

## Ispitivanje specifične električne otpornosti guste hidromešavine pepela i povratne vode iz TE „Kostolac A” u laboratorijskim uslovima

Vojin Kostić<sup>1</sup>, Maja Grbić<sup>1</sup>, Predrag Branislavljević<sup>2</sup>, Žarko Janda<sup>1</sup>,  
Jovan Mrvić<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija  
[vojin@ieent.org](mailto:vojin@ieent.org)

<sup>2</sup> PD Termoelektrane i kopovi Kostolac, Nikole Tesle 5–7,  
12208 Kostolac, Srbija

**Kratak sadržaj:** U radu je prikazano merenje specifične električne otpornosti guste hidromešavine pepela i povratne vode iz TE „Kostolac A”. Merenja su sprovedena za četiri različite koncentracije uzoraka u laboratorijskim uslovima. Rezultati ispitivanja, navedeni u radu, idu u prilog praktične implementacije merne metode.

**Glavne reči:** specifična električna otpornost, provodni medijum, laboratorijski uslovi.

### 1. Uvod

Razumevanje fizičkih karakteristika nesavršenih provodnih medijuma (specifična električna otpornost i dielektrična konstanta) je od suštinskog značaja za implementaciju istih u elektroenergetskim objektima. Fizičke karakteristike uključuju električno, toplotno, dielektrično i hemijsko ponašanje i zavise od strukture, odnosno sastava nesavršenih provodnih medijuma [1]. Čak i male promene u sastavu uzrokuju značajne promene u električnoj provodnosti.

Specifična električna provodnost  $\sigma$ , odnosno njena recipročna vrednost  $\rho$  (specifična električna otpornost) u velikoj meri određuje sposobnost provođenja struje kroz medijum, odnosno koncentraciju slobodnih nosilaca naelektrisanja. Vrednost specifične električne otpornosti različitih materijala varira u širokim granicama, pa se može uzeti kao jedan od kriterijuma

klasifikacije materijala. Tako na primer, provodnici spadaju u materijale bez energetskog procepa čija se specifična električna otpornost ( $\rho$ ) kreće u granicama od  $10^{-8}$  do  $10^{-6} \Omega\text{m}$ . Sa druge strane, poluprovodnici se odlikuju relativno uskim energetskim procepom i specifičnom električnom otpornošću od oko  $10^{-6}$  do  $10^{10} \Omega\text{m}$ . Dielektrici se opet, odlikuju širokim energetskim procepom čije se vrednosti specifične električne otpornosti nalaze u opsegu od oko  $10^{10}$  do  $10^{18} \Omega\text{m}$  [1].

Za potrebe izrade projektne dokumentacije novog pepelovoda od TE „Kostolac A” do odlagališta Ćirikovac, izvršena su merenja specifične električne otpornosti tzv. povratne vode i guste hidromešavine (različitih koncentracija elektrofilterskog pepela i povratne vode) u laboratorijskim uslovima. Kako je na teritoriji Termoelektrane „Kostolac A” izveden sistem združenog uzemljenja, na koji su pored mrežastog uzemljivača visokonaponskog postrojenja (VNP) i glavnog pogonskog objekta, povezane i druge metalne mase koje normalno nisu pod naponom, ali usled kvara u visokonaponskom postrojenju i direktne galvanske veze dolaze na određene potencijale prema zemlji, predmetna merenja električnih osobina povratne vode i guste hidromešavine elektrofilterskog pepela su izvršena za potrebe procene iznošenja potencijala kroz medijum u pepelovodu u slučaju kvara u VNP, budući da pepelovod ima instalisan izolacioni prsten na svom početku. Drugim rečima, pitanje je da li medijum u pepelovodu poništava efikasnost izolacionog prstena i ako da u kojoj meri. Stoga je potrebno utvrditi kako se menja specifična električna otpornost nesavršenog provodnog medijuma u pepelovodu, u zavisnosti od različitih koncentracija elektrofilterskog pepela u sistemu sa povratnom vodom. Dobijeni rezultati merenja su prikazani i komentarisani u radu.

