

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

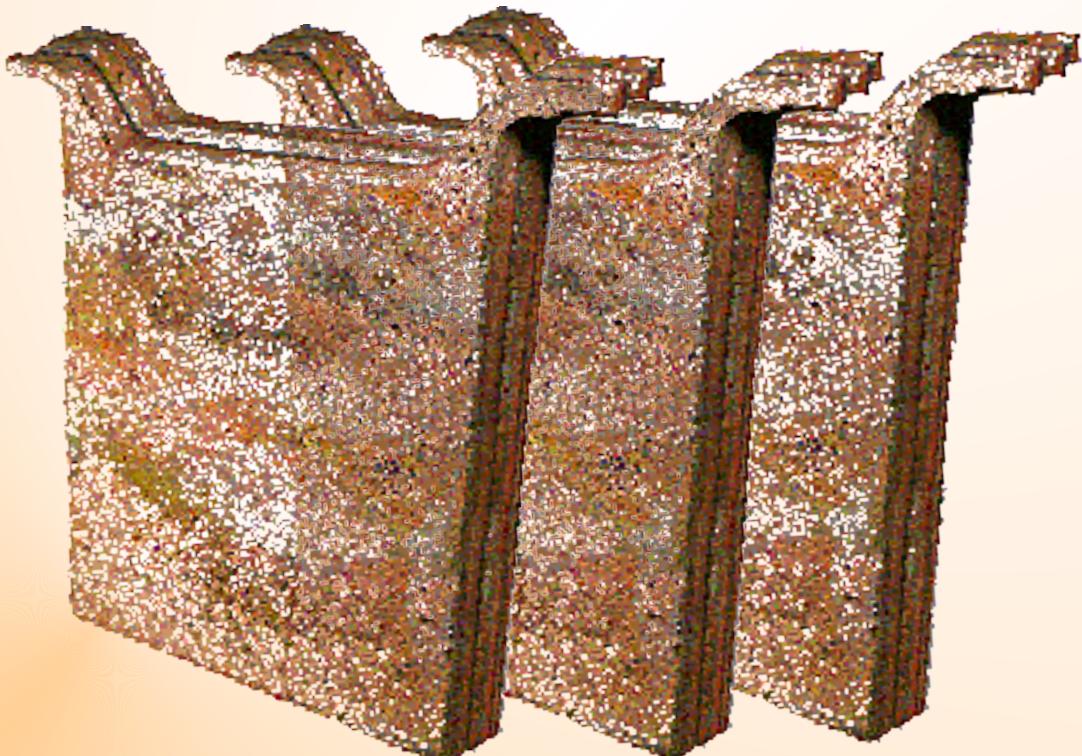


Cu

UDC 669.3
ISSN 0351-0212

Broj 2 Volumen 48 2023

BAKAR COPPER



BAKAR je časopis baziran na bogatoj tradiciji stručnog i naučnog rada ne samo iz oblasti dobijanja i prerade bakra, već i iz oblasti obojene i crne metalurgije, tehnologije, nanotehnologije, hemije, pripreme mineralnih sirovina, zaštite životne sredine, energetske efikasnosti, i primenjene informatike i povezanih srodnih oblasti.

Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

Glavni i odgovorni urednik

Dr Ana Kostov, *naučni savetnik, redovni član*

Inženjerske akademije Srbije

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs

Tel. 030/454-108

Zamenik glavnog i odgovornog urednika

Dr Dragan Milanović, *naučni savetnik*

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

E-mail: dragan.milanovic@irmbor.co.rs

Tel. 030/454-212

Urednik

Dr Vesna Marjanović, *dipl.inž.*

Prevodilac

Nevenka Vukašinović, *prof.*

Tehnički urednik

Suzana Cvetković, *teh.*

Priprema za štampu

Vesna Simić, *teh.*

Štampa

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Tiraž: 30 primeraka

Internet adresa

www.irmbor.co.rs

Izdavanje časopisa finansijski podržavaju

Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

ISSN 0351-0212

Indeksiranje časopisa u SCIndeksu i u ISI.

Izdavač

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

19210 Bor, Zeleni bulevar 35

E-mail: institut@irmbor.co.rs

Tel. 030/454-101

Sva prava zadržana.

Uredivački odbor

Dr Mile Bugarin, *naučni savetnik*

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Prof. dr Tatjana Volkov Husović, *red. prof.*

UB, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd

Dr Silvana Dimitrijević, *viši naučni saradnik*

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Prof. dr Bojan Jokić, *vanr.profesor*

UB, Fakultet primenjenih umetnosti u Beogradu

Prof. dr Sergey Krasikov

Institut za metalurgiju Uralskog odeljenja

Ruske akademije nauka, Rusija

Dr Milenko Ljubojev, *naučni savetnik*

Inženjerska akademija Srbije

Dr Lidija Mančić, *naučni savetnik*

Institut tehničkih nauka SANU

Dr Aleksandra Milosavljević, *viši naučni saradnik*

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Prof. dr Duško Minić, *red. prof.*

UP, Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica

Dr Milanče Mitovski

Inženjerska akademija Srbije

Prof. dr Cornelia Muntean

Politehnički univerzitet u Temišvaru, Rumunija

Dr Miroslav Sokić, *naučni savetnik*

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina Beograd

Dr Jasmina Stevanović, *naučni savetnik*

UB, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju Beograd

Prof. dr Mirko Stijepović, *vanr. profesor*

UB, Tehnološko-metalurški fakultet Beograd

Dr Srećko Stopić

RWTH Aachen, IME Aachen, Nemačka

Dr Rustam Sharipov

Kazahstanski britanski tehnički univerzitet Almati, Republika Kazahstan

Dr Nadežda Talijan, *naučni savetnik*

Akademija inženjerskih nauka Srbije

Dr Viša Tasić, *naučni savetnik*

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

COPPER is a journal based on the rich tradition of expert and scientific work not only in the field of copper production and treatment, but also in the field of non-ferrous and ferrous metallurgy, technology, nanotechnology, chemistry, mineral processing, ecology, energy efficiency, applied informatics, as well as related fields of science. Since 1968, published twice a year.

Editor-in-Chief

Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow,
full member of Engineering Academy of Serbia*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-108

Co-Editor

Ph.D. Dragan Milanović, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: dragan.milanovic@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-212

Editor

Ph.D. Vesna Marjanović, *B.Eng.*

English Translation

Nevenka Vukašinović

Technical Editor

Suzana Cvetković

Preprinting

Vesna Simić

Printed in

Mining and Metallurgy Institute Bor

Circulation: 30 copies

Web site

www.irmbor.co.rs

COPPER is financially supported by

The Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic Serbia
Mining and Metallurgy Institute Bor

ISSN 0351-0212

Journal indexing in SCIndex and ISI.

Published by

Mining and Metallurgy Institute Bor
19210 Bor, Zeleni bulevar 35
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-101

All rights reserved.

Editorial Board

Ph.D. Mile Bugarin, *Principal Research Fellow
Mining and Metallurgy Institute Bor*
Prof. Ph.D. Tatjana Volkov Husović
*UB, Faculty of Technology and Metallurgy
Belgrade*
Ph.D. Svetlana Dimitrijević,
*Senior Research Associate
Mining and Metallurgy Institute Bor*
Prof. Ph.D. Bojan Jokić
UB, Faculty of Applied Arts in Belgrade
Prof. Ph.D. Sergey Krasikov
*Institute of Metallurgy of Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Russia*
Ph.D. Milenko Ljubojev, *Principal Research Fellow
Engineering Academy of Serbia*
Ph.D. Lidija Mančić, *Principal Research Fellow
Institute of Technical Science of SASA*
Ph.D. Aleksandra Milosavljević,
*Senior Research Associate
Mining and Metallurgy Institute Bor*
Prof. Ph.D. Duško Minić
*UP, Faculty of Technical Sciences
Kosovska Mitrovica*
Ph.D. Milanče Mitovski
Engineering Academy of Serbia
Prof. Ph.D. Cornelia Muntean
Polytechnic University of Timisoara, Romania
Ph.D. Miroslav Sokić, *Principal Research Fellow
Institute for Technology of Nuclear and
Other Raw Materials Belgrade*
Ph.D. Jasmina Stevanović, *Principal Research Fellow
UB, Institute of Chemistry, Technology and
Metallurgy Belgrade*
Prof. Ph.D. Mirko Stijepović
*UB, Faculty of Technology and Metallurgy
Belgrade*
Ph.D. Srećko Stopić
RWTH Aachen, IME Aachen, Germany
Ph.D. Rustam Sharipov
*Kazakh British Technical University Almaty,
Republic of Kazakhstan*
Ph.D. Nadežda Talijan, *Principal Research Fellow
Academy of Engineering Sciences of Serbia*
Ph.D. Višnja Tasić, *Principal Research Fellow
Mining and Metallurgy Institute Bor*

BAKAR 48 (2023) 2 COPPER

UDK: 628.31:66.017(045)=163.41

Primljen: 19.06.2023.

DOI: 10.5937/bakar2302001P

Prerađen: 20.09.2023.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 03.10.2023.

Oblast: Materijali

MORFOLOGIJA METALNIH PENA I NJIHOVA PRIMENA ZA PROCES PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA

MORPHOLOGY OF METALLIC FOAMS AND THEIR APPLICATION IN THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS

Ana Petrović^{1a}, Radmila Marković^{1b}, Dragana Božić^{1c}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Srbija,

e-mail: ana.petrovic@irmbor.co.rs

Orcid:

^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-9815-6884>

^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-9754-1150>; ^{1c} <https://orcid.org/0000-0003-1055-8449>

Izvod

Metalna pena je čelijska struktura sastavljena od čvrstog metala sa visokim udelom pora ispunjenih gasom. Glavna podela metalnih pena je na pene sa otvorenim i zatvorenim čelijama, od čega najviše i zavisi oblast njihove primene. Pene sa otvorenim čelijama pogodne su za proces prečišćavanja otpadnih voda, jer dozvoljavaju protok vode kroz pore zadržavajući toksične materije u porama. Ovaj rad daje pregled literaturnih podataka o morfologiji i primeni bakarnih metalnih pena u prečišćavanju otpadnih voda.

Ključne reči: metalne pene, morfologija, otpadne vode, prečišćavanje, bakarne pene

Abstract

Metal foam is a cellular structure composed of solid metal with a high proportion of gas-filled pores. The main division of metal foams is into foams with the open and closed cells, on which the area of their application mostly depends. The open-cell foams are suitable for the wastewater treatment process, as they allow the water flow through the pores trapping the toxic substances in the pores. This study provides a summary of literature data on morphology and application the copper metal foams in the wastewater treatment.

Keywords: metal foams, morphology, wastewater, purification, treatment

1. UVOD

Napredak u nauci omogućio je dobijanje penastih materijala. Proučavanje osobina i načina dobijanja ove klase materijala je u protekloj deceniji doživelo veliku ekspanziju. Postoji izuzetno širok raspon primena zbog kombinacije osobina koje su povezane sa osobinom metala sa jedne strane i poroznom strukturom sa druge strane. Za visoko porozne materijale je poznato da imaju

visoku krutost kombinovanu sa veoma niskom specifičnom težinom i iz tog razloga se često koriste kao konstrukcioni materijali. Zbog svojih geometrijskih karakteristika imaju potencijalnu primenu kao izmenjivači topote, hemijski reaktori i filteri. Bio-medicinske primene su još jedno polje interesovanja [1].

Posedovanje izuzetne specifične snage i sposobnosti apsorpcije energije čini ih jedinstvenim strukturnim materijalom, koji se koristi u sistemima za hlađenje parom raketnih mlaznica, za topotne štitove za izduvne gasove aviona, itd. Takođe, mogu služiti za izradu zaštitnih struktura satelita ili za obradu kućišta avio-motora. U ovim situacijama, penasti materijali su nužno izloženi različitim temperaturama, a posebno povišenim. Materijali treba da obezbede da oprema može neometano da radi bez kvarova u uslovima visokih temperatura. Imajući u vidu da se uticaj visoke temperature na mehanička svojstva metalne pene ne može zanemariti, neophodno je izvršiti procenu bezbednosti opreme. Međutim, ovo se smatra nedostatkom primene metalnih pena, jer je test na visokim temperaturama skup, dugotrajan i zahteva naporan eksperimentalni proces [2].

Sa industrijskim razvojem, globalnim povećanjem stanovništva i klimatskim promenama, zagađenje vode postaje ključni problem za ljudska bića i životnu sredinu. Sanacija zagađene vode (uključujući pijaču vodu, podzemne vode i površinske vode) hitno zahteva nove napredne tehnologije [3]. Snabdevanje čistom vodom otežano je povećanjem potražnje i pogoršanjem kvaliteta vode. Kao rezultat, dostupnost čiste vode u zemljama u razvoju, postaje veliki izazov i hitna misija. Specifične osobine metalnih pena nude niz mogućnosti za rešavanje pitanja životne sredine, stoga su počele da se koriste i za tretman otpadnih voda [4].

