

**UNIVERZITET U BEOGRADU**  
**TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET**  
**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU**

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata **Sanje S. Krstić**, dipl. inž. tehnologije

Odlukom Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu br. 35/252 od 06.07.2018. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **Sanje S. Krstić**, dipl. inž. tehnologije, pod naslovom:

**„Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala“.**

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa kandidatom Komisija je sačinila sledeći

**R E F E R A T**

**1. UVOD**

**1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije**

05.04.2016.- Kandidat Sanja S. Krstić je prijavila temu doktorske disertacije pod nazivom „Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala“

14.04.2016. - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o imenovanju Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije **Sanja S. Krstić**, pod nazivom „**Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala**“ (Odluka br. 35/160 od 14.04.2016.)

23.06.2016 - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o prihvatanju referata Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata **Sanja S. Krstić** (Odluka NNV br. 35/332 od od 23.06.2016)

19.09.2016 - Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu dalo je saglasnost na predlog teme doktorske disertacije pod nazivom „Sinteza, funkcionalizacija

i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala “ kandidata **Sanje S. Krstić** (Odlukom br. 61206-3388/2-16)

06.07.2018 - Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o imenovanju Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije **Sanje S. Krstić**, pod nazivom „Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala“ (Odluku br. 35/252 od 06.07.2018. god)

Dekan je, na zahtev studenta i uz saglasnost mentora, doneo Rešenje br. 20/124 od 06.10.2016. o produženju roka za završetak studija za dva semestra šk. 2016/2017. god.

NNV je, na zahtev studenta i predlog mentora, donelo Odluku br. 35/345 od 21.09.2017. god. o produženju roka za završetak studija i za još godinu dana šk. 2017/2018. god.

Kandidat je upisao doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu školske 2010/11 godine.

### **1.2. Naučna oblast disertacije**

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološkog inženjerstva, uža naučna oblast Inženjerstvo materijala, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Za mentore su imenovani dr Aleksandar Marinković, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu i dr Branka Kaluđerović, naučni savetnik Instituta za Nuklearne nauke „Vinča“ Univerziteta u Beogradu koji su, na osnovu objavljenih publikacija i iskustava, kompetentni da rukovode izradom ove doktorske disertacije.

### **1.3. Biografski podaci o kandidatu**

Krstić (Slavoljub) Sanja rođena je 12.07.1982. godine u Smederevskoj Palanci. Nakon završene osnovne škole u Smederevskoj Palanci upisuje XIV Beogradsku gimnaziju, prirodno-matematički smer, koju završava 2003. godine kada upisuje Tehnološko-metalurški fakultet, Univerziteta u Beogradu. Diplomirala je 2010. godine na smeru Hemijsko inženjerstvo sa ocenom 10, odbranivši diplomski rad sa temom „Projektovanje trofaznog separatora u cilju razdvajanja prirodnog gasa od pratećeg kondenzata i vode u rafinerijskom postrojenju “.

Godine 2010, upisuje doktorske studije na smeru Inženjerstvo materijala, gde je u oktobru 2012. godine odbranila završni rad pod nazivom „Sinteza i funkcionalizacija ugljeničnih nano materijala hidrotermalnom metodom “ sa ocenom 10 pred komisijom u sastavu: mentor – dr Radoslav Aleksić, red. prof. i komentori: dr Aleksandar Marinković, docent. i dr Petar

Uskoković, red. prof. U okviru doktorskih studija položila je sve ispite predviđene studijskim programom, sa prosečnom ocenom 9,83.

Sanja Krstić, diplomirani inženjer tehnologije, od februara 2011. godine zaposlena je u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ u Laboratoriji za materijale. Angažovana je na projektu integralnih i interdisciplinarnih istraživanja: „Funkcionalni, funkcionalizovani i usavršeni nano materijali“, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (broj projekta III 45005). gde je uključena na istraživanjima vezanim za dobijanje aktivnih ugljenika od saharida (glukoza, fruktoza i saharoza) hidrotermalnom metodom.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### **2.1. Sadržaj disertacije**

Doktorska disertacija kandidata **Sanje S Krstić**, dipl. inž. tehnologije, pod naslovom „Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala“ napisana je na 114 strana, sa ukupno 24 slike, 13 tabela i 213 literaturnih navoda. Disertacija se sastoji od sledećih celina: Uvod, Teorijske osnove, Eksperimentalni deo, Rezultati i Diskusija i Zaključak, i pored toga sadrži odeljke: Rezime na srpskom i engleskom jeziku, Zahvalnicu, Spisak slika i tabela, Sadržaj, Literaturu, Biografiju kandidata, Spisak radova i dodatke propisane pravilima Univerziteta o podnošenju doktorskih teza na odobravanje. Po formi i sadržaju, napisana doktorska disertacija zadovoljava propisane standarde Univerziteta u Beogradu.