## 2. Opis ispitne metode i merne sonde

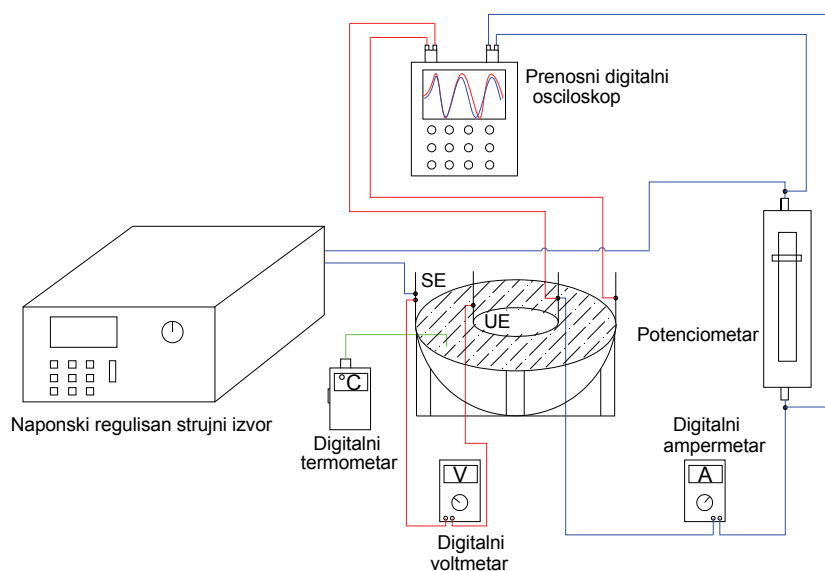
Opis ispitne metode i mernog sistema do detalja je prikazan i obrazložen u [2], ali će zbog jasnoće izlaganja i tumačenja eksperimentalnih rezultata ispitivanja metoda biti opisana u tekstu koji sledi u kratkim crtama.

Na slici 1 prikazano je ispitno kolo za merenje specifične električne otpornosti u laboratorijskim uslovima.

Merna sonda se sastoji od dve polusferne elektrode izrađene od bakra. Poluprečnik unutrašnje bakarne elektrode (UE) iznosi 4,7 cm, a poluprečnik spoljašnje elektrode (SE) 10,1 cm. Provodnici strujnog ispitnog kola označeni su na slici 1 plavom bojom, dok su provodnici naponskog ispitnog kola označeni crvenom bojom. Zelenom bojom označen je provodnik i sonda digitalnog termometra, koji služi za kontinualno merenje temperature provodnog medijuma prilikom ispitivanja.

Ispitna struja ( $I$ ), učestanosti 50 Hz, teče između polusfernih bakarnih elektroda uronjenih u provodni medijum. S obzirom na polusferni oblik merne

sonde inaktivni efekat se može zanemariti. Vrednost ispitne struje očitava se sa digitalnog ampermetra (Extech 542) redno povezanog u strujnom ispitnom kolu. Signal ispitne struje posmatra se na digitalnom osciloskopu (Metrix, tip Scopix III OX7104), posredno, preko vrednosti napona na potenciometru (500 Ω), redno povezanom u strujnom ispitnom kolu. Podešavanjem vrednosti električne otpornosti potenciometra ujedno se ograničava i vrednost ispitne struje  $I$ , što je značajno zbog kontrole zagrevanja merne sonde. Pad napona,  $U$ , očitava se na odgovarajućem digitalnom voltmetru (Fluke 289). Na prenosnom digitalnom osciloskopu posmatra se i signal napona u naponskom ispitnom kolu. Signali napona i struje posmatraju se pomoću digitalnog osciloskopa, da bi se zbog prisustva oksida bakra kontrolisao eventualni fazni pomak između  $U$  i  $I$ . Kontinualno merenje temperature provodnog medijuma (zbog potencijalnog zagrevanja prilikom ispitivanja) vrši se pomoću digitalnog termometra (Tegam 875C).



Slika 1 - Ispitno kolo za merenje specifične električne otpornosti provodnog medijuma u laboratorijskim uslovima

Rezistivnost provodnog medijuma izračunava se iz izraza:

$$R_{pm} = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Izraz (1) važi ako su  $U$  i  $I$  u fazi. Električna otpornost merne sonde je:

$$R_{pm} = \frac{\rho_{pm}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

gde je:

$\rho_{pm}$  – vrednost specifične električne otpornosti provodnog medijuma,

$r_1$  – poluprečnik unutrašnje elektrode merne sonde (u razmatranom slučaju je

$r_1=4,7$  cm) i

$r_2$  – poluprečnik spoljašnje elektrode merne sonde (u razmatranom slučaju je

$r_2=10,1$  cm).

