

# Ispitivanje elektrohemijskih svojstava vanadijum(V)-oksida modifikovanog $\text{Fe}^{2+}$ i $\text{Fe}^{3+}$ jonima u vodenim rastvorima $\text{Li}^+$ i $\text{Mg}^{2+}$ jona

*U ovom eksperimentalnom istraživanju je pokazano da modifikacija vanadijum-oksida ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) vodonik-peroksidom i dopovanje jonima gvožđa ( $\text{Fe}^{2+}$  i  $\text{Fe}^{3+}$ ) značajno menjaju elektrohemijske osobine materijala.  $\text{V}_2\text{O}_5$  je modifikovan različitim količinama vodonik-peroksida. Pri tome je odnos količina polaznog materijala i jona dopanta održavan konstantnim (1.5%). Pokazano je da je ovako modifikovani  $\text{V}_2\text{O}_5$  termički stabilan u intervalu temperatura (od 20 do 140°C) koje su korišćene u eksperimentima tokom sinteze i pripreme elektroda. Stacionarnom metodom elektrokinetičkih merenja vršena su ispitivanja interkalacije litijumovih jona u sintetisane materijale. Merenja su rađena u dvoelektrodnom sistemu, pri čemu su kao elektroliti korišćeni zasićeni vodeni rastvori litijum-perhlorata i magnezijum-nitrata. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da najpovoljniji efekat na interkalaciona svojstva modifikovanog  $\text{V}_2\text{O}_5$  daje dopovanje jonima  $\text{Fe}^{3+}$ , pri korišćenju magnezijum-nitrata kao elektrolita. U ovom slučaju brzina procesa interkalacije litijumovih jona je višestruko povećana u poređenju sa drugim ispitivanim materijalima.*

## Uvod

Punjive litijum-jonske baterije sa organskim elektrolitima imaju veliku komercijalnu primenu zbog svojih kvaliteta u vidu velike gustine energije, visokog radnog potencijala i malog stepena samopra-

žnjenja. Otkrićem uspešne interkalacije (proces ugradnje jona iz elektrolita u kristalnu strukturu elektrode)  $\text{Li}^+$  jona u  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  u vodenim elektrolitima (Li *et al.* 1994), punjive baterije bazirane na istom principu postale su predmet izučavanja elektrohemije. Vodene punjive litijum-jonske baterije (eng. aqueous rechargeable lithium-ion battery, ARLB) potencijalno su naprednije od onih sa organskim elektrolitom u pogledu zaštite zdravlja, životne okoline i jednostavnije proizvodnje. Takođe, vodeni rastvori elektrolita u poređenju sa organskim imaju mnogo veći koeficijent protoka mase (Wang *et al.* 2007). S druge strane, problemi u razvoju komercijalnih litijum-jonskih baterija sa vodenim elektrolitom su visok stepen samopražnjenja ovih baterija i ograničenost radnog potencijala naponom razlaganja vode. Takođe je problem pronalaženje odgovarajućeg para katodnog i anodnog materijala koji će omogućiti efikasnu interakalaciju i deinterkalaciju litijuma u toku rada baterije.

Vanadijum(V)-oksid je materijal koji ima sposobnost interkalacije jona i kao takav ima potencijalnu primenu u elektrohemijskim izvorima električne struje.  $\text{V}_2\text{O}_5$  ima slojevit kristalnu strukturu koja omogućava interkalaciju katjona između susednih slojeva. Proces interkalacije katjona u  $\text{V}_2\text{O}_5$  praćen je promenom međuravanskih rastojanja unutar slojevite kristalne strukture vanadijum(V)-oksida. Ovom prilikom dolazi i do promene boje materijala usled promene valence vanadijumovih jona (Takahashi *et al.* 2006). Prilikom interkalacije (ugradnje) jona  $\text{Li}^+$  u strukturu  $\text{V}_2\text{O}_5$  oksida dolazi do skladištenja električne energije u vidu hemijskog potencijala. Ova energija se osloboda kada joni  $\text{Li}^+$  napuštaju  $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$  strukturu. Za primenu u elektrohemiji bitni parametri su brzina punjenja/praznjenja baterije, kao i kapacitet energije koja se skladišti. Do