U ovom radu dat je pregled literaturnih podataka o strukturi i primeni bakarnih metalnih pena na procese prečišćavanja zagađenih voda. U cilju dobianja čistih voda neophodno je ispuniti zakonske normative u pogledu stepena prečišćenosti. To se može postići primenom metalnih pena, dobijenih metodama koje su opisane u radu. Sa aspekta zaštite životne sredine primena metalnih pena na procese prečišćavanja voda služi kao prevencija od kontaminiranja zemljišta zagađenim vodama i obezbeđivanje adekvatnih uslova za očuvanje biljnog i životinjskog sveta, kao i zdravlja ljudi.

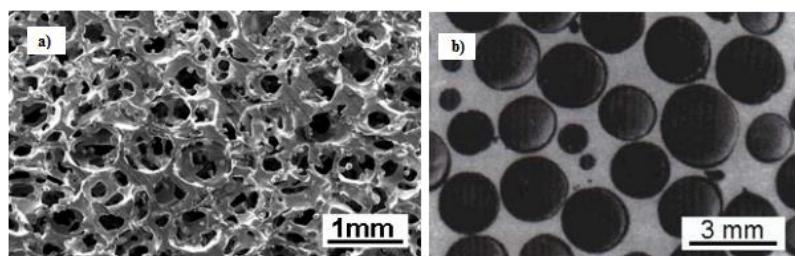
2. MORFOLOGIJA METALNIH PENA

Ćelijski materijali su veoma zastupljeni u svakodnevnom životu. U različitim sektorima industrije koriste se za izolaciju, prigušivanje, konstrukcije, filtriranje, i dr. Metalne pene su lagani ćelijski materijali inspirisani prirodom. Dobro poznati primjeri ovih tipova struktura su drvo, kosti i morski sunderi. Penjenje materijala kao što su polimeri, keramika i staklo je ustaljen i dobro poznat proces, za razliku od penjenja metala i metalnih legura. U poslednjih 40 godina izvedeni su različiti pristupi u cilju proizvodnje poroznih metalnih

struktura ili da bi se došlo do toga da metal zapeni. Neki od glavnih nedostataka bili su ekonomska neisplativost, kao i proizvodnja penastog materijala lošeg kvaliteta. Međutim, u poslednjih deset godina došlo je do progresa, tako da danas stoje na raspolaganju različite metode za proizvodnju metalnih pena.

Iako ne postoji tačna i opšteprihvaćena definicija pojma „pena“, mogu se razlikovati tečne i čvrste pene. Sam termin metalna pena generalno podrazumeva čvrstu metalnu penu. Tečna pena je fina disperzija gasnih mehurića u tečnosti. Hlađenjem tečne pene ispod tačke topljenja odgovarajućeg materijala, zapravo se dobija smrznuta tečna pena koja se tada naziva čvrstom penom. Čvrsta pena se pre svega odnosi na materijale koji su prvobitno bili u tečnom stanju. Međutim reč „pena“ se često koristi i za druge porozne metalne strukture koji se nikad nisu nalazili u tečnom stanju i nisu pene, kao što je na primer sintetovan metalni prah. Sličnost ovih materijala sa pravim metalnim penama ogleda se u njihovoj nepravilnoj strukturi, kao i visokoj poroznosti (40-90 % vol.) [5].

Mogu se razlikovati metalne pene sa zatvorenim, delimično zatvorenim, de-limično otvorenim i otvorenim ćelijama. Svaka od ovih struktura poseduje različite karakteristike. Metode proizvodnje, kao i struktura pene, određuju njihove osobine, a samim tim i oblasti primene. Ako metalna pena sadrži samo rubove pora (tako da se pore spajaju kroz otvorene površine) kaže se da se radi o peni sa otvorenim porama (slika 1a). U suprotnom, ako je svakapora sprečena da ulazi u njenu susednu to je pena sa zatvorenim porama, nalik kuhinjskom sunđeru (slika 1b). Na primer, otvorene strukture dozvoljavaju medijima da prođu kroz njih i naročito su aktuelne kod procesa topotognog provođenja, kao i u procesima prečišćavanja vode i vazduha. Struktura sa zatvorenim porama se koristi za apsorpciju energije. Iako metalne pene imaju visok potencijal i široku primenu, u poslednjih nekoliko godina, pojavila su se nove oblasti primene, koja nisu sva komercijalno relevantna. Neke od trenutno vodećih kompanija za proizvodnju metalne pene su: Alulight (Austrija), Cimat (Kanada), Aluinvent (Mađarska), Mpore (Nemačka), Recemat (Holandija) i Ekkentis (Švajcarska) [6].



Sl. 1. Trodimenzionalna pena sa (a) otvorenim porama (b) zatvorenim porama [7]

U nastavku teksta biće detaljnije opisane osobine metalnih pena i neki od važnijih i uspešnijih postupaka primene za procese prečišćavanja voda.

2.1 Osobine metalnih pena

Kod penastih materijala fizičke, mehaničke i termičke osobine se određuju istim metodama koje se primenjuju i za potpuno čvrsta tela. S obzirom da svojstva metalnih pena direktno utiču na njihovu primenu, neophodno je upoznati se sa mehaničkim i fizičkim osobinama koje ih karakterišu. Mehaničke i fizičke osobine metalnih pena su usko povezane sa njihovom čelijskom strukturom (otvorenom ili zatvorenom) i gustinom. Posledice čelijske strukture su mala težina i visoka čvrstoća. Postojanje primarnih celija obezbeđuje održavanje napona na niskom ili približno konstantnom nivou, što omogućava apsorpciju energije na niskom nivou napona. Čelijske strukture mogu takođe pomoći apsorpciji energije zvuka, ali jedan uslov mora biti zadovoljen, odnosno celije moraju biti povezane jedna sa drugom da ne bi došlo do gubitka trenja kad gas prolazi od jedne do druge celije. Čelijska konstrukcija koristi se za toplotnu izolaciju zbog niske toplotne provodljivosti, ali sa druge strane visoka toplotna provodljivost materijala čelijskog zida u kombinaciji sa velikom unutrašnjom površinom su idealne za izmenjivače toplote. Najvažnija osobina metalnih pena je njihova niska gustina. Za primer se može uzeti vrednost gustine Al pene koja se kreće od 0,1 do 0,4 g/cm³ (gustina Al je inače 2,7 g/cm³). Vrednosti Jangovog modula elastičnosti povećava se brzo sa povećanjem gustine metalne pene. Metalne pene poseduju dobre mehaničke i fizičke osobinama, čime je uveliko proširuje područje njihove primene [7].

2.2 Mehaničke osobine

Mehaničke osobine pena obično se definišu na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem pomoću pritiska. Sve pene pokazuju univerzalno deformaciono ponašanje, nezavisno od kog materijala su proizvedene. Jedno od najvažnijih mehaničkih svojstava za primenu u konstrukcijama je krutost ili Jungov modul elastičnosti. Dominantni faktori su, kao što je već pomenuto, gustina i struktura pene. Mehanička svojstva zavise uglavnom od gustine, ali na njih utiče i kvalitet čelijske strukture koji se pre svega odnosi na povezanosti i zaobljenost celija.

Poseban akcenat stavljan je na istraživanje termičkih osobina pena. Tačka topljenja, koeficijent termičkog širenja i površinska specifična toplota u većini slučajeva imaju iste vrednosti kao i kod materijala od kojih su pene napravljene. Dve veličine koje uvek imaju mnogo manje vrednosti od vrednosti polaznih materijala su toplotna provodljivost i difuzija.

Prigušenje mehaničkih vibracija je upotreba unutrašnjeg trenja u materijalu da bi se promenila energija vibracije u toplotu. Na ovaj način se redukuju prevelika buka i vibracije, i pretvaraju ih u toplotu.

Jedna od važnih osobina poroznih metala je apsorpcija zvuka, koja omogućava njihovu primenu pri izgradnji stambenih objekata i muzičkih instrumenata. Za smanjivanje intenziteta zvuka unutar zatvorenog prostora primenjuju se različiti mehanizmi u zavisnosti od mesta odakle zvuk dolazi. Ako zvuk dolazi iznutra biće neophodna apsorpcija zvuka, zašta su porozni materijali odličan izbor. Jedini uslov koji mora biti ispunjen da bi došlo do apsorpcije zvuka je da čelije moraju biti spojene jedna sa drugom. Ukoliko zvuk dolazi od spolja porozni materijali u kombinaciji sa drugim materijalima mogu pomoći u izolaciji od tog zvuka.

Mehanička svojstva metalnih pena mogu se poboljšati i prilagoditi u zavisnosti od željene primene, mehanizmima kao što su očvršćavanje, promena sastava legure, oplemenjivanje zrna i toplotnim tretmanima [6,7].

3. PRIMENA METALNIH PENA ZA PROCES PREČIŠĆAVANJA VODA

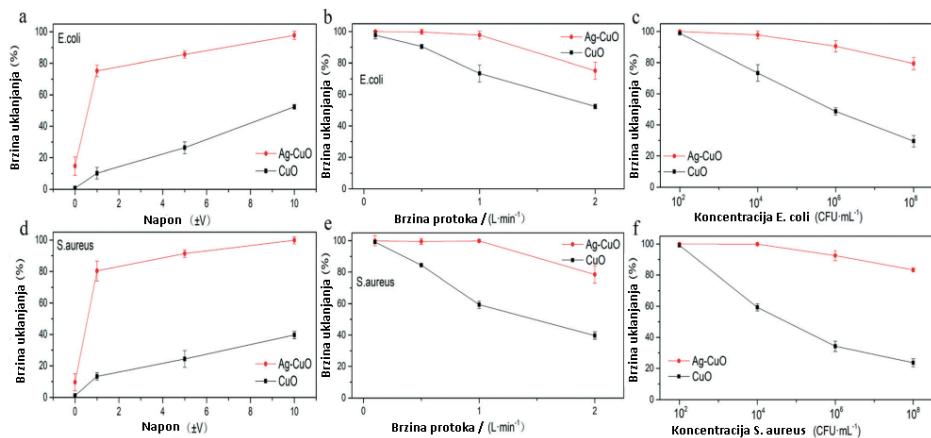
Zagađenje vode i samim tim nedostatak čiste vode, javlja se kao posledica ekonomskog razvoja. To je važno globalno pitanje koje se mora ozbiljno razmotriti, jer je život i zdravlje ljudi kao i životinja ozbiljno ugroženo. Kontaminirana voda može preneti bolesti kao što su dijareja, kolera, dizenterija, tifus i dečija paraliza. Tokom godina razvijeno je mnogo tehnologija za prečišćavanje vode u cilju prevazilaženja ovog problema. Neke od metoda koje se trenutno koriste za dezinfekciju vode su hemijski ili fizički tretmani: hlorisanjem, ozoniranjem, ultraljubičastim (UV) zračenjem, reverzna osmoza i napredni procesi oksidacije. Jedan od velikih nedostaka tradicionalnih metoda dezinfekcije vode su kancerogeni nusproizvodi, koji nastaju pre svega tokom hlorisanja i ozoniranja vode. S druge strane, metoda UV dezinfekcije vode troši veliku količinu energije.

Tehnologija sterilizacije elektroporacijom predstavlja novu metodu za dezinfekciju vode. Pokazalo se da ova metoda ima vrlo efikasno dejstvo protiv bakterija i virusa. Jedna od važnih prednosti je i ta što ne stvara štetne nusproizvode jer hemijske nečistoće nisu uključene u proces. Ipak, utrošak energije tokom dezinfekcije elektroporacijom može biti ogroman, stoga se ne može primeniti za dezinfekciju velike količine kontaminirane vode. Još jedan ograničavajući faktor njihove praktične primene je mala brzina procesa tretmana vode [8].

Grupa istraživača [8] razvila je novi kompozitni materijal, 3D bakarnu penu komodifikovanu Ag nanočesticama-CuO nanožicama. Bakarne pene su kupljene od kineske kompanije Shanghai Macklin Biotechnology Co. Glavne komponente nanokompozita su Cu, Ag i O. Priprema nanokompozita na bazi bakarnih pena izvedena je u dva koraka. Prvi korak sastoji se od pripreme CuO nanožica u smeši od NaOH i $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ tokom 10 minuta pri temperaturi na 40°C, a potom njihovog zagrevanja na vazduhu na 180°C u trajanju od 3 časa.