Iz izraza (1) i (2) sledi:

$$\rho_{pm} = \frac{2 \cdot \pi \cdot U}{I \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} = 0,552 \cdot \frac{U}{I} \quad (3)$$

Baždarenje mernog sistema obavljeno je merenjem specifične električne otpornosti slane vode (3,5% masenih NaCl na 1 l destilovane vode, na temperaturi 21,4°C). Izmerena vrednost iznosi 0,653  $\Omega$ m i poklapa se sa vrednostima navedenim literaturi i u standardu IEEE 81-2012 [3]. Time je potvrđen pristup i prikazano da su efekti interakcije elektroda-elektrolit zanemarivi u posmatranom slučaju.

### 3. Rezultati merenja i diskusija

Za potrebe izrade elaborata [4], koristeći dopremljene uzorke elektrofilterskog pepela, iz TE „Kostolac A”, i povratne vode sa deponije pepela (odlagališta Ćirikovac), a prema izrazu (3), u laboratorijskim uslovima određene su vrednosti specifične električne otpornosti povratne vode i guste hidromešavine za sledeće koncentracije od interesa:

- 5% (50g pepela + 950g povratne vode po 1kg smeše),
- 30% (300g pepela + 700g povratne vode po 1kg smeše),
- 42% (420g pepela + 580g povratne vode po 1kg smeše) i
- 50%(500g pepela + 500g povratne vode po 1kg smeše).

Uz stalno praćenje temperature provodnog medijuma u toku eksperimenta (kolona 1, tabele 1–5), u drugoj koloni tabela 1–5 zabeležen je i vremenski period koji je protekao od ulivanja provodnog medijuma u merni sistem. Navedeno vreme je značajno zbog smirivanja procesa kretanja čestica elektrofilterskog pepela kroz povratnu vodu i naleganja istih na dno merne elektrode. Praksa je pokazala da je vremenski interval od 360 sekundi dovoljan za konačno smirivanje procesa, što će se i eksperimentalno potvrditi. Vrednosti specifične električne otpornosti provodnog medijuma, proširena merna nesigurnost, kao i konačni rezultati ispitivanja, navedeni su u trećoj, četvrtoj i petoj koloni tabela 1–5, respektivno. Izmerene vrednosti ispitne struje i padova napona kretale su se u opsegu od 370 – 380 mA, odnosno 3.2 V – 3.9 V, respektivno.

Oznake u Tabelama 1–5 imaju sledeće značenje:  
 $\tau$  – temperatura medijuma;  
 $t$  – vremenski period nakon ulivanja medijuma u merni sistem;  
 $\rho$  – vrednost specifične električne otpornosti;  
 $U$  – proširena merna nesigurnost izračunata prema [5, str. 23].

**Tabela 1.** Vrednosti specifične električne otpornosti povratne vode

$\tau$ [°C]	$t$ [s]	$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$U$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho \pm U$ [ $\Omega\text{m}$ ]
21	10	4,768	0,099	4,768 $\pm$ 0,099
21	180	4,770	0,099	4,770 $\pm$ 0,099
21	360	4,780	0,099	4,780 $\pm$ 0,099

**Tabela 2.** Vrednosti specifične električne otpornosti povratne vode sa 5% pepela

$\tau$ [°C]	$t$ [s]	$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$U$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho \pm U$ [ $\Omega\text{m}$ ]
21	10	4,820	0,099	4,820 $\pm$ 0,099
21	180	4,795	0,099	4,795 $\pm$ 0,099
21	360	4,776	0,098	4,776 $\pm$ 0,098

**Tabela 3.** Vrednosti specifične električne otpornosti povratne vode sa 30% pepela

$\tau$ [°C]	$t$ [s]	$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$U$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho \pm U$ [ $\Omega\text{m}$ ]
21	10	5,834	0,120	5,834 $\pm$ 0,120
21	180	5,873	0,121	5,873 $\pm$ 0,121
21	360	5,900	0,121	5,900 $\pm$ 0,121

**Tabela 4.** Vrednosti specifične električne otpornosti povratne vode sa 42% pepela

$\tau$ [°C]	$t$ [s]	$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$U$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho \pm U$ [ $\Omega\text{m}$ ]
21	10	6,455	0,133	6,455 $\pm$ 0,133
21	180	6,320	0,127	6,320 $\pm$ 0,127
21	360	5,925	0,133	5,925 $\pm$ 0,133