*Stefan Stojku (1994), Glogonj (Pančevo), Školska 159, učenik 2. razreda Gimnazije „Uroš Predić“ u Pančevu*

interkalacije jona dolazi samo u površinskom sloju materijala, pa je poželjno da materijal ima visok odnos površina/zapremina čestice, kako bi se obezbedio veći kapacitet materijala. Kraća difuzna rastojanja obezbeđuju brže procese punjenja i pražnjenja baterija. Zato se najčešće koriste dosta fini prahovi (čestice dimenzija reda nanometra), kako bi se obezbedio veći kapacitet.

Pokazano je da se vanadijum(V)-oksid sol-gel postupkom može modifikovati na takav način da mu se kulonski kapacitet značajno poveća, pri čemu tako modifikovani materijal zadržava sposobnost interkalacije litijumovih jona iz vodenih rastvora litijumovih soli (Stojković *et al.* 2009). Pored različitih procesa modifikacije vanadijum(V)-oksida, poboljšanje elektrohemijskih svojstava ovog sintetisanog materijala može se postići i dopovanjem jonima prelaznih metala. Objašnjenje ovog fenomena leži u unošenju defekata u kristalnu strukturu  $V_2O_5$  usled prisustva stranih atoma i povećanju njegove provodljivosti. Defekti uneseni u kristalnu rešetku elektrodnog materijala doprinose stabilnosti materijala, a s druge strane formiraju rastresitiju strukturu i time olakšavaju interkalaciju stranih jona.

**Cilj rada** je bio da se sistematski ispita kako modifikacija komercijalnog vanadijum(V)-oksida sol-gel postupkom i dopiranje  $Fe^{3+}$  i  $Fe^{2+}$  jonima utiče na elektrohemijska svojstva dobijenih proizvoda.

## Materijal i metode

Sinteza uzoraka, čist vanadijum(V)-oksida (p. a.; Carlo Erba) modifikovan je mešanjem sa 30% vodenim rastvorom vodonik-peroksida (p. a., NRK Inženjering Beograd), praćeno dopovanjem  $Fe^{3+}$  i  $Fe^{2+}$  jonima. Ovako modifikovani materijal je dalje poslužio za pravljenje elektroda. Napravljene su dve različite serije gelova prema sledećem protokolu.

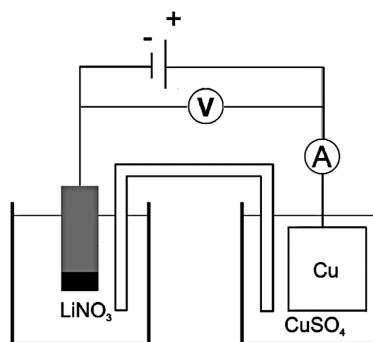
**Prva serija.** U pet čaša od 250 mL odmereno je po 250 mg vanadijum(V)-oksida. U svaku čašu je dodat 30% vodeni rastvor vodonik-peroksida i to u prvu 6 mL, drugu 9 mL, treću 12 mL, četvrtu 15 mL i petu 18 mL. Nakon egzotermne reakcije koja je trajala oko 10 min, dobijen je tamnocrveni gel, koji je dopovan jonima gvožđa(III), dodavanjem soli  $FeCl_3$  (p. a., Merck), u obliku 1M rastvora, tako da masa jona  $Fe^{3+}$  iznosi 1.5% mase vanadijum(V)-oksida. Gel je ostavljen da stari 6 h, a zatim sušen na 120°C u sušnici 12 h. Nakon toga, po 50 mg svakog gela je preneseno u epruvete gde je po-

mešano sa 25 mg amorfno ugljenika (XC-72) nakon čega je dodato 664  $\mu$ L PVDF-a (polviniliden-difluorid). Na ovaj način maseni odnos aktivnog materijala, amorfno ugljenika i polimernog veziva bio je 60 : 30 : 10 za sve ispitivane materijale. Smeše su zatim mešane 1.5 h u ultrazvučnom kupatilu.