Tako pripremljene CuO nanožice uzgajane su na Cu peni mokrim hemijskim procesom. U cilju uklanjanja oksida na površini Cu pena potopljena je u 1,0 M rastvor HCl tokom 2 minuta, a zatim isprana dejonizovanom vodom i osušena pomoću N₂ visoke čistoće. Drugi korak podrazumeva uranjanje tako pripremljene bakarne pene u rastvor za galvanizaciju (pH 7,5) pri sobnoj temperaturi, kako bi se nanele Ag nanočestice. Rastvor sadrži AgNO₃ (3,5 g L⁻¹), [NH₄)₂S₂O₃] (25 g L⁻¹) i (K₂S₂O₈) (3,5 g L⁻¹). Oblaganje bakarne pene Ag nanočesticama trajalo je 30s, pri gustini katodne struje od 0,1 A dm⁻². Zagrevanjem na vazduhu na 180°C u trajanju od 1 h priprema nanokompozita se završava. Cilj ovog istraživanja bio je ispitivanje efikasnosti uklanjanja gram-negativne vrste Escherichia coli (E. coli) i gram-pozitivne vrste Staphylococcus aureus (S. aureus) iz vode. Bakterije su kultivisane tokom 12h, razblaživanjem sa NaCl 9,0 g L⁻¹ dobijene su različite koncentracije rastvora u rasponu od 102 do 108 jedinica kolonije po mL. Nanokompozit smešten je u filter uređaj sa dve paralelne elektrode pod naponom od 10 V. Da bi se izračunao uklanjanje bakterija koristi se metoda brojanja kolonija (CFU).

Na slici 2 prikazan je grafik zavisnosti brzine uklanjanja E. coli i S. aureus, upotrebom pripremljenog nanokompozita, od primjenjenog napona, brzine protoka tečnosti i bakterijske koncentracije. Kao što se vidi na slikama 2a i 2d, sa povećanjem napona povećava se i brzina uklanjanja E. coli i S. aureus. Na osnovu toga može se zaključiti da će dezinfekcija biti efikasnija što je jače električno polje. Takođe, dato je poređenje u efikasnosti uklanjanja bakterija korišćenjem nanokompozita i CuO nanožica bez dodatka Ag. Dok nanokompoziti pokazuju dezinfekcione performanse i u odsustvu primjenjenog napona, CuO ne-ma sposobnost dezinfekcije bez primjenjenog napona, što ukazuje da je Ag odgovorno za ubijanje bakterija. Nakon primene napona, dezinfekcija je znatno poboljšana. Maksimalno uklanjanje E. coli i S. aureus postignuto je pod naponom od 10 V i iznosi 97,77% i 99,87%, respektivno. Uticaj brzine protoka tečnosti na brzinu uklanjanja bakterija prikazan je na slici 2b i 2e. U stvarnim procesima tretmana vode, brzina protoka vode je obično 1–5 L min⁻¹, da bi se obezbedila efikasna sterilizacija vode i razumna potrošnja energije. Za razliku od prethodno razmatranog parametra, sa povećanjem brzine protoka, brzina uklanjanja E. coli i S. aureus se smanjuje. Kada je protok imao vrednost 0,5 L min⁻¹ i nanokompozit i CuO nanožice imaju 99,9% uklanjanja E. coli i S. aureus. Povećanjem protoka na 2 L min⁻¹, nanokompozit održava brzinu uklanjanja bakterija od 75%, dok sa druge strane CuO nanožice pokazuju slab učinak dezinfekcije. Na slici 2c i 2f dat je grafik brzine uklanjanja bakterija kao funkcija koncentracije bakterija. Najviša stopa uklanjanja E. coli i S. aureus kod oba materijala iznosi 99,9%, pri koncentraciji bakterija 102 CFU mL⁻¹. Na efikasnost dezinfekcije nanokompozita ne utiče značajno promena koncentracije bakterija u rastvoru, dok se kod CuO nanožica jasno primećuje da stopa uklanjanja bakterija opada sa povećanjem koncentracije bakterija [8].



Sl. 2. Efikasnost uklanjanja *E. coli* i *S. aureus* u zavisnosti od: (a) i (d) napona; (b) i (e) brzine protoka; (c) i (f) koncentracije *E. coli* i *S. aureus* [8]

Rezultati pokazuju da nanokompozit ima visok efekat sterilizacije, sa stopom većom od 99,9% pri protoku tečnosti od 1 L min^{-1} i ima značajan potencijal za praktičnu primenu. Međutim, u vodi koja je jako kontaminirana bakterijama, nanokompozit ne bi održao visoku efikasnotu uklanjanja bakterija sem ako se ne primeni visoki napon.

4. ZAKLJUČAK

Zemlja se kontinuirano kontaminira brojnim toksičnim supstancama kako iz prirodnih, tako i iz antropogenih izvora. Brzi rast populacije i sve veći industrijski razvoj prouzrokovali su ispuštanje različitih toksičnih elemenata, jedinjenja ili materijala u životnu sredinu. Mnogo novih hemikalija se koristi bez pravilne procene njihovih rizika po životnu sredinu i uticaja na ljudsko zdravlje. Ispuštanje neočišćenih industrijskih otpadnih voda u vodu i zemljište, upotreba pesticida i đubriva u poljoprivredi, neadekvatna upotreba štetnih hemikalija u potrošačkim proizvodima i sagorevanje fosilnih goriva su neki od glavnih uzroka zagađenja vode. Zbog sve većih posledica koje zagađene vode prouzrokuju naučna zajednica ima odgovornost da razvije efikasne tehnologije za sprečavanje dalje kontaminacije životne sredine.

Do sada je postignut veliki napredak u proučavanju metalnih pena kao adsorbenasa teških metala i zagađujućih komponenti iz vodene sredine. U ovom radu stavljeno je akcenat na metalne pene na bazi bakra, jer one predstavljaju adsorbense koji se lako suočavaju sa rastućim izazovima zaštite životne sredine, a posebno bakteriološke sanacije vode. Bakarne pene nude brojne prednosti u odnosu na druge adsorbense i poseduju jedinstvena svojstva, uključujući kruštost, malu težinu, a najvažnija osobina metalnih pena je njihova niska gustina.

Razvoj jeftinih i efikasnih adsorbenasa predstavlja imperativ u trenutnim istraživanjima, jer je neophodno uzeti u obzir i faktor cene koštanja da bi bila omogućena masovna primena adsorbensa.

Na osnovu dosadašnjih eksperimenata bakarne pene su se pokazale kao odlični adsorbensi bakterija (gljivica, algi i plesni) naročito *E. coli* i *S. aureus*. Njihova efikasnost zavisi od niza parametara kao što su početna koncentracija zagađujuće komponente, brzina protoka, gustina primenjene Cu pene, napon pri kojem se odvija proces adsorpcije i vreme kontakta adsobenta i tretiranog rastvora. U jezerima, rekama i okeanima primena Cu pena nije široko primenjivana tehnologija za kontrolu zagađenja vode, jer uprkos dobrim rezultatima eksperimenata na laboratorijskom nivou, još uvek nije do kraja istražena tehnologija. Trebalo bi izvršiti procenu rizika na životnu sredinu i ljudsko zdravlje pre masovne primene, jer metalne pene često imaju toksične efekte na vodene organizme kada se primenjuju u visokim koncentracijama.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/ 200052. Takođe, rad je finansijski podržan i od strane EU kroz projekat: "Building Ecosystem Integration Labs at HEI to foster Smart Specialization and Innovation on Sustainable Raw Materials - HEI4S3-RM" koji se realizuje u okviru 2-og EIT-HEI poziva.

LITERATURA

- [1] M. Kim, M. Kim, S. Hosseini, J. Jeong, K. C. Kim, Optics and Lasers in Engineering, 158 (2021) 107143.
- [2] Y. He, W. Li, M. Yang, P. Dong, Y. Ma, J. Yang, Composites Communications, 33 (2022) 101232.
- [3] D. Lico, D. Vuono, C. Siciliano, J. B. Nagy, P. De Luca, Journal of Environmental Management, 237 (2018) 636–643.
- [4] J. Mo, Q. Yang, N. Zhang, W. Zhang, Y. Zheng, Z. Zhang, Journal of Environmental Management, 227 (2018) 95–405.
- [5] J. Banhart, J. Baumeister, Materials Research Society Symposia Proceedings, 521 (1998) 121–132.
- [6] F. García-Moreno, Materials, 9(2) (2016) 85.
- [7] M. Oruc, R. Sunulahpašić, Savremeni metalni materijali, Zenica, Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici, (2005), 151-163.
- [8] L. Yue, S. Chen, S. Wang, C. Wang, X. Hao, Y.F. Cheng, Environmental Science: Nano 6(9) (2019) 2801–2809.

BAKAR 48 (2023) 2 COPPER

UDK: 542.1:006:66.017(045)=163.41

Primljen: 07.06.2023.

DOI: 10.5937/bakar2302009M

Prerađen: 06.09.2023.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 04.10.2023.

Oblast: Materijali

MEĐUPROVERA OPREME PRIMENOM X-KONTROLNE KARTE U LABORATORIJI ZA ISPITIVANJE MATERIJALA U INSTITUTU ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

INTER-VERIFICATION OF EQUIPMENT USING THE X-CONTROL CARD IN THE LABORATORY FOR MATERIAL TESTING IN THE MINING AND METALLURGY INSTITUTE BOR

Slavica Miletić^{1a}, Biserka Trumić^{1b}, Suzana Stanković^{1c},
Zdenka Stanojević Šimšić^{1d}

¹Mining and Metallurgy Institute Bor, Zeleni bulevar 35, 19210 Bor, Serbia

E-mail: slavica.miletic@irmbor.co.rs

Orcid:

^{1a} <https://orcid.org/0000-0003-4526-4715>; ^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-8328-7315>;

^{1c} <https://orcid.org/0000-0002-5976-4502>; ^{1d} <https://orcid.org/0000-0001-8584-746X>

Izvod

U savremenom poslovanju akreditovanih laboratorijs za ispitivanje prema zahtevima standarda SRPS ISO/IEC 17025 - Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorijs za ispitivanje i laboratorijs za etaloniranje najvažnija je ispravnost opreme za ispitivanje. Procedurom za rad Laboratorijs za ispitivanje materijala u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor propisano je da se dva puta u toku godine proverava i preispituje ispravnost opreme u cilju dobijanja pouzdanih i validnih rezultata ispitivanja.

U radu je prikazan postupak međuprovere ispravnosti uređaja za ispitivanje metalnih materijala zatezanjem primenom X-kontrolne karte.

X-kontrolna karta je pomoći alat za prikupljanje, obradu, analizu i prikazivanje podataka u cilju osiguravanja kvaliteta proizvoda i procesa. Ona pripada statističkoj kontroli procesa (Statistical process control - SPC). Kontrolni grafikon koji nastaje kao rezultat statističke obrade dobijenih podataka zatezne čvrstoće žice na uređaju za ispitivanje zatezanjem, u laboratorijs, ostlikava meru kvaliteta ispravnosti uređaja. Glavni cilj X-kontrolne karte je veoma brzo otkrivanje grešaka tokom procesa rada u Laboratorijs za ispitivanje materijala u Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, tj. provera ispravnosti uređaja.

Ključne reči: međuprovera opreme, kontrolna karta, ispitivanje metalnih materijala

Abstract

In the modern business of accredited testing laboratories according to the requirements of the SRPS ISO/IEC 17025 standard - General requirements for the competence of testing laboratories and calibration laboratories, the most important thing is the correctness of the testing equipment. The work procedure of the Laboratory for Material Testing in the Mining and Metallurgy Insti-

tute Bor requires checking the correctness of equipment twice a year in order to obtain the reliable and valid test results. This paper presents the procedure of intermediate verification the correctness of a device for testing the metal materials by tensioning, using a X-control card. The X-control card is an auxiliary tool for collecting, processing, analyzing and displaying data in order to ensure the quality of products and processes. It belongs to the Statistical process control - SPC. The control chart that is created as a result of the statistical processing of the obtained data of tensile strength of wire on a tensile testing device shows the measure of quality the device correctness in the laboratory. The main goal of the X-control card is a very fast detection of errors during the work process of the Laboratory for Material Testing in the Mining and Metallurgy Institute Bor, i.e., checking the correctness of device.

Keywords: intermediate equipment inspection, control card, metal material testing

1. UVOD

Kontrolne karte su tehnike statističke kontrole procesa (Statistical process control - SPC). SPC je onlajn sistem kontrole kvaliteta, definisan kao filozofija, strategija i metode za poboljšanje sistema, ishoda i procesa [1]. Statističke metode praćenja procesa imaju nezamenljivu poziciju u pametnoj kontroli procesa [2]. Iste su počele da se uspešno primenjuju dvadesetih godina prošlog veka. Implementacija kontrolnih karata je značajno porasla u poslednje vreme.