**Tabela 5.** Vrednosti specifične električne otpornosti povratne vode sa 50% pepela

$\tau$ [°C]	$t$ [s]	$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$U$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho \pm U$ [ $\Omega\text{m}$ ]
21	10	6,514	0,135	6,514 $\pm$ 0,135
21	180	6,418	0,133	6,418 $\pm$ 0,133
21	360	6,146	0,123	6,146 $\pm$ 0,123

Relativno odstupanje rezultata ispitivanja specifične električne otpornosti, u zavisnosti od vremenskog perioda proteklog nakon ulivanja medijuma u mernu sondu, navedenih u Tabelama 1–3 iznosi 0,25%, 0,91% i 1,13%, respektivno. Navedena odstupanja mogu se smatrati zanemarljivim u praksi. Veća relativna odstupanja zabeležena su za veće koncentracije

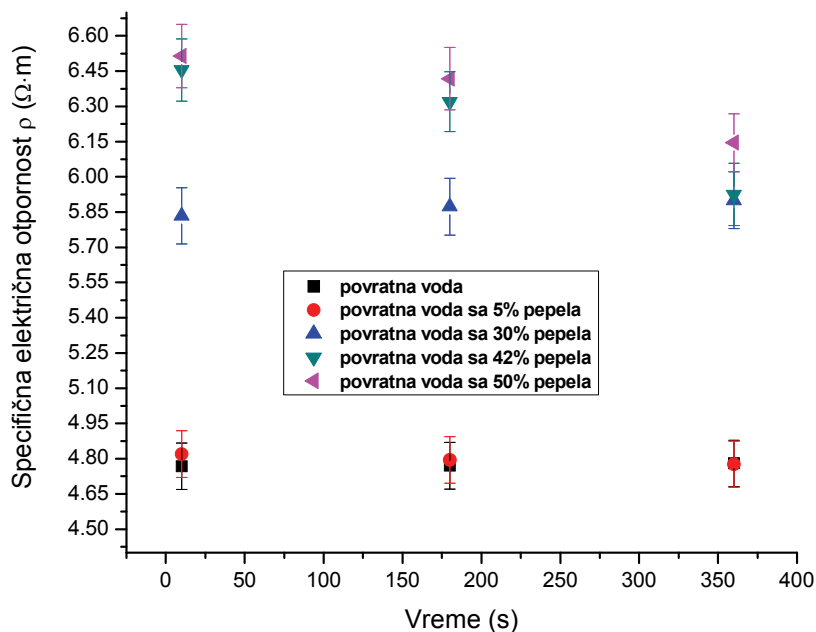
elektrofilterskog pepela (42% i 50%, Tabele 4 i 5) i iznose 8,21%, odnosno 5,65%, respektivno.

Sa druge strane, relativna odstupanja specifične električne otpornosti sistema u kome je samo povratna voda, u odnosu na sistem sa različitim koncentracijama elektrofilterskog pepela, neposredno po ulivanju medijuma u mernu sondu, iznose: 1,09% (sistem sa 50g pepela + 950g povratne vode po 1kg smeše), 22,36% (sistem sa 300g pepela + 700g povratne vode po 1kg smeše), 35,38% (sistem sa 420g pepela + 580g povratne vode po 1kg smeše) i 36,62% (sistem sa 500g pepela + 500g povratne vode po 1kg smeše). Vidi se da sa porastom koncentracije elektrofilterskog pepela gusta hidromešavina poprima dielektrična svojstva, u odnosu na sistem u kome je samo povratna voda.

Relativna odstupanja specifične električne otpornosti sistema u kome je samo povratna voda, u odnosu na sistem sa različitim koncentracijama elektrofilterskog pepela, šest minuta nakon ulivanja medijuma u mernu sondu, iznose: 0,08% (sistem sa 50g pepela + 950g povratne vode po 1kg smeše), 23,43% (sistem sa 300g pepela + 700g povratne vode po 1kg smeše), 23,95% (sistem sa 420g pepela + 580g povratne vode po 1kg smeše) i 28,57% (sistem sa 500g pepela + 500g povratne vode po 1kg smeše).

Vidi se da su pri nižim koncentracijama pepela (5% i 30%), relativna odstupanja prilično ujednačena sa odstupanjima neposredno po ulivanju medijuma u mernu sondu. Pri višim koncentracijama pepela opadaju i vrednosti relativnih odstupanja u odnosu na stanje registrovano neposredno po ulivanju medijuma.

Rezultati ispitivanja navedeni u tabelama 1–5 prikazani su na slici 2. Na slici 2 su pored izmerenih vrednosti prikazani i intervali proračunate proširene merne nesigurnosti.