**Druga serija** pripremljena je na isti način, osim što su gelovi dopirani jonima  $Fe^{2+}$ , umesto  $Fe^{3+}$ , dodavanjem soli  $FeSO_4$  (p. a., MP Hemija) u obliku 1 M rastvora.

**Pripremanje elektroda.** Od svakog sintetisanog gela napravljene su po dve elektrode. Gel je u tankom sloju nanošen na bakarne pločice koje su zatim sušene 12 h na 140 °C.

**Snimanje stacionarnih I-E krivih.** Elektrokinetička merenja vršena su u dielektrodnom sistemu (slika 1). Merenja su vršena stacionarnom metodom (Janaković *et al.* 2008). Kao radne korišćene su elektrode izradene na opisan način, a kao pomoćna i referentna korišćena je bakarna elektroda. Rastvor unutrašnjeg elektrolita radne elektrode bio je, u dve serije, zasićen rastvor litijum-perhlorata (p. a., Merck), a u druge dve, zasićen rastvor magnezijum-nitrata (p. a., Merck), dok je elektrolit pomoćne elektrode bio zasićen rastvor bakar(II)-sulfata (p. a., Kemika). Kao izvor jednosmerne električne struje korišćen je uređaj Voltcraft – Universal System MS-9150. Za svaku elektrodu merena je jačina električne struje u kolu pomoću ampermetra, (Iskra Unimer 3) u zavisnosti od napona između elektroda koji je podešavan u



Slika 1. Shema aparature

Figure 1. Instrumental setup

opsegu od 0–1,5 V. Čaše sa elektrodama bile su povezane elektrolitičkim mostom koji je sadržao rastvor kalijum-hlorida (p. a., Zorka Šabac).

Snimanje rendgenograma praškastih uzoraka. Kristalna struktura nekih modifikovanih uzoraka ispitana je pomoću difrakcije x-zraka. Rengenogrami uzoraka su dobijeni pomoću Philips 1710 difraktometra, korišćenjem Cu K $\alpha$  izvora x-zraka (34 kV, 20 mA), u opsegu uglova 2 $\theta$  od 10° do 70°, sa korakom 0.05°, i vremenom ekspozicije od 5 sekundi po koraku.

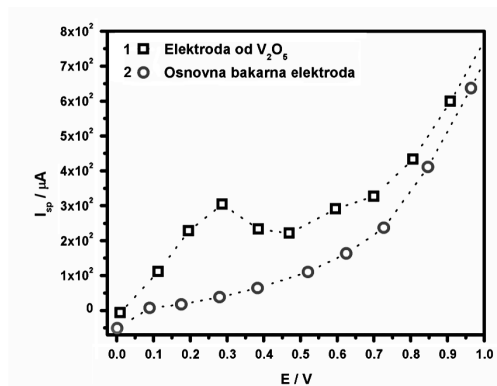
## Rezultati i diskusija

### Ispitivanje podobnosti elektrohemijskog sistema za merenje

Iz literature je poznato (Janković *et al.* 2008) da stacionarna metoda elektrohemijskih merenja ima ograničenu primenljivost za sisteme kod kojih dolazi do formiranja novih faza u toku elektrohemijske reakcije. Da bismo opravdali primenu korišćenog sistema i metode merenja potrebno je prodiskutovati nekoliko važnih pitanja.

