 A (0,5C), a napon pri kojemu je struja počela opadati iznosio je 4,1 V. Struja pražnjenja baterije iznosila je 1,5 A (1C), a minimalni napon pražnjenja je iznosio 2,5 V.

Rezultati dobiveni mjerenjima će biti prikazani grafički i to ovisnosti struje i napona o vremenu, promjena kapaciteta u vremenu i promjena snage u vremenu za cikluse punjenja i pražnjenja baterije.

### 5.2.1. Punjenje

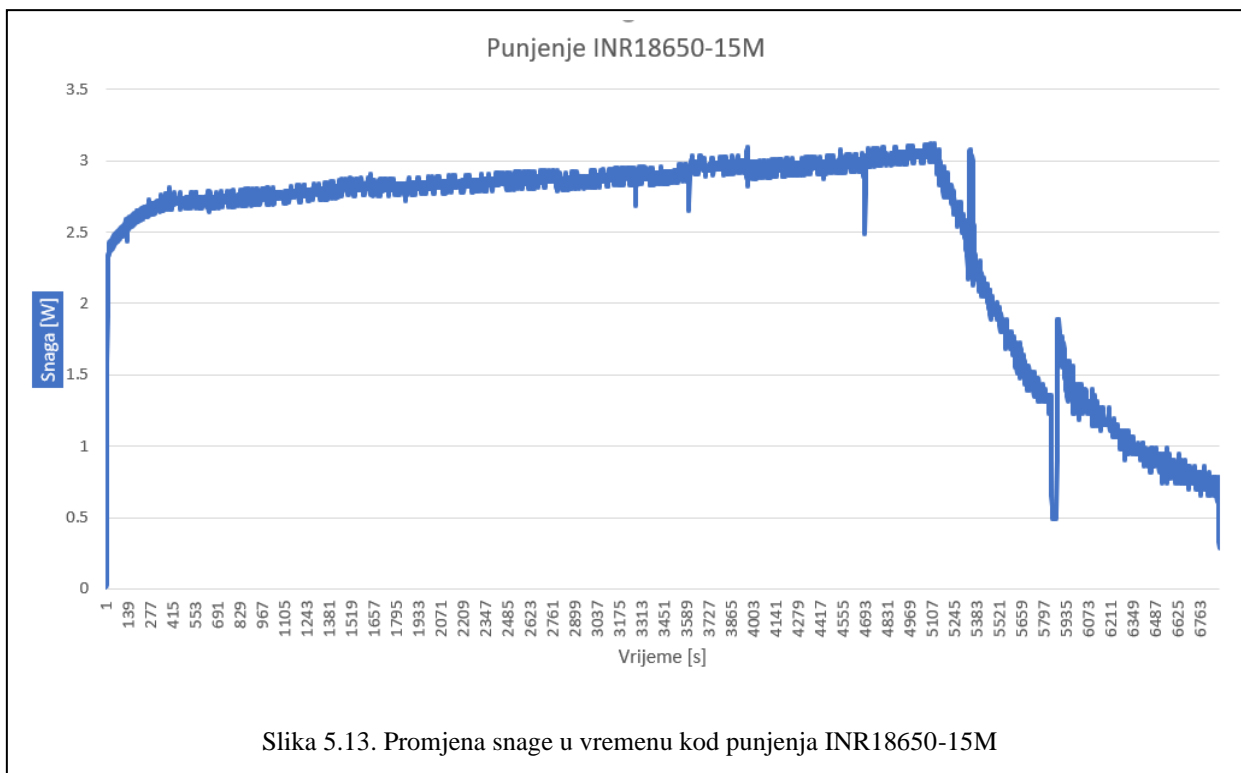


Struja je konstantnih 0,75 A (0,5C) sve dok napon ne dođe do svoje vršne vrijednosti te struja punjenja tada počinje padati, a napon ostaje konstantan.



Kapacitet baterije linearno raste pri punjenju baterije Samsung INR18650-15M do trenutka kada napon postaje konstantan, a zatim se povećava u obliku parabole malog nagiba.