Slika 2 – Prikaz rezultata ispitivanja za različite koncentracije povratne vode i elektrofilterskog pepela iz TE „Kostolac A”

Sa slike 2 jasno se vidi da se intervali proširene merne nesigurnosti same povratne vode i povratne vode sa 5% elektrofilterskog pepela preklapaju u svim vremenskim periodima sa kojima je rađeno. Vrednost specifične električne otpornosti na zavisi od vremenskog perioda proteklog od ulivanja medijuma u mernu sondu.

Sličan karakter pokazuje i mešavina povratne vode sa 30% elektrofilterskog pepela, čija je vrednost specifične električne otpornosti praktično nezavisna od proteklog vremenskog perioda.

Sa druge strane vrednosti specifične električne otpornosti mešavine povratne vode i 42%, odnosno 50% pepela, jako zavise od vremenskog intervala proteklog nakon ulivanja medijuma u merni sistem (vrednosti opadaju po praktično eksponencijalnoj funkciji). Intervali proširene merne nesigurnosti mešavine povratne vode i 42%, odnosno 50% pepela, poklapaju se u svim vremenskim periodima i nakon 360 s praktično se izjednačavaju sa mešavinom 30% pepela i povratne vode.

Može se zaključiti da mešavina sa koncentracijom od 30% pepela i povratne vode dovodi do zasićenja smeše (do zasićenog vodenog rastvora rastvorljivih sastojaka analiziranog pepela) i da dalje dodavanje pepela ima značajnijeg uticaja samo po neposrednom ulivanju medijuma u mernu sondu.

## 4. Zaključak

Merenje specifične električne otpornosti guste hidromešavine pepela i povratne vode iz TE „Kostolac A”, za četiri različite koncentracije uzoraka, praktično je izvodljivo jedino u laboratorijskim uslovima.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja, izloženi u radu, ukazuju na nekoliko bitnih faktora:

- vremenski period protekao od ulivanja provodnog medijuma u merni sistem, za manje koncentracije pepela (do 30%) nema praktičnog značaja;
- povećavanjem koncentracije pepela gusta hidromešavina poprima izraženija dielektrična svojstva;
- koncentracija sa mešavinom 30% pepela i povratne vode dovodi do zasićenja smeše (do zasićenog vodenog rastvora rastvorljivih sastojaka analiziranog pepela) i dalje dodavanje pepela nema značajnijeg uticaja. Navedeno upućuje da dalje ispitivanje iznošenja potencijala na objektu, kroz izolovani pepelovod, treba da se vrši pri koncentracijama pepela manjim od 30%, pri čemu je najkritičniji slučaj kada se ima samo povratna voda u sistemu. Može se zaključiti da elektrofilterski pepeo ne sadrži jedinjenja koja podležu elektrolitičkoj disocijaciji u vodenom rastvoru i obaraju specifičnu električnu otpornost čiste povratne vode;
- nakon vremenskog intervala od 360 s dolazi do smirivanja procesa kretanja čestica elektrofilterskog pepela kroz povratnu vodu.

## Literatura

- [1] D. Raković, *Fizičke osnove i karakteristike elektrotehničkih materijala*, 2. izdanje, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1997.
- [2] V. Kostić, Ž. Janda, Z. Nedeljković, „Analiza frekvencijske zavisnosti specifične električne otpornosti tla – metoda merenja i praktična primena”, *Tehnika* 64 (2015) 3, pp. 481-486.
- [3] *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*, IEEE Standard 81-2012, Dec. 2012.
- [4] Izveštaj Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla” br. 3414045: „Ispitivanje specifične električne otpornosti guste hidromešavine pepela i povratne vode iz TE Kostolac A”, 2014. godina.
- [5] *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Sep. 2008.



**Abstract:** The paper presents the measured results of the resistivity values of dense ash slurry and return water mixture originating from the “Kostolac A” thermal power plant. The four different ash slurry water mixtures with different ash concentrations are tested under laboratory conditions. The results of the tests are listed. The practical implementation of the proposed measurement method is strongly supported by the results

**Keywords:** resistivity, conductive medium, laboratory conditions.

## **Testing of Resistivity of Dense Ash Slurry and Return Water from “Kostolac A” Thermal Power Plant under Laboratory Conditions**

Rad primljen u uredništvo: 18.06.2015. godine.

Rad prihvaćen: 15.09.2015. godine.