Kao prvo, korišćeni dvoelektrodni sistem je primenjen imajući u vidu da je potencijal Cu elektrode u zasićenom rastvoru CuSO<sub>4</sub> skoro konstantan bez obzira na struju koja protiče kroz elektrodu. To je uslovljeno činjenicom da je rastvorljivost CuSO<sub>4</sub> bliska jediničnoj, pa u uslovima bezstrujnosti, prema Nernstovoj jednačini, potencijal odgovara standardnom (formalnom) potencijalu Cu/Cu<sup>2+</sup> elektrode. U opisanim eksperimentima bakarna elektroda je korišćena kao anoda, i ona se tokom vremena rastvarala. Pošto su reakcije anodne oksidacije metala izuzetno brze (Janković *et al.* 2008) ova elektroda se ne polarizuje u toku merenja pa se sve promene radnog napona ostvaruju na granici radna elektroda/elektrolit. Na ovaj način korišćeni dvoelektrodni sistem efektivno zamenjuje troelektrodni sistem koji sadrži pored radne i pomoćnu i referentnu elektrodu.

Korišćenje stacionarne metode elektrohemijskih merenja opravdavamo dobijenim rezultatima za čist V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (slika 2). Efekat interkalacije litijumovih jona je jasno vidljiv. S obzirom da jednom korišćenu elektrodu nije bilo moguće ponovo ciklirati (jer se sastav materijala menja) od svakog sintetisanog gela pripremljene su dve elektrode, a prezentovani rezultati su srednje vrednosti ova dva merenja. Pored toga, u toku eksperimenata posebna pažnja je poklo-



Slika 2. Stacionarne I-E krive čistog vanadijum(V)-oksida (1) i osnovne bakarne elektrode (2) na koju su nanošeni materijali koji su ispitivani. Ove krive korišćene su kao referentne pri daljem elektrohemijskom ispitivanju.

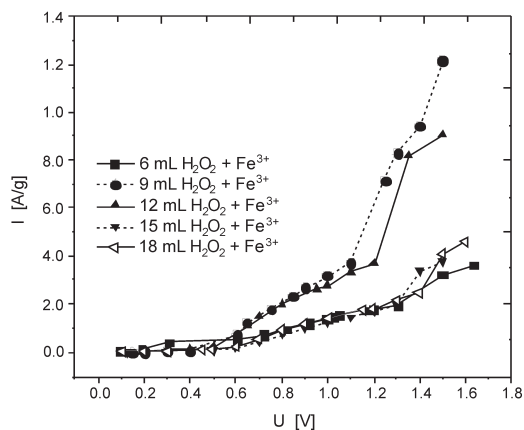
Figure 2. Stationary I-E graphs of pure vanadium(V)-oxide (1) and main copper electrode (2) which the analyzed materials were deposited to. These graphs were used as a reference for further electrochemical analysis.

njena tome da potencijali do kojih se različiti materijali polarizuju koincidiraju i da se očitavanje struje uvek vrši nakon tačno definisanog vremena od trenutka polarizacije. U toku celog trajanja istraživanja mehanička stabilnost mernog sistema je pažljivo čuvana. Merene vrednosti struje su date po jedinici mase korišćenog materijala kako bi se moglo vršiti poređenje elektrohemijskih osobina materijala.

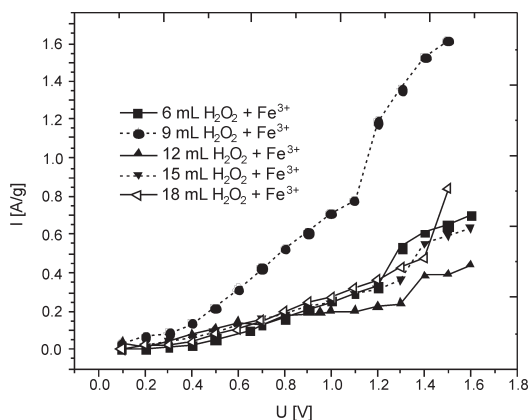
### Rezultati elektrohemijskog ispitivanja sintetisanih materijala

Rezultati elektrohemijskih merenja su prikazani na slici 3 (a-d).