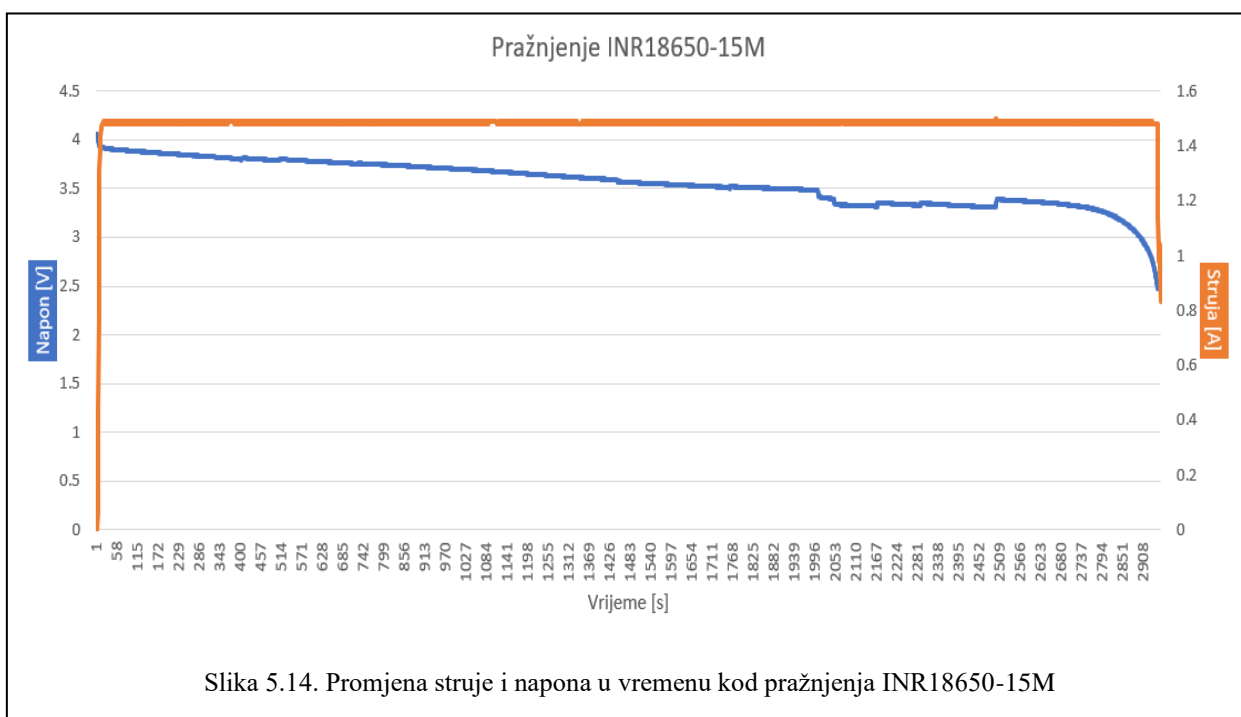




Slika 5.13. Promjena snage u vremenu kod punjenja INR18650-15M

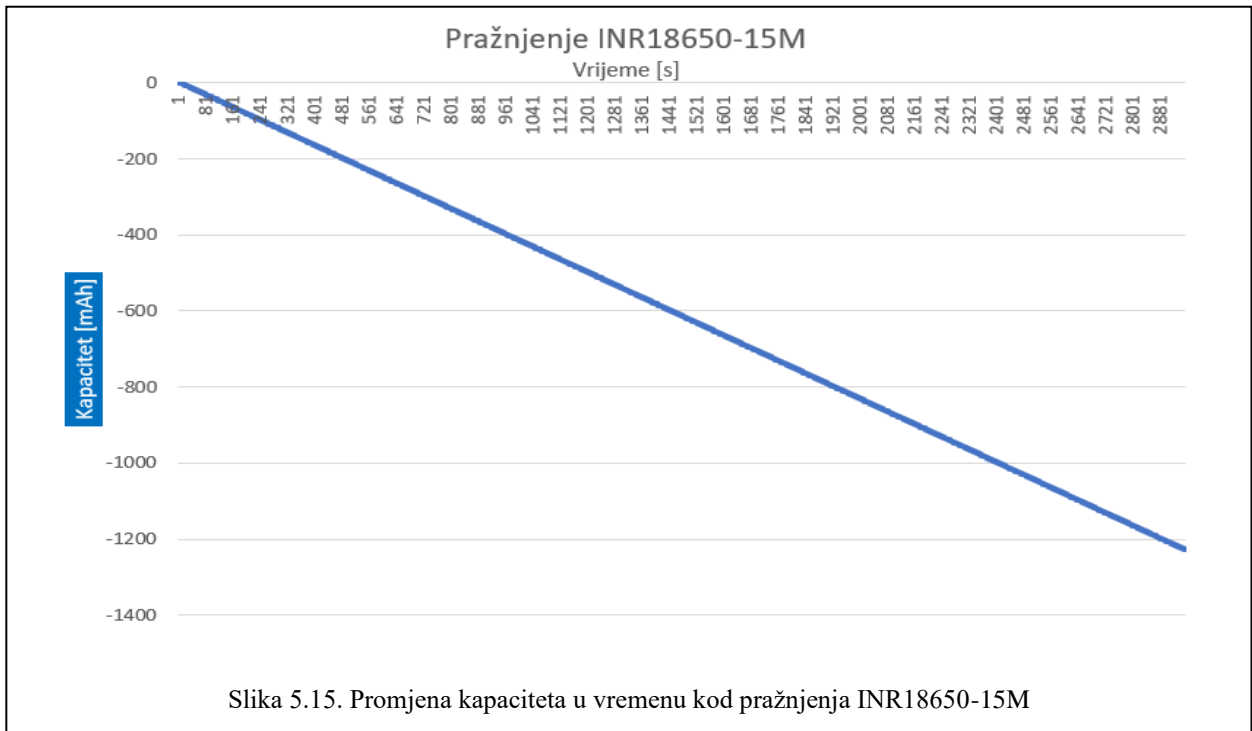
U početku punjenja snaga linearno raste zbog konstantne struje i linearnog porasta napona jer predstavlja umnožak te dvije vrijednosti. Kada napon dođe do vršne vrijednosti, postaje konstantan te tada dolazi do smanjivanja struje punjenja. Zbog toga kada se prijeđe iz CC u CV dolazi do smanjivanja snage.