Tvorac kontrolnih karata je dr Suhart. Prema dr Suhartu, kontrolne karte imaju zadatok:

1. održavanja procesa proizvodnje u stanju kontrole,
2. dovođenje procesa proizvodnje pod kontrolom, i
3. signliziranje da je postignuto stanje kontrole.

Zadovoljstvo potrošača se može obezbediti proizvodima većeg kvaliteta, dok se veći kvalitet proizvoda može postići povećanjem kvaliteta procesa.

Dakle, otkrivanjem i eliminisanjem defekata u procesima, sprečiće se pojava defektnih proizvoda, koji preko nezadovoljstva potrošača narušavaju reputaciju kompanije i u konačnom smanjuju kvalitet njegovog poslovanja i pada proizvodnje.

Za otkrivanje grešaka procesa posebno su značajne kontrolne karte.

Područje primene kontrolnih karata su:

- Upravljanje kvalitetom procesa rada, u cilju sprečavanja proizvodnje neusklađenih proizvoda;
- Kontrola kvaliteta proizvoda u pojedinim fazama proizvodnje;
- Stabilizacija procesa na osnovu otkrivanja grešaka i njihovog isključivanja iz toka procesa;
- Analiza tačnosti i stabilnosti procesa rada;
- Usavršavanje tehnoloških procesa rada sa stanovišta kvaliteta;
- Analiza sistema grešaka obrade u toku odvijanja tehnoloških procesa;
- Primena u svim fazama nekog procesa (ulazna, procesna, izlazna kontrola i kontrola u eksploataciji) i svim tipovima proizvodnje.

Ključni aspekt primene statističke kontrole procesa, pa tako i kontrolne karte kao osnovnog alata u statističkoj kontroli procesa, je da se dobije zadovoljavajući proces, a time i tačan rezultat.

Polaznu osnovu za donošenje odluke o predvidljivosti procesa predstavljaju podaci, izdvojeni i obrađeni na način koji omogućava donošenje relevantnih zaključaka.

Razlozi za primenu X – kontrolne karte u Laboratoriji za ispitivanje materijala Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor je interna korist, održivost laboratorije, smanjenje troškova proizvodnje, kvalitet proizvoda, racionalnost i kontrola procesa.

X – kontrolna karta je jednostavna za konstruisanje i primenu ispitivanja materijala zatezanjem i daje dosta dobru sliku o tačnosti procesa i brzo uočavanje odstupanja od datog procesa [3].

X - kontrolna karta se smatra najvažnijim alatom kontrole kvaliteta procesa, uređaja i operatera. Ona se prikazuje kao grafikon na kojem vertikalna linija predstavlja redosled kontrole i horizontalnu vrednost parametra koji kontrolišemo na uzorcima određene veličine. Grafikon prikazuje varijaciju kvaliteta procesa u odnosu na određene kontrolne granice. Kontrolne granice su date standardom ili se izračunavaju u zavisnosti od procesa ili metode. Kada se varijacija procesa odvija u datim granicama, za taj proces se kaže da je u stanju statističke kontrole. U suprotnom, ako je varijacija procesa van granica kontrole, kaže se da je proces van statističke kontrole.

X - kontrolna karta je dijagram koji pokazuje tačno gde se nalazi proces koji se kontroliše. Izabrane X – kontrolne karte imaju ulogu međuprovere opreme, procesa i operatera i prihvatljive su za procenu kvaliteta dobijenih rezultata od strane Akreditacionog tela Srbije (ATS).

X- kontrolna karta je najjednostavniji oblik kontrole procesa koji pružaju detaljan uvid Laboratoriji za ispitivanje materijala u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor. Implementacijom metode: Ispitivanje zatezanjem metalnih materijala na sobnoj temperaturi, metoda B, SRPS EN ISO 6892-1:2020, dobijaju se rezultati ispitivanja koji se podvrgnuti statističkoj proveri.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

U ovom radu je prikazan postupak međuprovere opreme primenom X - kontrolne karte u Laboratoriji za ispitivanje materijala u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor. Implementacijom metode: Ispitivanje zatezanjem metalnih materijala na sobnoj temperaturi, metoda B, SRPS EN ISO 6892-1:2020, dobijeni su rezultati ispitivanja koji su podvragnuti statističkoj proveri.

U cilju sprovođenja postupka međuprovere ispravnosti uređaja za ispitivanje zatezanjem čelične žice, koristi se sopstveni referentni materijal sa

jasno definisanim i poznatim mehaničkim karakteristikama potvrđenim u izabranoj Akreditovanoj laboratoriji (ATEST o kvalitetu). Sopstveni referentni materijal je uzorak čelične žice odgovarajuće homogenosti i količine koji se u Laboratoriji za ispitivanje materijala Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor kontrolisano čuva i koristi za međuproveru ispravnosti uređaja i proveru kompetentnosti izvršioca do potrošnje istog.

Posedovanjem sopstvenog referentnog materijala sa Atestom o kvalitetu stvaraju se uslovi za ispitivanje mehaničkih karakteristika zatezanjem na uređaju za ispitivanje metalnih materijala zatezanjem.

X - kontrolnu kartu karakterišu centralna linija, \bar{x} -srednja vrednost dobijenih rezultata na grafiku prikazana u crvenoj boji, kao i kontrolne granice (donja i gornja granica) zatezne čvrstoće.

Donja granica predstavlja vrednosti nazivne zatezne čvrstoće ispitivane žice.

Gornja granica označava vrednosti nazivne zatezne čvrstoće ispitivane žice uvećane za odstupanje prema standardu SRPS ISO 3154:2014 za odgovarajući prečnik žice.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Laboratorija za ispitivanje materijala u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, poseduje čeličnu žicu sa Atestom o kvalitetu poznatih karakteristika iz Laboratorije mehaničkih ispitivanja čelične žice, užadi i priveznica, UNIS-Usha – Višegrad. Karakteristike ove žice su:

- Nazivni prečnik žice: $0,8 \leq d < 1 \text{ mm}$;
- Nazivna zatezna čvrstoća $R_m = 1570 \text{ N/mm}^2$.

Čelična žica je sopstveni referentni materijal koji se koristi za procenu ispravnosti uređaja i kompetentnosti osoblja u laboratoriji.

Na osnovu zahteva standarda SRPS ISO 3154:2014, použena čelična užad za izvozna postrojenja u rudarstvu – Tehnički uslovi isporuke, datih u tabeli 1, za nazivni prečnik žice sopstvenog referentnog materijala, određena je vrednost gornje zatezne čvrstoće $R_m = 1920 \text{ N/mm}^2$ ($1570 \text{ N/mm}^2 + 350 \text{ N/mm}^2$). Donja granična vrednost zatezne čvrstoće ima vrednost nazivne zatezne čvrstoće i iznosi 1570 N/mm^2 .

Tabela 1. Gornja granica tolerancije za nazivni prečnik žice [4]

Nazivni prečnik žice (d)	Gornja granica tolerancije za nazivnu čvrstoću (Rm)
mm	N/mm^2
$0,8 \leq d < 1$	350

Dalje, u cilju provere ispravnosti uređaja za ispitivanja materijala zatezanjem, izvršena su merenja zatezne čvrstoće na sopstvenom referentnom materijalu.

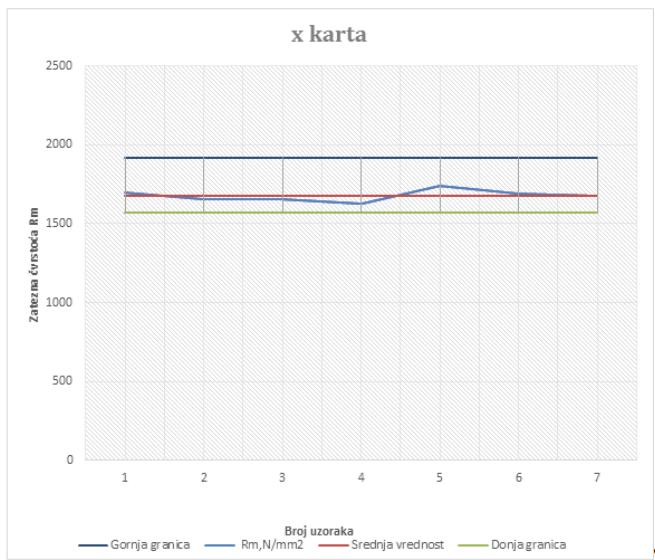
Dobijeni rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati ispitivanja zatezne čvrstoće, R_m na sopstvenom referentnom materijalu

Broj uzoraka	Izmereni prečnik žice, (mm)	Zatezna čvrstoća R_m , (N/mm ²)	\bar{x} -Srednja vrednost, R_m (N/mm ²)	Donja granica, R_m (N/mm ²)	Gornja granica, R_m (N/mm ²)
1	0,9	1700	1677.85	1570	1920
2	0,9	1659	1677.85	1570	1920
3	0,9	1654	1677.85	1570	1920
4	0,9	1627	1677.85	1570	1920
5	0,89	1739	1677.85	1570	1920
6	0,89	1689	1677.85	1570	1920
7	0,91	1677	1677.85	1570	1920

Nakon izvršenih ispitivanja sledila je statistička obrada dobijenih razultata korišćenjem X – kontrolne karte, prikazana na slici 1.

Na ordinati grafika, tj. X - kontrolne karte, upisuju se vrednosti karakteristike kvaliteta čiju varijaciju posmatramo. U ovom slučaju to je zatezna čvrstoća, R_m . Na apcisi grafika tj. X – kontrolne karte unose se vrednosti broja uzoraka.



Sl. 1. X - kontrolna karta

Na osnovu prikazanog grafikona X – kontrolne karte, može se zaključiti da dobijene vrednosti zatezne čvrstoće na ispitivanom sopstvenom referentnom materijalu uređaja za ispitivanje materijala zatezanjem, nalaze se u granicama između donje i gornje vrednosti zatezne čvrstoće i određene su na osnovu zahteva standarda SRPS ISO 3154:2014.

Dobijena X – kontrolna karta pokazuje da je proces pod kontrolom, odnosno da je uređaj za ispitivanje materijala zatezanjem ispravan i spreman za dalja ispitivanja.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana uloga X - kontrolne karte u Laboratoriji za ispitivanje materijala u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, za kontrolu ispravnosti uređaja za ispitivanje zatezanjem. U tu svrhu korišćen je sopstveni referentni materijal poznatih karakteristika. Ispitivanja zatezanjem metalnih materijala su vršena prema zahtevu standarda SRPS EN ISO 6892-1:2020: Ispitivanje metalnih materijala zatezanjem na sobnoj temperaturi, metoda B. Grafički prikaz X - kontrolne karate pokazuje da tokom procesa ispitivanja sopstvenog referentnog materijala, dobijene vrednosti zatezne čvrstoće ne prelaze kontrolne (donje i gornje) granice.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja zatezne čvrstoće sopstvenog referentnog materijala, zaključuje se da je uređaj za ispitivanje metalnih materijala zatezanjem ispravan, a sam proces pod kontrolom.

ZAHVALNICA

Istraživanja predstavljena u ovom radu su urađena uz finansijsku podršku Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, u okviru finansiranja naučnoistraživačkog rada u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor, prema ugovoru sa evidencionim brojem 451-03-47/2023-01/ 200052.

LITERATURA

- [1] G. Suman, D. Prajapati, Control chart applications in healthcare: A literature review, Int. J. Metrol. Qual. Eng., 9, 5 (2018).
<https://doi.org/10.1051/ijmqe/2018003>.
- [2] T. Smajdorová, D. Noskiewičová, Analysis and application of selected control charts suitable for smart manufacturing processes, Appl. Sci., 12(11), (2022) 5410. <https://doi.org/10.3390/app12115410>.
- [3] S. Prokić, Kontrolne karte i sposobnost procesa sa individualnim merenjima, Master rad, Univerzitet u Nišu, Prirodno matematički fakultet, Department za matematiku, 2019.
- [4] SRPS ISO 3154:2014 - Použena čelična užad za izvozna postrojenja u rudarstvu – Tehnički uslovi isporuke.

BAKAR 48 (2023) 2 COPPER

UDK: 543.42:628.4.038(045)=163.41

Primljen: 09.10.2023.

DOI: 10.5937/bakar2302015S

Prerađen: 14.11.2023.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 21.11.2023.