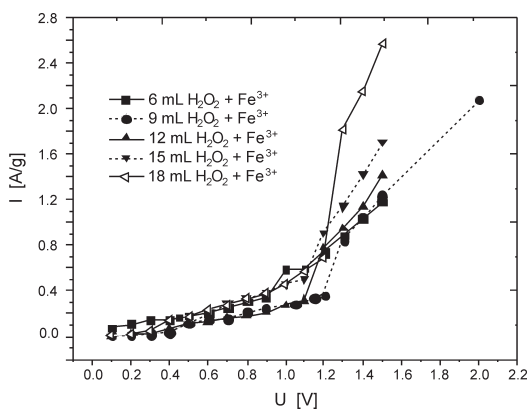
U prvoj kombinaciji elektroda i elektrolita (slika 3a), korišćena je elektroda dopirana Fe<sup>3+</sup> jonima, a kao elektrolit je korišćen litijum-perhlorat. Najbolji rezultat pokazuje serija elektroda čiji je gel sintetisan dodavanjem 9 mL 30% vodenog rastvora vodonik-peroksida čistom oksidu V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Primećuje se da postoji minimalna razlika između serija sintetisanih dodavanjem 18, 15 i 6 mL vodonik-peroksida. Kod elektroda sa najboljim elektrohemijskim osobinama može se primetiti nagli rast jačine struje u opsegu 1.1 do 1.2 V.



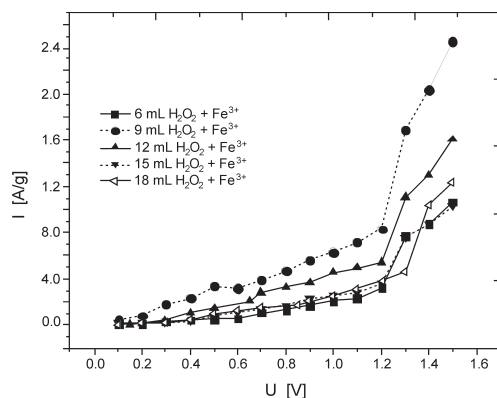
a



b



c



d

Slika 3. I-E krive serije dopovane jonima  $\text{Fe}^{3+}$ : unutrašnji rastvor litijum-perhlorat (a) i magnezijum-nitrat (c); I-E krive serije dopovane jonima  $\text{Fe}^{2+}$ : unutrašnji rastvor litijum-perhlorat (b) i magnezijum-nitrat (d)

Figure 3. I-E graphs of the set doped with  $\text{Fe}^{3+}$ : inner solution lithium-perchlorate (a) and magnesium-nitrate (c); I-E graphs of the set doped with  $\text{Fe}^{2+}$ : inner solution lithium-perchlorate (b) and magnesium-nitrate (d).

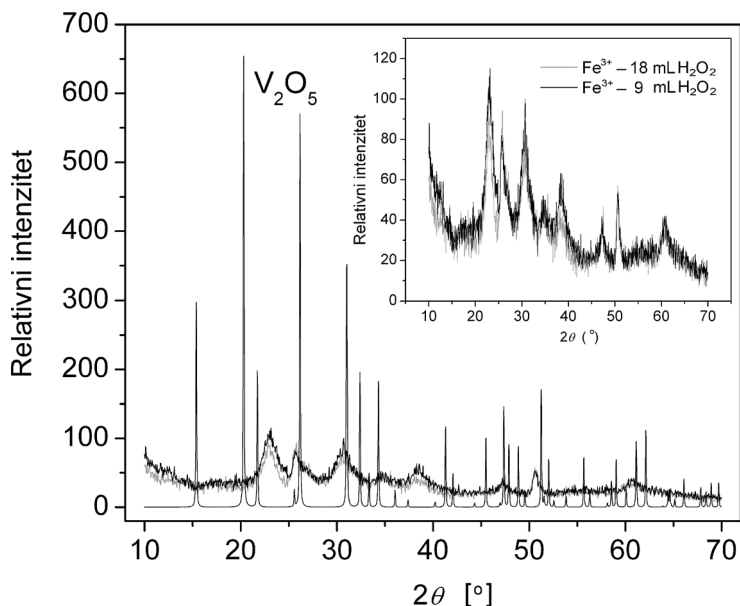
U drugoj kombinaciji elektroda i elektrolita (slika 3b),  $\text{V}_2\text{O}_5$  je dopiran jonima  $\text{Fe}^{2+}$ , a elektrolit je bio litijum-perhlorat. Takođe se uočava da najbolje elektrohemijske osobine pokazuje elektroda čiji je gel sintetisan dodavanjem 9 mL 30% vodenog rastvora vodonik-peroksida. Nagli skok se uočava u opsegu napona 1.1 V do 1.2 V.