### 5.2.2. Pražnjenje

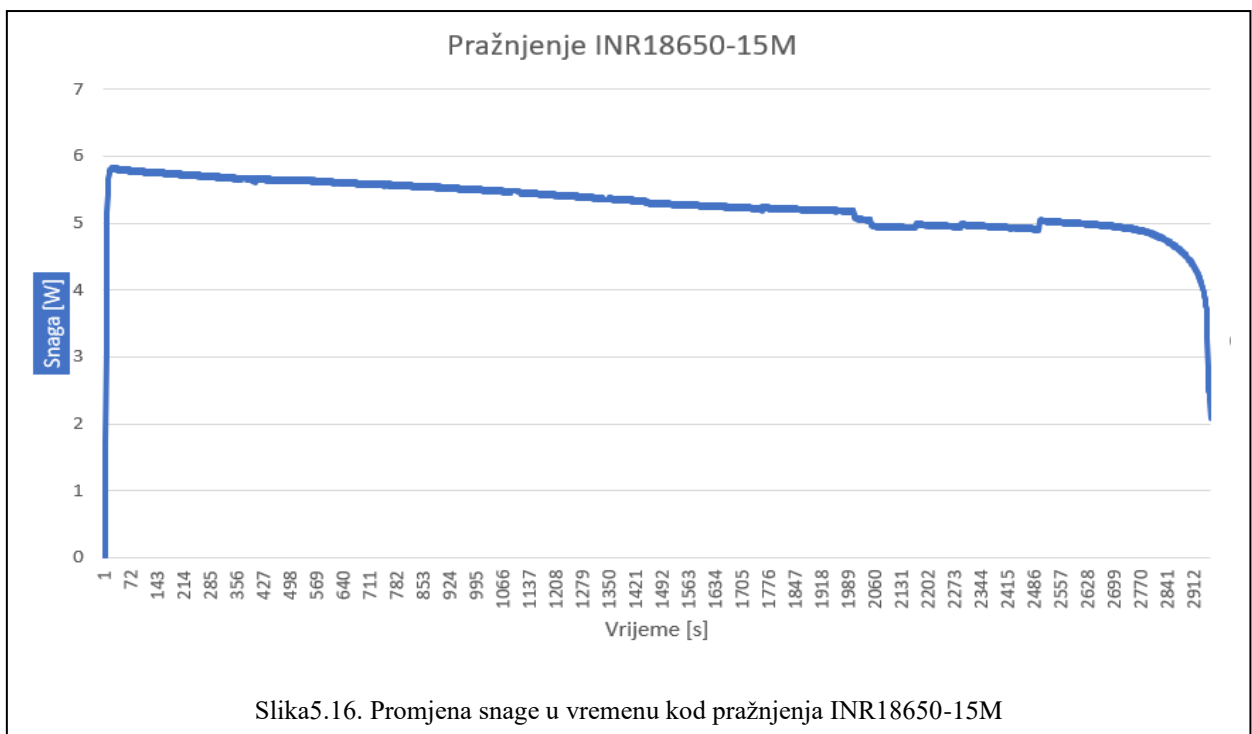


Slika 5.14. Promjena struje i napona u vremenu kod pražnjenja INR18650-15M

Napon pražnjenja linearno opada do vrijednosti donjeg napona pražnjenja 2,5 V, a struja pražnjenja ostaje konstantna 1,5 A.