### **2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja**

*Uvod* sadrži kratak opis aktivnih ugljeničnih materijala, njihov značaj u sadašnjosti i budućnosti i njihovu opštu primenu. Kao glavna primena opisuje se uticaj aktivnih ugljeničnih materijala na životnu sredinu.

Poglavlje *Teorijske osnove* se sastoji iz jedanaest podpoglavlja: 1) Aktivni ugljenični materijali, 2) Podela aktivnih ugljeničnih materijala, 3) Dobijanje aktivnih ugljeničnih materijala, 4) Metode aktivacije ugljeničnih materijala, 5) Hidrotermalna metoda i dobijanje hidročadi, 6) Površinske osobine aktivnih ugljeničnih materijala, 7) Specifična površina aktivnih ugljeničnih materijala, 8) Uticaj polazne sirovine na karakteristike aktivnih ugljeničnih materijala, 9) Uklanjanje teskih metala iz kontaminiranih vodenih rastvora, 10) Zagađujuće organske boje i njihova podela i 11) Termijske analize i kinetika termičke degradacije.

U *Eksperimentalnom delu* su opisani polazni materijali, metode i eksperimentalni postupci koji su korišćeni u toku izrade ove doktorske disertacije. Takođe je opisana primena dobijenih materijala u oblasti zaštite životne sredine. *Eksperimentalni deo* se sastoji iz tri poglavlja 1) Hidrotermalna metoda i aktivacija ugljeničnih materijala, 2) Karakterizacija dobijenih aktivnih

ugljeničnih materijala i 3) Metoda primene. Dugo podpoglavlje *Eksperimentalnog dela* se sastoji iz sedam podpoglavlja 1) Elementarna analiza, 2) Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM), 3) Raspodela veličina čestica, 4) Određivanje specifične površine i poroznosti, 5) Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR), 6) Rendgenostrukturalna difrakciona analiza (XRD) i 7) Ramanska spektroskopija. Treće podpoglavlje *Eksperimentalnog dela* se sastoji iz tri podpoglavlja: 1) Uklanjanje teskih metala iz kontaminiranih vodenih rastvora, 2) Uklanjanje zagađujućih boja iz otpadnih voda i 3) Termijske analize (i kinetika termijske degradacije-

U poglavlju *Rezultati i diskusija* je prikazana karakterizacija dobijenih rezultati aktivnih ugljeničnih materijala, diskusija dobijenih rezultata. Poglavlje *Rezultati i diskusija* se sastoji iz dva podpoglavlja a to su 1) Rezultati karakterizacije sintetizovanih materijala i 2) Rezultati metoda primene.

U poglavlju *Zaključak* sažeto je istaknut je doprinos ove doktorske disertacije, kao i planovi i mogućnosti daljeg istraživanja.

U poglavlju *Literatura* dat je spisak korišćenih referenci.

Na kraju, priloženi su Biografija autora, Naučni radovi publikovani u okviru izrade disertacije, Izjava o autorstvu, Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije dokorskog rada i Izjava o korišćenju.

### **3. OCENA DISERTACIJE**

#### **3.1. Savremenost i originalnost**

Pored toga što se ugljenični materijali kao i aktivni ugljenični materijali koriste više decenija uspeli smo kroz doktorsku disertaciju da dobijemo neke novitete i buduće ideje za neka dalja istraživanja. Koristili smo početnu sirovinu koja nije korišćena ranije za dobijanje aktivnih ugljeničnih materijala. Sintezom karakterizacijom aktivnih ugljeničnih materijala dobili smo nove materijale koji imaju dobra svojstva i koji su našli određenu primenu u elektrohemiji kao superkondenzatori i pokazali su dobar adsorpcioni kapacitet u cilju otklanjanja boja. Takođe dobrom optimizacijom početnih parametara moguće je dobiti materijale sa unapred definisanim svojstvima.