U trećoj kombinaciji elektroda i elektrolita,  $\text{V}_2\text{O}_5$  je dopiran jonima  $\text{Fe}^{3+}$ , a kao elektrolit korišćen je vodeni rastvor magnezijum-nitrata. Najbolje elektrohemijske osobine pokazala je elektroda čiji je gel sintetisan dodavanjem 18 mL 30% vodenog rastvora vodonik-peroksida. Nagli skok jačine električne stru-

je je na naponu od 1.2 V. Ostale elektrode pokazuju slične elektrohemijske osobine (slika 3c).

U četvrtoj kombinaciji elektroda i elektrolita (slika 3d),  $\text{V}_2\text{O}_5$  je dopovan jonima  $\text{Fe}^{2+}$ , a kao elektrolit korišćen je rastvor magnezijum-nitrata. Najbolje elektrohemijske osobine pokazuje elektroda čiji je gel sintetisan dodavanjem 9 mL 30% vodenog rastvora vodonik-peroksida. Nagli skok jačine električne struje je na 1.2 V.

Nedostatak jasnog trenda zavisnosti  $I = f(V)$  može da se pripisuje činjenici da se prilikom modifikacije vanadijum-pentoksida sa  $\text{H}_2\text{O}_2$  u širokom opsegu zapremina dobija smeša oksida različitog sastava, stru-



Slika 4. Rendgenogrami uzoraka dobijenih modifikacijom čistog  $V_2O_5$  pomošanog sa 9 mL (plava linija), odnosno 18 mL (zeleni linija) vodenog rastvora  $H_2O_2$  (30%), i dopiranog jonima  $Fe^{3+}$ . Rendgenogrami ovih uzoraka upoređeni su sa rendgenogramom čistog  $V_2O_5$  u ortorombičnoj kristalnoj strukturi (crna linija).

Figure 4. Roentgenograms of samples made by modification of pure  $V_2O_5$  with 9 mL (blue graph), 18 mL (green graph) of 30% aquatic solution of hydrogen-peroxide, and doped with  $Fe^{3+}$  ions. Roentgenograms of these samples were compared with the roentgenogram of pure  $V_2O_5$  in orthorhombic crystal structure (black line).

kture i elektrohemijjskih osobina (Stojković *et al.* 2009). Na ovaj način elektrohemijjsko ponašanje sintetisanog materijala ne može da se opiše kao prosta funkcija jednog parametra već zahteva detaljno ispitivanje za svaki posebno analizirani slučaj. Takođe je nađeno da potapanjem  $V_2O_5$  u rastvor  $H_2O_2$  nastaje  $V_2O_5 \times nH_2O$  (Xue *et al.* 2010).