Kapacitet baterije se linearno smanjuje u vremenu prilikom njenog pražnjenja.



Linearan pad snage se događa zbog toga što napon linearno pada, a struja ostaje konstantna.

## 6. ZAKLJUČAK

Tehnologija litij-ionskih baterija je uvelike napredovala i napredovat će u budućnosti do svojih granica bez sumnje. Baterije općenito predstavljaju bitan izvor energije koje olakšavaju svakodnevni život čovjeku pri obavljanju raznih vrsta aktivnosti i poslova.

Uz korištenje baterija tokom njihovog životnog vijeka, koje se sve više produžuje, dolazi i odgovornost pri zbrinjavanju istih. Adekvatnim skladištenjem baterija koje su van upotrebe, bilo istrošene ili sa greškom, brinemo za okoliš koji nam je prijeko potreban za nastavak života u njemu. Jednostavnim odvajanjem baterija i ne svrstavanjem njih zajedno sa ostatkom otpada, smanjujemo mogućnost požara, iznenadne eksplozije na odlagalištima ili emisije kancerogenih plinova.

Sigurno je da će se tehnologija litij-ionskih baterija koristiti u električnim vozilima, elektronici te služiti kao pohrana energije u raznim industrijama do pojave tehnologije koja će biti dostojna supstitucija. Svakodnevno se radi na dodatnim poboljšanjima u svrhu produženja vijeka trajanja, sporijem opadanju kapaciteta i uz to smanjivanje cijena samih baterija, ali i njihove jeftinije proizvodnje. S pojavom električnih vozila, unaprjeđivanje litij-ionske tehnologije se maksimalno ubrzalo te će uskoro doseći svoj vrhunac.

Zahvaljujući ulaganjima i brojnim istraživanjima pokrenutima da bi se skladištenje energije učinilo što efikasnijim, nema sumnje da će tehnologija koja naslijedi litij-ionsku imati sve potrebne predispozicije da učinkovito zamjeni dosadašnju vrstu baterija te pomakne postojeće granice njezinih performansi čineći znatan korak ka razvoju izvora i spremnika energije male cijene, visoke energetske gustoće sa vrlo visokom razinom sigurnosti.

Punjenje litij-ionskih baterija se sastoji od dvije faze. Prva faza započinje konstantnom strujom te se napon linearno povećava do vršne vrijednosti. Napon postaje konstantan kada dosegne svoju vršnu vrijednost te tada dolazi do smanjivanja vrijednosti struje punjenja što čini drugu fazu punjenja. U grafičkoj analizi ovisnosti kapaciteta o vremenu i snage o vremenu se vidi kako u prvoj fazi kapacitet i snaga linearno rastu jer je konstantna struja, a napon linearno raste. S početkom druge faze punjenja kada struja krene padati te napon postane konstantan uviđa se da kapacitet više ne raste linearno već blago parabolično, a snaga krene padati jer je napon konstantan, a struja se smanjuje. Pražnjenje litij-ionskih baterija ima samo jednu fazu te se ono odvija uz konstantnu struju pražnjenja te linearan pad napona do donje vrijednosti napona pražnjenja. Kapacitet se kod pražnjenja smanjuje linearno u cijelom opsegu dok se kod punjenja

povećava linearno u prvoj fazi, a u drugoj povećava parabolično jer ne postoji prijelaz iz konstantne struje u konstantan napon. Snaga se prilikom pražnjenja linearno smanjuje jer je struja u čitavom ciklusu pražnjenja konstantna te se napon linearno smanjuje.