#### **3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu**

Tokom izrade doktorske disertacije, kandidat Sanja S. Krstić, dipl. inž. tehnologije, koristila je udžbenike, priručnike, monografije i radove objavljene u međunarodnim časopisima sa literaturom značajnom za izradu disertacije, u kojima su teorijski i eksperimentalno proučavana i analizirane osobine, metode dobijanja, karakterizacije, funkcionalizacije i primene aktivnih

ugljeničnih materijala, poređenih sa druge načinima sinteze i primene aktivnih ugljeničnih materijala kao i njihove osobine, mogućnosti modifikacije i funkcionalnosti, primene i ekonomsku isplativost sveukupnog proces dobijanja. Prikazane su prednosti korišćenja saharida kao početnih sirovina za dobijanje aktivnih ugljeničnih materijala i varijacije parametara u sintezi i aktivaciji u cilju dobijanja najoptimalnijeg rezultata. Glavni akcenat u ovoj disertaciji bila je optimizacija procesa sinteze kao i primena uzorka sa najprihvatljivijim karakteristikama u zaštiti životne sredine. Takođe, u listi referenci su i radovi kandidata koji su proistekli iz sprovedenih istraživanja u oblasti doktorske disertacije, a objavljeni u časopisima međunarodnog značaja.

Na osnovu pregleda korišćene literature i obrazloženja predložene teme doktorske disertacije, proizilazi da je kandidat adekvatno ovladao predmetnom oblasti istraživanja i da je detaljno upoznat sa aktuelnim stanjem istraživanja u oblasti.

### **3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda**

U postupku realizacije naučnih rezultata, odnosno predmeta i cilja istraživanja, kao i u svrhe potvrđivanja postavljene hipoteze, tokom izrade ove doktorske disertacije korišćene su opšte i poznate naučne metode i karakterizacije a dobijeni su novi materijali različitih osobina i funkcionalnosti koji su našli jedan deo primene koji je opisan u samoj doktorskoj disertaciji. Metode koje su korišćene za sintezu aktivnih ugljeničnih materijala su hidrotermalna karbonizacija sa mehanohemijom aktivacijom. Buduća istraživanja biće vezana za modifikaciju postojećih metoda sinteze kao i za funkcionalizaciju površina dobijenih materijala imogućnosti drugih vrsta primena kada je u pitanju zaštita životne sredine i adsorpcija zagađujućih materija iz okruženja. Takođe, vršilo bi se istraživanje u svrhe razvijanja novih, ekonomičnijih načina aktivacije kao i ispitivanje novih nekih polaznih materijala u svrhe dobijanja još boljih, usavršenijih materijala, za kompleksnije vrste primena.

### **3.4. Primljenljivost ostvarenih rezultata**

Istraživanja aktivnih ugljeničnih materijala spadaju u interdisciplinarnu oblast koja je značajna kako sa aspekta fundamentalnih istraživanja, tako i sa stanovišta tehnološkog razvoja i primene. Varijabilnost i širok spektar različitih mogućnosti u sintezi aktivnih ugljeničnih materijala kao i primena u različitim sferama naučnih istraživanja, čine ovu temu svestranom i neograničenom naučnom tematikom. S obzirom na to da se korišćenjem bio otpadnih materijala mogu dobiti materijali sa unapred definisanim osobinama sa kontrolisanim ekonomskim aspektima, uz pomoć poznatih i modifikovanih metoda kao vršenje naknadne funkcionalizacije aktivne površine aktivnih ugljeničnih materijala, ova oblast svakako predstavlja neiscrpan izvor novih istraživanja i visokokvalitetnih rezultata. Kako u svetu raste potražnja za energijom, čistom životnom sredinom i pijaćom vodom, dobijeni aktivni ugljenični materijali mogu da nađu adekvatnu primenu na mnogim poljima zaštite životnog okruženja.