Urađena su i dodatna rendgenostrukturna merenja pojedinih uzoraka. Rendgenogrami praškastih uzoraka dobijenih modifikacijom čistog  $V_2O_5$  oksida dodavanjem 9 mL, odnosno 18 mL 30% vodenog rastvora  $H_2O_2$ , i dopiranih  $Fe^{3+}$  jonima, prikazani su na slici 4. Istovremeno je prikazan i rendgenogram čistog  $V_2O_5$  koji kristališe u ortorombičnoj kristalnoj strukturi (preuzeto iz baze podataka). Uočava se da modifikacija  $V_2O_5$  vodonik-peroksidom dovodi do promena u strukturi, pri čemu dolazi do značajnog širenja difrakcionih pikova. Položaji pikova modifikovanog  $V_2O_5$  ne odgovaraju položajima pikova kristalnog  $V_2O_5$  oksida u ortorombičnoj kristalnoj strukturi. Dakle, može se zaključiti da posle tretmana vodonik-peroksidom dolazi do amorfizacije vanadijum(V)-oksida. Položaje difrakcionih pikova modifikovanog  $V_2O_5$  nije bilo moguće pripisati bilo kojoj čistoj fazi nekog od vanadijumovih oksida. Pri tome, veoma slični produkti su dobijeni tretiranjem sa 9 mL, odnosno 18 mL  $H_2O_2$  (položaji pikova su identični, postoji samo slaba varijacija u njihovim intenzitetima).

## Zaključak

Predstavljena eksperimentalna studija bavi se ispitivanjem elektrohemijjskih osobina modifikovanog vanadijum(V)-oksida dobijenog postupkom sol-gel sinteze u kome se čist  $V_2O_5$  tretira sa  $H_2O_2$  i dopira jonima gvožđa,  $Fe^{3+}$  i  $Fe^{2+}$ . Najznačajniji rezultati su sumirani dole.

I) Sintetisani materijali pokazuju značajnu termičku stabilnost do  $200^\circ C$ . Tom prilikom najverovatnije dolazi do formiranja  $V_2O_5 \times nH_2O$ . Voda predstavlja integralni deo strukture materijala i ne gubi se u toku pripreme materijala za elektrohemijjska merenja, kao i tokom merenja.

II) Stacionarna metoda elektrohemijjskih merenja u dvoelektrodnom sistemu sa bakarnom elektrodom kao pomoćnom i referentnom elektrodom, u zasićenom rastvoru  $CuSO_4$ , pokazala se kao odgovarajuća za ispitivanje elektrohemijjskog ponašanja sintetisanih materijala. Ipak, za pouzdane rezultate posebna pažnja se mora obratiti na dinamiku merenja i mehaničku stabilnost mernog sistema.

III) Modifikacija vanadijum-oksida vodonik-peroksidom i naknadno dopiranje jonima gvožđa pokazuje dobre efekte na proces interkalacije litijumovih i magnezijumovih jona iz vodenih rastvora elektrolita. Na osnovu dobijenih I-E krivih očigledno je da se u ovom slučaju dobijaju materijali koji pokazuju vrlo brzu interkalaciju jona iz vodenih rastvora, pri

čemu je povećanje brzine interkalacije višestruko u odnosu na druge materijale. Materijal dopiran jonima  $\text{Fe}^{3+}$ , pri čijoj sintezi je utrošeno 18 mL vodonik-peroksida, pri korišćenju magnezijum-nitrata kao unutrašnjeg rastvora radne elektrode, pokazao je najbolje karakteristike od svih ispitanih materijala.

Pokazano je da oksidaciono stanje jona dopanta ima uticaja na elektrohemijska svojstva materijala. Pri korišćenju litijum-perhlorata kao unutrašnjeg rastvora radne elektrode, materijal dopiran  $\text{Fe}^{2+}$  jonima pokazuje bolje rezultate; dok je pri korišćenju magnezijum-nitrata bolje rezultate pokazao materijal dopiran  $\text{Fe}^{3+}$  jonima.