Oblast: Hemijske tehnologije

GC/MS ANALIZA OTPADNIH ULJA I NJIHOVA KARAKTERIZACIJA

GC/MS ANALYSIS OF WASTE OILS AND THEIR CHARACTERIZATION

Zorica Sovrlić^{1a}, Lidija Kalinović^{1b}, Sanela Vasiljević^{1c},
Vojka Gardić^{1d}, Miloš Đukić^{1e}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor
e-mail: zorica.sovrljic@irmbor.co.rs

Orcid:

^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-3715-1924>; ^{1b} <https://orcid.org/0009-0009-8889-1832>;

^{1c} <https://orcid.org/0000-0001-6478-5335>; ^{1d} <https://orcid.org/0000-0001-9865-3939>;

^{1e} <https://orcid.org/0000-0002-3307-4669>

Izvod

Otpadna ulja predstavljaju opasan otpad, jer mogu da sadrže visoke koncentracije metala, ugljovodonika, PAH-ova, hlorovanih jedinjenja, fenola i druge materije koje potiču od aditiva a nastaju kao rezultat rada različitih tipova motora. Ova vrsta otpada može da izazove velike probleme i kontaminaciju životne sredine kako zemljišta tako i vode ukoliko se ne tretiraju na pravi način i dođe do njihovog rasipanja. Jako je bitna njihova identifikacija i dalja karakterizacija kao opasnog otpada po regulativi za otpad Republike Srbije – Pravilnik o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada („Službeni glasnik RS“ br. 56/2010, 93/2019, 39/2021) i Pravilniku o uslovima, načinu i postupku upravljanja otpadnim uljima („Službeni glasnik RS“, br. 71/2010). U ovom radu rađena je GC/MS analiza različitih tipova otpadnih ulja (motorno, hidraulično, mašinsko, mineralno nehlorovano ulje, sintetičko ulje). Dobijeni hromatogrami su upoređeni sa hromatogramom standarda (Dr. Ehrenstorfer) koji sadrži isti odnos dizel ulja i mineralnog ulja bez aditiva. Na ovaj način izvršena je analiza tzv. „otisak prsta“ i karakterizacija za različite tipove otpadnih ulja što je jako bitno za upoređivanje sa analizom ulja u prirodnim uzorcima (voda, zemljište) kako bi se utvrdio originalni izvor zagadženja.

Ključne reči: Otpadna ulja, karakterizacija otpada, GC/MS analiza, ugljovodonici

Abstract

Waste oils are dangerous waste, because they can contain high concentrations of metals, hydrocarbons, PAHs, chlorinated compounds, phenols and other substances that come from additives and are created as a result of the operation of different types of engines. This type of waste can cause major problems and contamination of the environment, both soil and water, if they are not treated in the right way and they are wasted. Their identification and further characterization as hazardous waste according to the waste regulations of the Republic of Serbia - Rulebook on categories, testing and classification of waste ("Official Gazette of the RS" no. 56/2010, 93/2019,

39/2021) and Rulebook on the conditions, method and procedure of waste oil management ("Official Gazette of the RS", no. 71/2010). In this paper, GC/MS analysis of different types of waste oils (engine, hydraulic, machine, mineral non-chlorinated oil, synthetic oil) was performed. The obtained chromatograms were compared with the chromatogram of the standard (Dr. Ehrenstorfer) which contains the same ratio of diesel oil and mineral oil without additives. In this way, the analysis of the so-called "fingerprint" and characterization for different types of waste oils was performed, which is very important for comparison with analysis of oil in natural samples (water, soil) in order to determine the original source of pollution.

Keywords: Waste oils, waste characterization, GC/MS analysis, hydrocarbons

1. UVOD

Tretman otpada jedan je od najvažnijih postupka brige savremenog društva u pogledu očuvanja životne sredine. Korišćena, otpadna ulja za podmazivanje su nusproizvodi upotrebe ulja za podmazivanje u vozilima i mašinama koja se koriste za njihov adekvatan rad. Ulja se moraju redovno menjati, jer usled rada motora dolazi do različite kontaminacije vodom, suspendovanim materijama, metalima, solima i drugim česticama. Ovo za posledicu ima sve veću upotrebu ulja, jer dolazi do povećanog rasta kako industrije tako i broja vozila po domaćinstvu [1].

Smatra se da je svetska potrošnja ulja oko 40 miliona tona godišnje, a otpadna ulja koja nakon tretmana nastanu dostižu vrednost od čak 24 miliona tona na godišnjem nivou. Ovakava ulja predstavljaju štetan i opasan otpad pošto je veoma spor proces degradacije, a u njihov sastav ulazi veliki broj zagađujućih materija kao što su fenoli, jedinjenja cinka, hlora i fosfora, policiklični aromatični ugljovodonici PAH, razna hlorovana jedinjenja (PCB, PCDD/F, PCT), naftni ugljovodonici i druga jedinjenja koja potiču od aditiva. Za razliku od zagađenja naftom koje može da nastane usled izlivanja na lokalnom nivou, zagađenje korišćenim motornim uljem dešava se u celom svetu, jer su glavni izvori automobili - saobraćaj i industrija [2].

Osim motornih ulja, postoje i mnoga druga ulja za podmazivanje: industrijska transmisiona ulja, hidraulična ulja, ulja za termičku obradu, ulja za prenos topote, ulja za sečenje, električna ulja, ulja za podmazivanje prehrambenih mašina, itd. Od 1930. godine skoro sva ulja za podmazivanje su dobijena iz nafte. Hemski sastav ulja za podmazivanje, kao i svih ostalih naftnih derivata, varira u zavisnosti od izvora sirove nafte, procesa rafinacije i prisutnih aditiva. Proces proizvodnje ulja za podmazivanje značajno se promenio poslednjih godina kako bi se eliminisala nepoželjna jedinjenja, kao što su policiklični aromatični ugljovodonici (PAH-ovi). Alifatična jedinjenja (ciklična i aciklična) predstavljaju između 73 i 80% ukupne težine ulja. Ova frakcija se sastoji od alkana i cikloalkana od 1 do 6 prstenova. Mono-aromatični ugljovodonici čine 11-15% mase, di-aromati 2-5%, a poli-aromatične i polarne frakcije 4-8%. Polarna frakcija se sastoji od aromatičnih jedinjenja koja sadrže heteroatome poput sumpora, azota ili kiseonika. U određenim slučajevima, kada

ulje nije dobro rafinisano, aromatična jedinjenja mogu predstavljati 37-50% ulja. Frakciju aromatičnih ugljovodonika čine jedinjenja od 1 do 5 aromatičnih prstenova [3,4]. Ova varijabilnost u hemijskom sastavu rezultira jedinstvenim hemijskim „otiscima prstiju“ za svako ulje i pruža osnovu za identifikaciju izvora prosutog ulja. Tokom rada motora, ulje za podmazivanje se hemijski transformiše oksidacijom, pucanjem polimera, razgradnjom organometalnih jedinjenja, itd. Ova promena je posledica visoke temperature i velikih mehaničkih naprezanja kojima je ulje izloženo tokom rada motora [5-7].

Postoji širok spektar instrumentalnih i neinstrumentalnih metoda za analizu naftnih ugljovodonika, koje uključuju gasnu hromatografiju (GC), gasnu hromatografiju-masenu spektrometriju (GC-MS), tečnu hromatografiju visokih performansi (HPLC), infracrvenu spektroskopiju (IR), superkritičnu fluidnu hromatografiju (SFC), tankoslojnu hromatografiju (TLC), ultraljubičastu (UV) i fluorescentnu spektroskopiju, masenu spektrometriju odnosa izotopa i gravimetrijske metode. Od svih ovih tehnika, GC tehnike se najviše koriste [5-14].

Zagađenje otpadnim uljima može imati negativan uticaj na tlo, vodenu sredinu i ljude, ali i na atmosferu, kada dođe do njihovog sagorevanja [3]. Zbog toga je jako bitna karakterizacija izlivenih otpadnih ulja i njihovo povezivanje sa poznatim prvobitnim izvorima, predvideti potencijalno dugoročni uticaj, odabrati odgovarajući tretman i skladištenje tog ulja kao opasnog otpada, a sve sa ciljem zaštite životne sredine [6].

2. KARAKTERIZACIJA OTPADNIH ULJA

Svako ulje nakon upotrebe postaje otpad i sa njim se postupa u skladu sa Pravilnikom o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada („Službeni glasnik RS“, br. 56/2010, 93/2019, 39/2021) [15] i Pravilnikom o uslovima, načinu i postupku upravljanja otpadnim uljima („Službeni glasnik RS“, br. 71/2010) [16]. Upravljanje otpadnim uljima obuhvata više faza: sakupljanje, razvrstavanje, transport, skladištenje i tretman otpadnih ulja ili odlaganje otpadaka, odnosno ostataka posle tretmana. Postupak razvrstavanja je postupak selektivnog prikupljanja i međusobnog nemešanja različitih vrsta otpadnih ulja, tj. obezbeđivanje da se otpadna ulja ne mešaju sa drugim tečnostima i zagađujućim materijama, takođe se tom prilikom vrši i dodela indeksnog broja otpada u skladu sa važećim pravilnikom. Pred-tretman jeste postupak otklanjanja fizičkih nečistoća i vode uz primenu najbolje dostupnih tehnika [16].

Tretman otpadnih ulja predstavlja ponovno iskorišćenje i obuhvata postupke kojima se dobijaju novi proizvodi procesima regeneracije i drugim procesima i/ili se omogućuje ponovna upotreba i/ili direktno sagorevanje u postrojenjima za insineraciju ili za dobijanje toplotne energije. On se odvija u postrojenjima za

tretman na način i po postupku kojim se obezbeđuje zaštita zdravlja ljudi i životne sredine, u skladu sa Zakonom i posebnim propisima [15,16].

Termički tretman otpadnih ulja vrši se u energetskim i industrijskim postrojenjima. Otpadna ulja koja sadrže najviše 15% vode u ukupnoj mešavini ulja i vode, najviše 10 mg PCB/kg ulja, imaju tačku paljenja iznad 55°C i toplotnu moć koja je veća od 30 MJ/kg, mogu se su-spaljivati i koristiti kao gorivo u energetskim i industrijskim postrojenjima. Termički tretman otpadnih ulja, odnosno korišćenje otpadnih ulja u energetske svrhe se obavlja na način i po postupku tako da se poštuju granične vrednosti emisija u vazduh, u skladu sa posebnim propisom. Ako se u industrijskom postrojenju obavlja su-spaljivanje otpadnih ulja koja nemaju zahtevane karakteristike, primenjuju se posebni uslovi u skladu sa propisima koji uređuju spaljivanje opasnog otpada. Takođe se pepeo, mulj i drugi otpaci, odnosno ostaci koji nastaju u postupku tretmana otpadnih ulja smatraju opasnim otpadom i sa istima se postupa u skladu sa Zakonom i propisima kojima se uređuje upravljanje opasnim otpadom [16].

3. EKSPERIMENTALNI DEO

Za analizu su korišćena 6 otpadna ulja koja su imala različito poreklo, analizirana su kao otpad po standardu „Karakterizacija otpada-određivanje sadržaja ugljovodonika u opsegu od C₁₀ do C₄₀ gasnom hromatografijom EN 14039:2004“.

Za kalibraciju i upoređivanje hromatograma korišćen je standard Dizel i Mineralnog ulja bez aditiva (Dr. Ehrenstorfer).

Za pripremu uzoraka ulja korišćen je heksan (95% N-hexane, Fisher Scientific UK).

Analiza pripremljenih uzoraka rađena je na Agilent 7890B GC hromatografu sa Agilent 5977 MSD Masenim spektrometrom. GC razdvajanje je vršeno na: Agilent HP-5MS; prečnik: 0,25 mm; dužina: 30 m; debljina filma: 0,25 µm (5%-fenil)-metilpoliksilosan koloni. Korišćen je Agilent G4513A Autoinjektor, a injektovana je zapremina od 1µl pripremljenog uzorka u splitless modu, sa podešenom temperaturom Inleta i GC/MS transfer linije od 280°C.

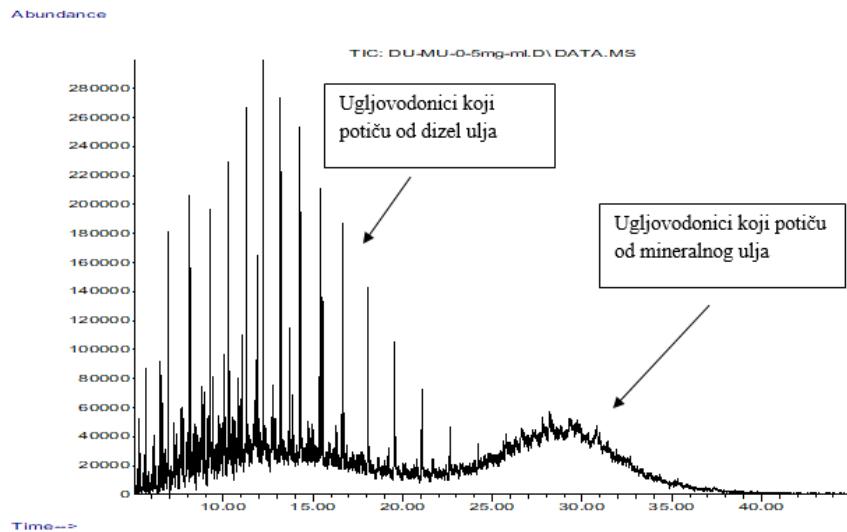
Kao noseći gas koristi se helijum čistoće 99.9999%.