## LITERATURA

- [1] M.Janton, Povijest baterija: Kako su nastale?, dostupno na: [https://www.marketing-odjel.com/povijest\\_baterija](https://www.marketing-odjel.com/povijest_baterija) (28.08.2021.)
- [2] A. M. Skundin, V. S. Bagotsky, Y. M. Volfkovich, Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.
- [3] Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER). M. Delimar, H. Pandžić. Spremnici energije, Četvrto predavanje – Baterijski spremnici.
- [4] I. Buchmann, BU-302: Series and Parallel Battery Configurations, Battery University, Cadex Electronics Inc., dostupno na:  
<https://batteryuniversity.com/article/bu-302-series-and-parallel-battery-configurations>  
(28.08.2021.)
- [5] M.Brain, How Lithium-ion Batteries Work, 2006., dostupno na:  
<https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm#pt1> (28.08.2021.)
- [6] J.Zdenković, LITIJ-IONSKE BATERIJE : Sve moćnije, pouzdanije i dostupnije, 2015., dostupno na: <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/litij-ionske-baterije>  
(28.08.2021.)
- [7] Blomgren, G. E. 2017. The Development and Future of Lithium Ion Batteries. Journal of The Electrochemical Society, 164 (1), str. 5019-5025.
- [8] MTI Corporation, Li-Ion Battery Cathode - Aluminum Foil Single Side Coated by LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, dostupno na:  
<https://www.mtixtl.com/Li-IonBatteryCathode-AluminumfoilsinglesidecoatedbyLiMn2O4267mm.aspx>
- [9] Whittingham, M. S. 2004. Lithium batteries and cathode materials. Chemical Reviews, 104 (10), str. 4271-4301.
- [10] Medić, D. V., Dimitrijević, M. D., Spalović, B.R., Milić, S. S., Đorđević, I. N. 2018. Reciklaža katodnog materijala iz istrošenih litijum-jonskih baterija
- [11] Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin, G. 2015. Li-ion battery materials: present and future. Materials Today, str. 252-264.

- [12] MTI Corporation, Li-Ion Battery Anode -Double Layer CMS Graphite Coated on Copper Foil, dostupno na:  
<https://www.mtixtl.com/Li-IonBatteryAnode-CopperfoildoublesidecoatedbyCMSGraphite241mm.aspx>
- [13] Zhan, Z. J., Ramadass, P. 2009. Lithium-Ion Battery Separators, In. Lithium-Ion Batteries. Springer Science, New York, str. 367-412.
- [14] C.M.Costa, Y.Lee, J.Kim, S.Lee, Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes, dostupno na:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829719308840>
- [15] Arora, P., Zhang, Z. 2004. Battery Separators. Chemical Reviews, str. 4419-4462
- [16] Deng, D. 2015. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. Energy Science and Engineering, str. 385-418.
- [17] Li, Q., Chen, J., Fan, L., Kong, X., Lu, Y. 2016. Progress in electrolytes for rechargeable Li-ased batteries and beyond. Green Energy & Environment, str. 18-42.
- [18] J.Warner, The handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology, Elsevier, 2015.
- [19] Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER). M. Delimar, H. Pandžić. Spremnici energije, Četvrto predavanje – Baterijski spremnici
- [20] T.B. Ready, Linden's Handbook of Batteries, McGraw Hill, 4. Izdanje, 2010
- [21] W.Y. Chang, "The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review", International Scholarly Research Notices, vol. 2013, Article ID 953792, 7 pages, 2013., dostupno na:  
<https://doi.org/10.1155/2013/953792>
- [22] Massachusetts Institute of Technology (MIT). MIT Electric Vehicle Team (2008). A guide to understanding battery specifications

- [23] Baš malo o litij-ion baterijama, dostupno na: <https://e-radionica.com/hr/blog/2016/07/13/bas-malo-o-litij-ion-baterijama/> (28.08.2021.)
- [24] T.B. Ready, Linden's Handbook of Batteries, McGraw Hill, 4. Izdanje, 2010.
- [25] D. Linden, T. B. Reddy, Handbook of batteries, McGraw-Hill, 2001.
- [26] I.Buchmann, BU-409: Charging Lithium-ion, Battery University Cadex Electronics Inc., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>
- [27]C.Wilke, Batteries should not burst into flames, 2020., dostupno na: <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/lithium-ion-batteries-flames-fire-prevention-technology>
- [28] Berjoza, D., Jurgena, I. 2017. Influence of batteries weight on electric automobile performance. Izveštaj. Jelgava: Latvia University of Agriculture.
- [29] Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima. Narodne novine. 2015. Broj 111.
- [30] Recycling Benefits, dostupno na: <https://batterysolutions.com/learning-center/recycling-benefits/> (28.08.2021.)
- [31] Dailymetalprice. 2020. Daily metal spot prices, dostupno na: <https://www.dailymetalprice.com/metalprices.php> (28.08.2021)
- [32] Gaines, L., Richa, K., Spangenberg, J. 2018. Key issues for Li-ion battery recycling. MRS Energy & Sustainability, 5, E14.
- [33] Zakon o održivom gospodarenju otpadom. Narodne novine. 2013. Broj 94.
- [34] Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima. Narodne novine. 2015. Broj 111.
- [35] The Seven Top Uses For Rechargeable Lithium-Ion Batteries, 2015., dostupno na: <https://relionbattery.com/blog/the-seven-top-uses-for-rechargeable-lithium-ion-batteries> (28.08.2021)