Rezultati pokazuju da se ostvaruju mnogo bolja elektrohemijska svojstva pri upotrebi magnezijum-nitrata kao unutrašnjeg rastvora radne elektrode nego litijum-perhlorata. Pretpostavlja se da je interkalacija magnezijumovih jona u sintetisani materijal brža od interkalacije litijumovih jona.

**Zahvalnost.** Želim da izrazim veliku zahvalnost mr Nataši Jović, dr Nenadu Lazarovu, kao i institutu „Vinča” koji su omogućili analizu uzoraka rendgenostrukturnim merenjima.

## Literatura

Janković B., Adnađević B., Mentus S. 2008. The kinetic study of temperature-programmed reduction of nickel oxide in hydrogen atmosphere. *Chemical Engineering Science*, **63** (3): 567.

Li W., Dahn J. R., Wainwright D. S. 1994. Rechargeable lithium batteries with aqueous electrolytes. *Science*, **264**: 1115.

Li W., McKinnon W. R., Dahn J. R. 1994. Lithium Intercalation from Aqueous Solutions. *J. Electrochem Soc.*, **141**: 2310.

Li W., Dahn J. R. 1995. Lithium-Ion Cells with Aqueous Electrolytes. *J. Electrochem. Soc.*, **142**: 1742.

Stojković I., Cvjetičanin N., Pašti I., Mitrić M., Mentus S. 2008. Electrochemical behavior of  $\text{V}_2\text{O}_5$  treated with  $\text{H}_2\text{O}_2$ . *The Tenth Annual Conference – YUCOMAT 2008, Herceg Novi, Montenegro, The Book of Abstracts*, str. 73.

Stojković I., Cvjetičanin N., Pašti I., Mitrić M., Mentus S. 2009. Electrochemical behaviour of  $\text{V}_2\text{O}_5$  xerogel in aqueous  $\text{LiNO}_3$  solution. *Electrochemistry Communications*, **11** (7): 1512.

Wang H., Zeng Y., Huang K., Liu S., Chen L. 2007. Improvement of cycle performance of lithium ion cell  $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$  with aqueous solution electrolyte by polypyrrole coating on anode. *Electrochim. Acta*, **52** (15): 5102

Takahashi K., Wang Y., Lee K., Cao G. 2006. Fabrication and Li+-intercalation properties of  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$  composite nanorod array. *Appl. Phys. A*, **82**: 27.

Xue M., Chen H., Ge J., Shen J. 2010. Preparation and characterization of thermally stable high surface area mesoporous vanadium oxides. *Microporous and Mesoporous Materials*, **131**: 37.

---

Stefan Stojku

## Examination of Electrochemical Properties of Vanadium(V) Oxide Modified with $\text{Fe}^{2+}$ and $\text{Fe}^{3+}$ ions in an Aquatic Solution of $\text{Li}^+$ and $\text{Mg}^{2+}$ Ions

The presented experimental study deals with the modification of the electrochemical properties of  $\text{V}_2\text{O}_5$  powder upon chemical reaction with  $\text{H}_2\text{O}_2$  and additional doping with  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  ions. It was demonstrated that the synthesized materials display altered electrochemical properties in comparison to the starting material, i.e. commercial  $\text{V}_2\text{O}_5$  powder. The thermal stability of synthesized powders during synthesis and the measurement processes was noted. The applicability of stationary electro kinetic measurements was confirmed after careful recording of the I-E curves of unmodified  $\text{V}_2\text{O}_5$  powder. During the entire set of measurements that have been performed the mechanical stability of the experimental setup was ensured. Using stationary electrokinetic measurements, it was demonstrated that  $\text{V}_2\text{O}_5$  powder modified with different amounts of  $\text{H}_2\text{O}_2$  and additionally doped with  $\text{Fe}^{3+}$  ions, while using magnesium-nitrate solution as an electrolyte, displays the most promising electrochemical behavior. The present study raised a number of important questions regarding the intercalation process and possible application of the investigated materials in aqueous rechargeable lithium-ion batteries.