Temperaturni program počinje sa temperaturom od 40°C (održava 2 min), a nakon toga porast temperature ide u dva nivoa. Prvi 15°C/min do temperature 190°C, a drugi 5°C/min do 280°C (održava 15min). Ukupno vreme trajanja analize je 45 minuta.

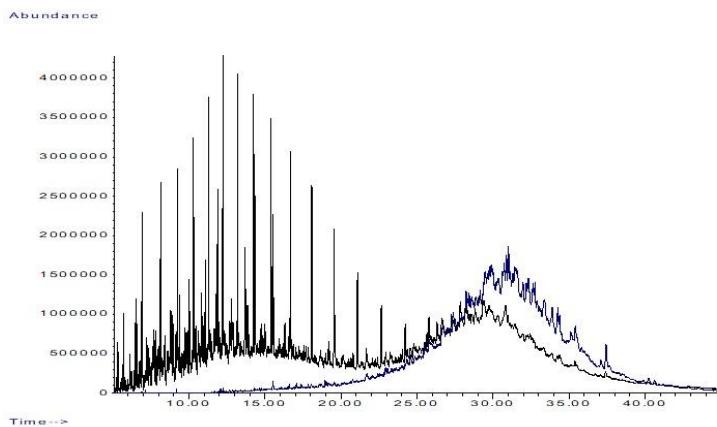
Za prikupljanje i obradu podataka korišćen je softver Mass Hunter.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

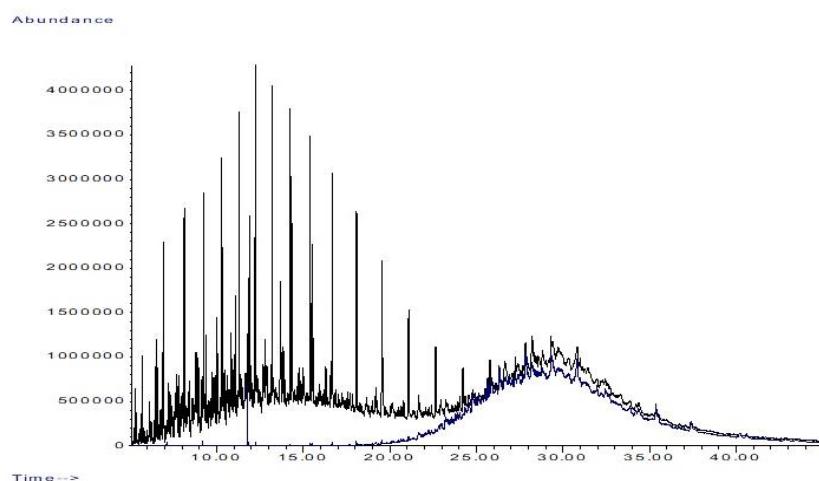
GC/MS ukupni jonski hromatogrami (TIC) analiziranih ulja su vizuelno upoređeni sa GC/MS ukupnim jonskim hromatogramom (TIC) standarda dizel i mineralnog ulja uz pomoć softvera 5977A MSD Data Analysis-opcija Overlay chromatograms. Dobijeni rezultati predstavljeni su slikama 1-7.



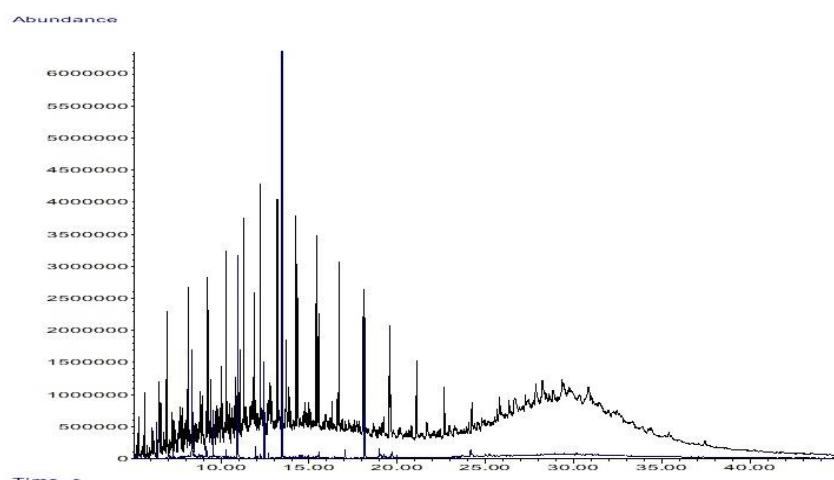
Sl. 1. GC/MS-Hromatogram standarda dizel i mineralnog ulja bez aditiva



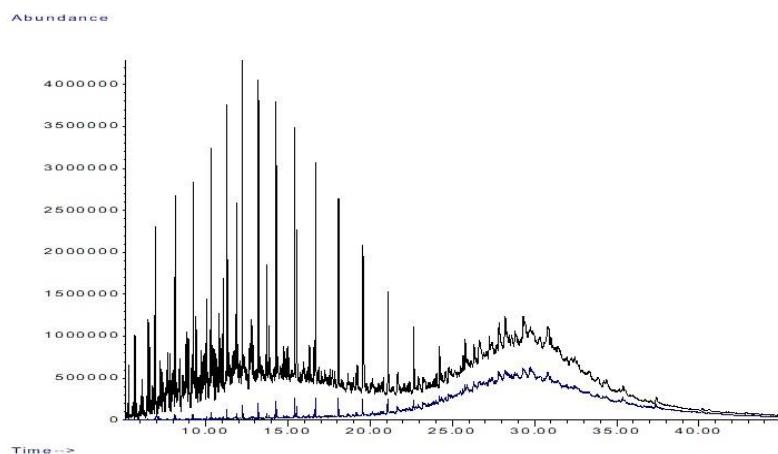
Sl. 2. GC/MS-preklopljen hromatogram standarda dizel i mineralnog ulja sa realnim uzorkom otpadnog procesnog mašinskog ulja



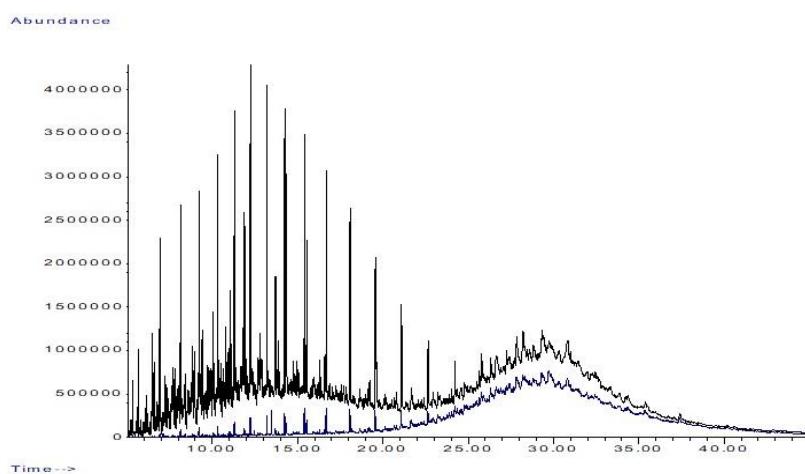
Sl. 3. GC/MS-preklopljen hromatogram standarda dizel i mineralnog ulja sa realnim uzorkom otpadnog mineralnog nehlorovanog hidrauličnog ulja



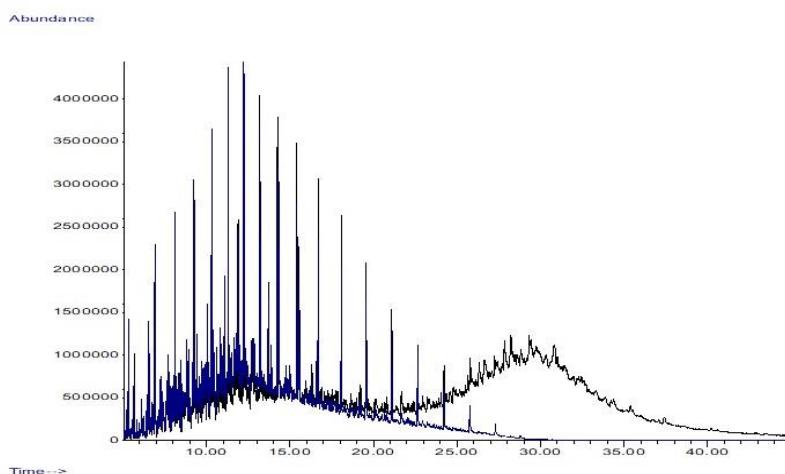
Sl. 4. GC/MS-preklopljen hromatogram standarda dizel i mineralnog ulja sa realnim uzorkom sintetičkog motornog ulja



Sl. 5. GC/MS-preklopljen hromatogram standarda dizel i mineralnog ulja sa realnim uzorkom nehlorovanog motornog ulja



Sl. 6. GC/MS-preklopljen hromatogram standarda dizel i mineralnog ulja sa realnim uzorkom otpadnog motornog ulja



Sl. 7. GC/MS-preklopljen hromatogram standarda dizel i mineralnog ulja sa realnim uzorkom pogonskog i dizel ulja

Na slikama od 1 do 7 crnom bojom je prikazan hromatogram standarda poznatog porekla dizel i mineralnog ulja, a plavom bojom prikazani su hromatogrami realnih uzoraka otpadnih ulja.

Na slici 1, u rasponu retencionog vremena od 5-25 min, nalaze se pikovi koji potiču od ugljovodonika koji se nalaze u dizel ulju opsega C_{10} - C_{28} . Na većim retencionim vremenima od 25 min nalaze se ugljovodonici koji potiču od mineralnog motornog ulja sa sadržem ugljovodonika $>C_{28}$.

Na slici 2, vidi se iz priloženih hromatograma da se u otpadnom mašinskom ulju nalaze ugljovodonici sa većim sadržajem C atoma.

Na slici 3, takođe kod otpadnog mineralnog nehlorovanog hidrauličnog ulja, postoje ugljovodonici sa većim sadržajem C atoma, a tzv. grba koja se javlja je identična kao i ona koja nastaje kod analize standarda mineralnog ulja.

Na slici 4, kod sintetičkog ulja, vide se samo karakteristični pikovi određenih jedinjenja koji potiču od aditiva.

Na slikama 5 i 6 prikazani su hromatogrami otpadnog motornog ulja i na njima se uočavaju pikovi koji potiču od ugljovodonika sa nižim brojem C-atoma, ali i grba poreklom od mineralnog ulja.

Na slici 7 prikazan je hromatogram otpadnog pogonskog i dizel ulja sa karakterističnim pikovima do retencionog vremena do 27 min. Na ovaj način je moguće odrediti primarni izvor zagađenja uljima u kontaminiranim uzorcima zemljišta ili vode.

4. ZAKLjuČAK

Zaključuje se da ulja za podmazivanje, koja se emituju ili potencijalno emituju u životnu sredinu, treba da sadrže samo biorazgradive sastojke kako bi se eliminisali negativni uticaji kako na životnu sredinu tako i na zdravlje ljudi. Sve više su u upotrebi sintetička ulja koja ne sadrže ugljovodonike. Automobilska industrija je u stalnom napretku proizvodnje i izrade motora koji koriste sve manju količinu ulja, a takođe i industrija modernizuje svoje mašine i pogone. Ali i dalje ostaje velika količina otpadnog ulja koja mora da se na pravi način skladišti i dalje preradi. Postupci prerade otpadnih ulja radi ponovne upotrebe i regeneracije imaju prednost u odnosu na korišćenje u energetske svrhe ili druge odgovarajuće postupke tretmana. Ako otpadna ulja ne mogu da se ponovno iskoriste, ponovno upotrebe ili upotrebe kao gorivo, tretiraju se kao opasan otpad i sa istim se postupa u skladu sa Zakonom, i drugim propisima.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministartsvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije za finansijsku podršku naznačenu Ugovorom o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/200052.

LITERATURA

- [1] A.M. Elkhaleefa, Waste Engine Oil Characterization and Atmospheric Distillation to Produce Gas Oil, Int. J. Eng. Adv. Technol., 5 (2016) 2249-8958.
- [2] M.J. Fuentes, R. Font, M.F. Gomez-Rico, I.M. Gullon, Pyrolysis and Combustion of Waste Lubricant Oil from Diesel Cars: Decomposition and Pollutants, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 79 (2007) 215-226.
- [3] R.Vazquez-Duhalt, Environmental Impactof Used Motor Oil, 79 (1989) 1-23.
- [4] P. Nowak, K. Kucharska, M. Kaminski, Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment, Int. J. Environ. Res. Public Health, 16 (2019) 1-13.
- [5] C.C. Chua, P. Brunswick, H. Kwok, J. Yan, D. Cuthbertson, G. van Aggelen, D. Shang, Tiered Approach to Long-Term Weathered Lubricating Oil Analysis: GC/FID, GC/MS Diagnostic Ratios, and Multivariate Statistics, Anal. Methods, 12 (2020) 5236-5246.