### **3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad**

Kandidat Sanja S. Krstić, dipl. inž. tehnologije, je tokom izrade doktorske disertacije ovladala pronalaženjem i korišćenjem stručne literature; iskazala je izuzetnu stručnost u planiranju i realizaciji daljih eksperimenata. Takođe, ovladala je korišćenjem različitih metoda sinteze, karakterizacije materijala, i veoma organizovano pristupila sistematizaciji, analizi i tumačenju dobijenih eksperimentalnih rezultata, kao i iznošenju zaključaka. Kandidat poseduje sve kvalitete koji su neophodni za samostalni naučni rad.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

### **4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa**

Eksperimentalni podaci o dobijanju aktivnih ugljeničnih materijala od saharida kao polaznih materijala su tema kojom su se naučnici već bavili, ali s obzirom da su načini sinteze i aktivacije vrlo raznoliki i varijabilni, ispitivanje parametara procesa i optimizacija su bili zanimljiva tema istraživanja. Lignocelulozne biomase predstavljaju najugroženije obnovljive resurse na planeti i predstavljaju veoma kompleksne sisteme sastavljene od tri glavne komponente: celuloza, hemiceluloza i lignin. Osnovu celuloze čine ustvari, dva anhidrida D – glukoze. Polazeći od glukoze kao prostog šećera koji nastaje od celuloze, dodat je jos jedan prosti šećer kao polazni materijal a to je fruktoza, pošto se i u procesu hidrotermalne sinteze glukoza izomeriše u fruktozu. Kao polazni materijal dodata je i saharoza koja se sastoji od jednog molekula glukoze i jednog molekula fruktoze. U ovoj doktorskoj disertaciji, polazeći od ova tri polazna materijala, primenom metode hidrotermalne karbonizacije i mehanohemijske aktivacije hidroksidima, dobijeni su aktivni ugljenični materijali.

Naučni doprinos rezultata istraživanja ogleda se u:

- optimizaciji parametara procesa u cilju dobijanja aktivnih ugljeničnih materijala željene strukture i poroznosti,
- karakterizaciji i funkcionalizaciji tako dobijenih aktivnih ugljeničnih materijala,
- dobijena zavisnost i struktura mikro/mezo poroznosti aktivnih ugljeničnih materijala,
- primena novih aktivnih ugljeničnih materijala kao adsorbenata za uklanjanje teških metala kako u laboratorijskim, tako i na uzorcima iz rudnika „Grot“
- primena istih za uklanjanje zagađujućih boja iz životne sredine
- mogućnost usavršavanja i razvoj novih materijala za dalja istraživanja

### **4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja**

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji su sumirana nakon detaljne analize literature iz oblasti sinteze aktivnih ugljeničnih materijala kao i usavršavanje metoda za dobijanje aktivnih ugljeničnih materijala u cilju optimizacije parametara procesa. Modifikacija načina sinteze i odabir najkompatibilnijih parametara u cilju dobijanja materijala određenih karakteristika i hemije površine aktivnih ugljeničnih materijala, povećanje poroznosti i dobijanju najboljeg odnosa raspodela pora u cilju dobijanja novog materijala sa novim osobinama, od ključnog su značaja da bi se materijal mogao koristiti u konkretne svrhe.

Dobijeni rezultati otvaraju nove mogućnosti eksperimentalnih istraživanja u pravcu dobijanja novih aktivnih ugljeničnih materijala sa još boljim osobinama kao i na moguće ideje za stvaranje novih materijala sa poboljšanim adsorpcionim svojstvima što bi se moglo postići deponovanjem novih materijala (na primer nekih oksida cirkonijuma, cerijuma, titanijuma, getita, magnetita itd ), unutar mikro/mezopora postojećih aktivnih ugljeničnih materijala. Stoga, ova teza predstavlja sveobuhvatan naučno-istraživački rad sa mogućnošću daljeg usavršavanja i nadovezivanja u novim naučnim radovima.

### **4.3. Verifikacija naučnih doprinosa**

Kandidat Sanja S. Krstić, dipl. inž. tehnologije, je u svom istraživačkom radu vezanom za doktorsku disertaciju pod naslovom „*Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala*”, objavila jedan rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21), jedan rad u istaknutom međunarodnom časopisu (M22) jedan rad u međunarodnom časopisu (M24) i četiri saopštenja na međunarodnom skupu (M34).