- [36] S.Witman, The Best Uninterruptible Power Supply (UPS), dostupno na: <https://www.nytimes.com/wirecutter/reviews/best-uninterruptible-power-supply-ups/> (28.08.2021.)
- [37] All about electric car batteries, dostupno na: <https://www.edfenergy.com/electric-cars/batteries> (28.08.2021.)
- [38] The Best Portable Charger-2021, dostupno na: <https://www.dontwasteyourmoney.com/best-portable-charger/> (28.08.2021.)
- [39] P.Bernard, Three battery technologies that could power the future, dostupno na: <https://www.saftbatteries.com/media-resources/our-stories/three-battery-technologies-could-power-future> (28.08.2021.)
- [40] T.Persun, Advancing Battery Technology for Modern Innovations, dostupno na: <https://www.asme.org/topics-resources/content/advancing-battery-technology-for-modern-innovations> (28.08.2021.)
- [41] T.Lombardo, Samsung researchers describe all-solid-state battery with silver-carbon composite layer, dostupno na: <https://chargedevs.com/newswire/samsung-researchers-describe-all-solid-state-battery/> (28.08.2021.)



## SAŽETAK

Tema ovoga rada su litij-ionske baterije. U radu je objašnjen način rada litij-ionskih baterija, njihove tehničke karakteristike, kakav utjecaj imaju na okoliš te je odrađen praktični dio punjenja i pražnjenja dvije vrste litij-ionskih baterija: Panasonic NCR18650B i Samsung INR18650-15M. Grafičkom analizom opisane su pojave prilikom punjenja i pražnjenja navedenih baterija pomoću uređaja Junsi iCharger 4010 Duo. Prikazane su ovisnosti struje i napona o vremenu, kapaciteta o vremenu te snage o vremenu punjenja i pražnjenja. Analizom je utvrđeno da se punjenje litij-ionskih baterija odvija u dvije faze: faza konstantne struje te faza konstantnog napona. Za razliku od punjenja, pražnjenje se odvija u jednoj fazi, odnosno struja pražnjenja je konstantna dok napon ne dosegne donju vrijednost pražnjenja.

**Ključne riječi:** baterija, kapacitet, litij-ionska tehnologija, punjenje, pražnjenje

**TITLE: Lithium-ion batteries**

## ABSTRACT

The topic of this paper is lithium-ion batteries. The paper explains the operation of lithium-ion batteries, their technical characteristics, their impact on the environment and the practical part was done as charging and discharging of two types of lithium-ion batteries of: Panasonic NCR18650B and Samsung INR18650-15M. Graphical analysis described the occurrences when charging and discharging these batteries using the Junsi iCharger 4010 Duo. The dependences of current and voltage and time, capacity and time and power and time of charging and discharging are shown. The analysis showed that the charging of lithium-ion batteries takes place in two phases: the phase of constant current and the phase of constant voltage. Unlike charging, the discharge takes place in one phase, i.e. the discharge current is constant until the voltage reaches the lower value of the discharge.

**Key words:** battery, capacity, lithium-ion technology, charging, discharging

## **ŽIVOTOPIS**

Ilija Beljan rođen je u Đakovu 01. srpnja 1998. godine. Osnovnu školu „Ivan Goran Kovačić“ završava u Đakovu te tamo nastavlja srednjoškolsko obrazovanje. Upisuje Gimnaziju Antuna Gustava Matoša u Đakovu, opći smjer, te ju završava 2017. godine kada upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, preddiplomski studij elektrotehnike. Nakon prve godine odabire smjer Elektroenergetika.