- [6] Z. Wang, M. F. Fingas, Development of Oil Hydrocarbon Fingerprinting and Identification Techniques, *Marine Pollution Bulletin*, 47 (2003) 423-452.
- [7] J. Manheima, K. Wehdea, W.T.J. Zhang, P. Vozkab, M. Romanczyka, G. Kilazb, H.I. Kenttämäaa, Identification and Quantitation of Linear Alkanes in Lubricant Base Oils by Using GC \times GC/EI TOF Mass Spectrometry, *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, 30 (12) (2019) 2670-2677.
- [8] W. Krasodomski, M. Krasodomski, GC/MS Application in the Structural Group Analysis of Basic Lubricant Oils. Part I – State of Knowledge, *Nafta-Gaz*, 8 (2010) 711-718.
- [9] Z. Liang, L. Chen, M.S. Alam, S.Z. Rezaei, C. Stark, H. Xu, R.M. Harrison, Comprehensive Chemical Characterization of Lubricating Oils used in Modern Vehicular Engines Utilizing GC \times GC-TOFMS, *Fuel*, 220 (2018) 792-799.
- [10] P. Kusch, Application of Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) and Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Py-GC/MS) in Failure Analysis in the Automotive Industry, *Engineering Failure Analysis*, 82 (2017) 726-732.
- [11] C. Yang, Z. Yang, G. Zhang, B. Hollebone, M. Landriault, Z. Wang, P. Lambert, C.E. Brown, Characterization and Differentiation of Chemical Fingerprints of Virgin and used Lubricating Oils for Identification of Contamination or Adulteration Sources, *Fuel*, 163 (2016) 271-281.
- [12] E. Dominguez-Rosado, J. Pichtel, Chemical Characterization of Fresh, Used and Weathered Motor Oil via GC/MS, NMR and FTIR Techniques, *Proceedings of the Indiana Academy of Science*, 1, 12(2) (2003) 109-116.
- [13] G.S. Douglas, S.D. Emsbo-Mattingly, S.A. Stout, A.D. Uhler, K.J. McCarthy, Introduction to Environmental Forensics, 8. Hydrocarbon Fingerprinting Methods, (2015), 201-309.
- [14] D. Jokić, T. Cvijanović, P. Dugić, Metode za odvajanje sadržaja ukupnih naftnih ugljovodonika u uzorcima zemljišta, *Zbornik radova, III Simpozijum biologa i ekologa Republike Srpske*, 2 (2015) 227-239.
- [15] Pravilnik o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada („Službeni glasnik RS”, br. 56/2010, 93/2019, 39/2021).
- [16] Pravilnik o uslovima, načinu i postupku upravljanja otpadnim uljima („Službeni glasnik RS”, br. 71/2010).

BAKAR 48 (2023) 2 COPPER

UDK: 542.1:006(045)=163.41

Primljen: 02.10.2023.

DOI: 10.5937/bakar2302025D

Prerađen: 02.11.2023.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 06.11.2023.

Oblast: Instrumentalne hemijske metode

VERIFIKACIJA I VALIDACIJA ANALITIČKIH METODA U SKLADU SA STANDARDOM ISO/IEC 17025

VERIFICATION AND VALIDATION OF ANALYTICAL METHODS IN ACCORDANCE WITH THE ISO/IEC 17025 STANDARD

Miloš Đukić^{1a}, Sanela Vasiljević^{1b}, Zorica Sovrlić^{1c}, Dragana Adamović^{1d}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor, Srbija

E-mail: milosdjukic@irmbor.co.rs

Orcid:

^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-3307-4669>; ^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-6478-5335>;

^{1c} <https://orcid.org/0000-0002-3715-1924>; ^{1d} <https://orcid.org/0000-0003-3683-4122>

Izvod

Validacijom analitičkih metoda obezbeđuje se pouzdanost i tačnost analitičkih podataka. Akreditovane laboratorije u skladu sa međunarodnim standardnom ISO/IEC 17025, odnosno srpskog standarda SRPS ISO/IEC 17025 moraju da ispune i dokumentuju izbor, validaciju ili verifikaciju analitičke metode. U postupku validacije i verifikacije obavezna je procena: limita detekcije (LoD), limita kvantifikacije (LoQ), linearnosti i merne nesigurnosti.

Ključne reči: validacija, verifikacija, ISO/IEC 17025

Abstract

Validation of analytical methods ensures reliability and accuracy of analytical data. Accredited laboratories in accordance with the international standard ISO/IEC 17025, that is the Serbian standard SRPS ISO/IEC 17025, must fulfill and document the selection, validation, or verification of the analytical method. In the validation and verification process, it is mandatory to assess: limit of detection (LoD), limit of quantification (LoQ), linearity and measurement uncertainty.

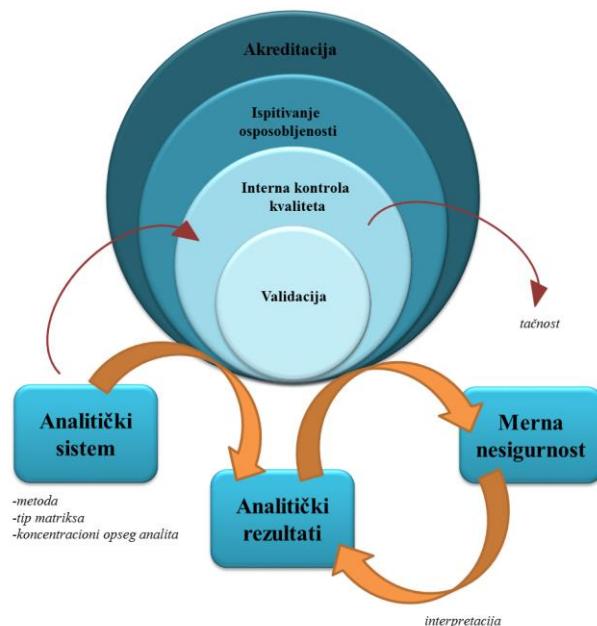
Keywords: validation, verification, ISO/IEC 17025

1. UVOD

Primena standarda ISO/IEC 17025, predstavlja „zlatni“ standard u radu akreditovanih laboratorijskih sredina koje sprovode sistem menadžmenta u svom radu. Kako bi se osigurao kvalitet dobijenih rezultata, dokazala kompetentnost i pouzdanost na tržištu, laboratorijskih (telo za ocenjivanje usaglašenosti, TOU) mora u skladu sa zahtevima tačke 7.2 iz standarda ISO/IEC 17025, da ispunjava i dokumentuje izbor, validaciju ili verifikaciju analitičke metode.

Ocenjivanje komponentnosti TOU, kao i proveru aktivnosti rada u skladu sa odgovarajućim standardima sprovodi nacionalno telo za akreditaciju Republike Srbije, Akreditaciono telo Srbije (ATS), čiji je osnivač Republika Srbija.

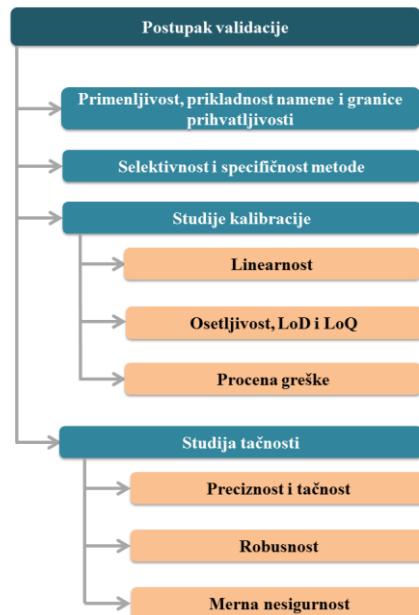
U osiguranju kvaliteta laboratorije postoji nekoliko nivoa koji se moraju ispuniti kako bi laboratorijska bila kvalifikovana i kompetentna za sprovođenje svojih analiza. Validacija metode prvi je korak kojim se dokazuje da analitički sistem koji se sastoji od protokola metode, tipa matriksa i koncentracionog opsega analita u uzorku odgovara dobijenom analitičkom rezultatu sa odgovarajućom mernom nesigurnošću, slika 1 [1].



Sl. 1. Različiti nivoi osiguranja kvaliteta u laboratoriji (adaptirano iz [1])

Postupak validacije može se podeliti u četiri koraka, kako je navedeno slici 2:

- Određivanje primenljivosti i prikladnosti metode;
- Određivanje selektivnosti i specifičnosti;
- Studija kalibracije (određivanje područja linearnosti, osetljivosti, limita detekcije i limita kvantifikacije); i
- Studija tačnosti (određivanje preciznosti i tačnosti, robusnosti i nesigurnosti). [2]



Sl. 2. Prikaz koraka validacije (adaptirano iz [2])

Karakteristike koje trebaju biti ispunjene prilikom validacije ili verifikacije analitičke metode dati su u tabeli 1 [3-4].

Tabela 1. Karakteristike koje se određuju prilikom validacije i verifikacije metode [3]

Karakteristika	Validacija	Verifikacija
Specifičnost/selektivnost	●	●
Linearost/kalibraciona funkcija	●	●
Tačnost	●	●
Preciznost	●	●
Osetljivost	●	●
Kriterijum detekcije	●	●
Granica detekcije	●	●
Granica kvantifikacije	●	●
Opseg primenljivosti	●	●
Robusnost	●	●
Postojanost	●	●
Ponovljivost	●	●
Nesigurnost merenja	●	●

Legenda: ● – potrebno proceniti ● – nije potrebno proceniti

2. KARAKTERISTIKE IZVOĐENJA

2.1 Specifičnost i selektivnost metode

Zajednički imenitelj svake analitičke metode je sposobnost određivanja željenog analita u uzorku u prisustvu ostalih komponenti matrice. U praksi su veoma retki slučajevi da uzorak sadrži samo određivani analit, jer su takvi uzorci sporadični ili se radi o sintetičkim uzorcima.

Specifičnost i selektivnost metode su dva različita pojma i u praksi se veoma poistovećuju. Specifičnost metode se definiše kao mogućnost određivanja samo jednog specifičnog/ciljanog analita u prisustvu drugih komponenti uzorka bez ometanja, pri čemu instrumentalni signal potiče od tog analita. Selektivnost se definiše kao mogućnost metode da se njenom primenom može tačno i specifično odrediti grupa sličnih sastojaka u uzorku. Svaki sastojak daje zasebne signale koji međusobno ne utiču na rezultat [3, 5-6].

2.2 Linearnost/kalibraciona funkcija

Linearnost je definisana kao mogućnost metode da unutar određenog područja daje rezultate koji su proporcionalni koncentraciji analita u uzorku. Standardi koji se koriste za kalibraciju metode moraju biti homogeni i stabilni. Za potvrdu linearnosti metode potrebno je uzeti najmanje pet različitih koncentracija, odrediti jednačinu pravca ($y=ax+b$), koeficijent korelacije (k), nagib (a) i odsečak (b). Nagib pravca je parametar koji ukazuje na osetljivost metode, a odsečak na sistematsku grešku. Vrednost koeficijenta korelacije treba da bude $k \geq 0.99$, dok je vrednost $k \geq 0.98$ prihvatljiva za vrlo niske koncentracije [6-7].

2.3 Tačnost metode

Tačnost metode predstavlja razliku između eksperimentalno izmerene i prave vrednosti. Tačnost metode se najčešće validuje iz razloga da prava vrednost nije poznata, i izražava se tzv. „recovery“ vrednošću, R (procentni prinos ili efikasnost) izraženu u procentima:

$$R = \frac{X_i}{X_p} \cdot 100\% \quad (1)$$

gde su: X_i – eksperimentalno izmerena vrednost, X_p – prava vrednost

Izračunavaju se dve „recovery“ vrednosti, donja i gornja, tj. minimalna i maksimalna (R_{\min} i R_{\max}) vrednosti izražene u procentima. Za metodu se kaže da je tačna ako se R vrednost nalazi u granicama od 95-105%.

Odstupanje (bias, B) je jedan od vidova izražavanja tačnosti, po relaciji:

$$B = \frac{X_i - X_p}{X_p} \cdot 100\% \quad (2)$$

Bias se definiše kao stalna greška u izmerenim vrednostima u odnosu na pravu vrednost i predstavlja tzv. sistematsku grešku procedure. Može da varira u zavisnosti od matriksa i nivoa koncentracije. U toku postupka validacije treba ispitati više različitih matriksa i određeni broj nivoa koncentracije.