## **NAUČNI RADOVI PUBLIKOVANI U OKVIRU IZRADE DISERTACIJE**

### **M21 - Rad u vrhunskom časopisu međunarodnog značaja**

**Sanja Krstić**, Milan Kragović, Maja Pagnacco, Vladimir Dodevski, Branka Kaluđerović, Miloš Momčilović, Ivica Ristović and Marija Stojmenović, HYDROTHERMAL SYNTHESIZED AND ALKALINE ACTIVATED CARBONS PREPARED FROM GLUCOSE AND FRUCTOSE-DETAILED CHARACTERIZATION AND TESTING IN HEAVY METALS AND METHYLENE BLUE REMOVAL, Minerals 2018, 8, 246; doi:10.3390/min8060246; ISSN 2075-163X, IF=1.835.

## **M22 - Rad u istaknutom međunarodnom časopisu**

**Sanja S. Krstić**, Milan M. Kragović, Vladimir M. Dodevski, Aleksandar D. Marinković, Branka V. Kaluđerović, Gregor Žerjav, Albin Pintar, Maja C. Pagnacco, Marija D. Stojmenović, INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DIFFERENT HYDROXIDES ON PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM SACCHAROSE. CHARACTERIZATION, THERMAL DEGRADATION KINETIC AND DYES REMOVAL FROM WATER SOLUTIONS, Science of Sintering, UDK 547.458.2; 665.587, ISSN 0350-820X; IF=0.667

## **M24 - Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom**

**S. Krstić**, B. Kaluđerović, V. Dodevski, A. Z. Bjelajac, STRUCTURAL PROPERTIES OF CARBON MICROSPHERES OBTAINED BY HYDROTHERMAL TREATMENT OF FRUCTOSE, Zaštita materijala, Vol. LVI, No.2, 2015: 155-159

## **M34 - Saopštenja na međunarodnim konferencijama štampana u izvodu**

1. **S. Krstić Mušović**, B.V. Kaluđerović, V.M. Dodevski, INFLUENCE OF THE pH ON THE FORMATION OF POROUS CARBONS PREPARED FROM HYDROCHARS ibid, p.53.
2. **S. Krstić Mušović**, B. Kaludjerović, V. Dodevski, R. Aleksić, A. Bjelajac, STRUCTURAL PROPERTIES OF HYDROCHAR OBTAINED BY HYDROTHERMAL TREATMENT OF FRUCTOSE, Ibid, Book of abstracts: p. 80; ISBN 978-86-80109-18-3.
3. **S. Krstić**, B. Kaluđerović, V. Dodevski, Đ. Čokeša, D. Brković, PREPARATION OF ACTIVE CARBON MICROSPHERES BY HYDROTHERMAL TREATMENT OF FRUCTOSE AND METHYLENE BLUE ADSORPTION KINETICS, IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry" March 4th-6th 2015 Jahorina, Bosnia and Herzegovina, Book of abstracts: p. 1187-1193.

4. **S. Krstić**, B. Kaluđerović, V. Dodevski, A. Bjelajac, PREPARATION OF CARBONACEOUS MICROSPHERES BY HYDROTHERMAL TREATMENT OF FRUCTOSE WITH PHOSPHORIC ACID AND DIAMETER SIZE COMPARISON, The Third Conference of The Serbian Society for Ceramic Materials, Belgrade, Serbia, June 15-17, 2015; Book of abstracts: p. 89. ; ISBN 978-86-80109-19-0.

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu svega iznetog, Komisija smatra da je doktorska disertacija Sanja S. Krstić dipl. inž. tehnologije, pod naslovom „*Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala*” predstavlja originalan i značajan naučni doprinos u oblasti Tehnološkog inženjerstva, odnosno užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala, što je potvrđeno objavljivanjem radova u relevantnim časopisima međunarodnog značaja i saopštenjima na međunarodnim konferencijama.

Na osnovu kvaliteta, obima i naučnog doprinosa postignutih rezultata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, da se doktorska disertacija kandidata Sanje S. Krstić, dipl. inž. tehnologije, pod naslovom „*Sinteza, funkcionalizacija i primena aktivnih ugljeničnih mikro i nano materijala*”, prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 13.08.2018. godine.

### ČLANOVI KOMISIJE

---

dr Aleksandar Marinković, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

dr Branka Kaluđerović, naučni savetnik

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“

---

dr Vesna Radojević, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

dr Petar Uskoković, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

dr Marija Stojmenović, naučni saradnik

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“