Istinitost je još jedan od načina iskazivanja tačnosti i definisan je:

$$istinitost = \frac{X_{ism}}{X_p} \cdot 100\% \quad (3)$$

gde su: X_{ism} – eksperimentalno izmerene vrednosti svih merenja, X_p – prava vrednost

U praksi tačnost metode se sprovodi na nekom od sledećih načina:

- Ispitivanjem sertifikovanih referentnih materijala (CRM);
- Ispitivanjem obogaćenih uzoraka i određivanjem procenta prinosa; i
- Poređenjem sa rezultatima koji su dobijeni nekom drugom standardnom metodom, koja je već potvrđena kao tačna [3, 5-6].

2.4 Preciznost metode

Preciznost analitičke metode predstavlja meru bliskosti slaganja rezultata niza merenja izvedenog iz istog homogenog (autentičnog) uzorka. Uzorak se meri n puta u svakoj od m seriji. Za ocenjivanje glavnog izvora nesigurnosti, treba izabrati broj ponavljanja (n) i broj serija (m). Mali broj analiza pružiće standardnu devijaciju koja ima mali značaj. Procena standardne devijacije u direktnoj je vezi sa brojem pridruženih stepeni slobode, i ako je broj stepeni slobode manji od 6, procena standardne devijacije je nedovoljno informativna.

U literaturi se navodi da treba uradati dva ponavljanja ($n=2$) i 5-10 serija ($m=5$ do 10), pri čemu je obezbeđena procena ponovljivosti i međuserijske standardne devijacije sa približno jednakim brojem stepeni slobode. U slučaju da se analiza izvodi na jednom uzorku, onda se spovodi na dve paralelne probe, odnosno duplikatu, a rezultati čine grupu. U slučaju da se radi o specifičnim analitičkim metodama, standardizovanim metodama, potrebno je izvršiti modifikaciju predloženog plana ponovljivosti.

Preciznost se izražava kao ukupna standardna devijacija s_{tot} i predstavlja zbir standardne devijacije unutar serije s_w (tip preciznosti koji odgovara merenjima izvršenim pod uslovima ponovljivosti, tj. ista metoda, isti materijal, isti analitičar, ista laboratorija, ista oprema i kratak vremenski period) i standardne devijacije između serija s_b (tip preciznosti koji odgovara merenjima izvršenim u promenljivim uslovima u jednoj laboratoriji, ista metoda, ista laboratorija, drugi analitičar, druga oprema, duži vremenski period). Neki autori navode i standardnu devijaciju reproduktivnosti (tip preciznosti koji odgovara merenjima izvršenim pod uslovima reproduktivnosti, odnosno isti uzorak, ista

metoda, drugi analitičar, druga laboratorija, druga metoda i dug vremenski period), koju treba pridružiti zbiru ukupne standardne devijacije [3-4, 6, 8].

Unutarserijska standardna devijacija, s_w , je mera preciznosti i ponovljivosti metode, dobijena udruživanjem procena standardnih devijacija prema jednačini:

$$s_w = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k s_j^2}{n}} \quad (4)$$

gde je: s – procena standardne devijacije definisana jednačinom (5), n – broj merenja u svakoj seriji:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

gde je: x_i – izmerena vrednost n merenja, \bar{x}_i – srednja vrednost n merenja, izračunata po relaciji (6):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

Standardna devijacija srednjih vrednosti, s_x , predstavlja meru ponovljivosti merenja i izračunava se na osnovu izraza:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

gde je: \bar{x} – srednja vrednost merenja unutar grupe

Međuserijska standardna devijacija, s_b izračunava se na osnovu jednačine, a na osnovu izračunate unutarserijske i standardne devijacije srednjih vrednosti:

$$s_b = \sqrt{s_x^2 - \frac{s_w^2}{m}} \quad (8)$$

gde je: m - broj određivanja unutar grupe, to je najčešće dva (difikat)

Ukupna standardna devijacija, s_{tot} , je pokazatelj preciznosti i računa se po jednačini (9):

$$s_{tot} = \sqrt{s_x^2 + s_b^2} \quad (9)$$

a, RSD vrednost kao:

$$RSD = \frac{s_{tot}}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (10)$$

2.5. Osetljivost metode

Osetljivost predstavlja još jedan parametar metode koji se određuje iz nagiba kalibracione funkcije. Metoda je osetljiva ako se pomoću nje mogu odrediti manje količine analita. Definisana je samo za linerani opseg kalibracione funkcije, čijim

povećanjem osetljivost postaje veća. Ne predstavlja važnu karakteristiku, i nije je potrebno odrediti [9].

2.6. Granica detekcije

Glavna karakteristika instrumentalnih metoda analize je mogućnost detekcije i određivanja mikrokoličina analita u uzorku. Osnovni kriterijum uspešne primene instrumentalne tehnike je granica detekcije, MDL (Method Detection Limit). Predstavlja najnižu koncentraciju/količinu analita koja se odgovarajućom metodom može detektovati sa određenim nivoom pouzdanosti, ali ne i da bude kvantifikovana. U procesu validacije ovaj pojam se naziva limitom detekcije, LoD [3, 6, 10-11].

U procesu validacije treba napraviti razliku između granice detekcije instrumenta i granice detekcije metode. Granica detekcije instrumenta zasniva se na analizi slepe probe (reagensa) izostavljajući bilo koji korak pripreme. Za određivanje LoD mora se uzeti uzorak koji je prošao kroz ceo postupak pripreme, koristeći isti način izračunavanja kao i za ispitivane uzorce. Upravo to predstavlja najkorisniji korak u postupku validacije kada se radi o limitu detekcije. Pogodan postupak za procenu LoD je da se koristi „slepi“ uzorak, tj. uzorak koji ne sadrži ciljani analit ili je koncentracija analita blizu ili ispod očekivanog LoD. Kada „slepi“ uzorak prode kroz ceo postupak pripreme i bude predstavljen instrumentu, možemo odrediti limit detekcije i kvantifikacije.

„Slepi“(blank) reagens predstavlja reagens koji se koristi tokom analitičkog procesa (uključuje sve rastvarače koji se koriste za ekstrakciju ili rastvaranje) i analizira se da bi se utvrdio doprinos mernom signalu.

„Slepi“(blank) uzorak predstavlja matriks uzorka koji ne sadrži pristupni analit (npr. urin bez ostataka lekova, meso bez ostatka hormona). Nabavka slepog uzorka je teška, ali takav materijal je neophodan kako bi se dala realna procesna smetnji koja se može pojaviti tokom analize uzorka [3, 9].

Određivanje se izvodi na odgovarajućem uzorku ili slepoj probi, obično u seriji od šest do dvadeset paralelnih određivanja, i izračunavanje se može odrediti po odgovarajućem obrascu:

$$LoD = \frac{3 \cdot s}{a} \quad (11)$$

gde je: s – procena standardne devijacije niza merenja, a a nagib kalibracione krive

U nekim vodećim radovima, LoD se definiše kao koncentracija analita kojoj odgovara signal slepe probe, y_B , uvećan za trostruku standardnu devijaciju slepe probe, s_b .

$$LoD = y_B + 3s_b \quad (12)$$

Takođe, neki autori navode i relaciju:

$$LoD = 3 \cdot s_b \quad (13)$$

gde je: s_b - standardna devijacija „slepog“ reagensa ili „slepog“ uzorka [4, 9, 11]

Koristeći kriterijum detekcije, CD, najniža vrednost koja se odgovarajućim intervalom poverenja razlikuje od nule, može se izračunati LoD, po obrascu [10]:

$$CD = t_{95\%}(df) \times S_{blanc} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (14)$$

Pri čemu se LoD dobija koristeci relaciju:

$$LoD = 2CD \quad (15)$$

2.7 Granica kvantifikacije metode

Granica kvantifikacije metode, PQL (Practical Quantitation Limit), tj. limit kvantifikacije (LoQ), definiše se kao najmanja koncentracija analita u uzorku koja se datom metodom može kvantitativno odrediti, sa određenim stepenom sigurnosti (najčešće 95%). Granica kvantifikacije metode se razlikuje od limita kvantifikacije metode i obično je pet do deset i pa i više puta veća vrednost od LoD. Izračunava se po relaciji (16):

$$PQL = x_{s(sl.probe)} + 10 \cdot s_{(sl.probe)} \quad (16)$$

gde je: $x_{s(sl.probe)}$ – srednja vrednost slepih proba ili uzorka sa veoma niskom koncentracijom analita

Neki autori navode i relacije:

$$LoQ = 10 \cdot s_b \quad (17)$$

gde je: s_b - standardna devijacija rezultata dobijenih analizom šest do dvadeset blank uzorka

Uzorci pogodni za procenu limita detekcije i kvantifikacije su:

- Blank uzorci koji predstavljaju matriks od interesa, ali koji ne sadrži ispitivani analiti; i
- Test uzorak sa koncentracijom analita približno ili ispod očekivanog limita detekcije.

Blank uzorke je poželjno koristiti za tehnike kod kojih se dobija merljivi signal za blank uzorak (spektrofotometrija, atomska apsorpciona spektroskopija). Međutim, za tehnike kao što je hromatografija, koja se oslanja na detekciju pika, pogodniji su uzorci sa koncentracijom analita bliskoj ili iznad limita detekcije. Ovo se može postići spajkovanjem blank uzorka odgovarajućom koncentracijom ispitivanog analita [3, 6].

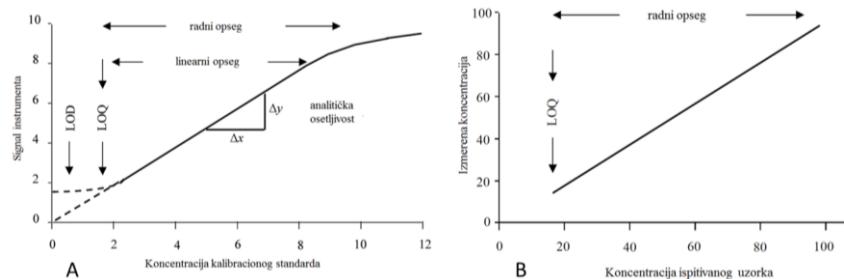
Postoji nekoliko metoda za izračunavanje LoD i LoQ. Koncentraciju pri kojoj se signal bitno razlikuje od intenziteta šuma (3-10 puta veći za LoD i LoQ), moguće

je proceniti grafički. Kod većine novijih instrumenata, omogućeno je direktno izračunavanje odnosa signal/šum (S/N), primenom softvera [4].

Vrednosti LoD i LoQ se izražavaju na jednu značajnu cifru. Kod primene realnih uzoraka treba biti obazriv, jer granice kvantifikacije i detekcije mogu biti mnogo više od teorijski dobijenih rezultata validacijom, usled uticaja matriksa. U tom slučaju, često je na analitičaru da proceni praktičnu vrednost LoD i LoQ [4].

2.8 Opseg primene metode

Radni opseg analitičke metode predstavlja linearni interval koncentracije analita u kojem je odziv proporcionalan koncentraciji analita sa prihvatljivom nesigurnošću. Donji opseg se kreće od granice kvantifikacije (LoQ) do granice u kojem odnos koncentracije analita i signala instrumenta nije više linearan (slika 3.A). Radni opseg predstavlja područje unutar kojeg metoda daje rezultate sa prihvatljivim nivoom nesigurnosti. Radno područje instrumenta predstavlja zavisnost koncentracije kalibracionog standarda i signala koji daje instrument, dok radno područje metode predstavlja grafičku zavisnost koncentracije poznatog uzorka koji se ispituje i izmerene koncentracije (slika 2.B) [9].



Sl. 3. A - Grafički prikaz krive dobijen instrumentalnom metodom, uz prikaz radnog područja, linearanog opsega, LoD i LoQ i analitičke osetljivosti,
B - grafički prikaz krive dobijen mernim postupkom uzorka[9]

2.9 Robusnost metode

Robusnost metode predstavlja meru sposobnosti metode da se odupre malim promenama u uslovima njenog izvođenja, kao što je promena pH, temperature, vlažnost vazduha i drugo, a takođe je i mera pouzdanosti iste [3, 5-6].

3. ZAKLJUČAK

Verifikaciju analitičke metode laboratorija sprovodi kod standardnih metoda koje nemaju značajnih odstupanja, a validaciju kod metoda razvijenih unutar laboratorije, nestandardnih metoda, ili kod standardnih metoda kod kojih

postoje značajna odstupanja. Tom prilikom dobijaju se informacije o preciznosti i tačnosti metode, limitima detekcije i kvantifikacije, mogućim interferencama, ali se mogu uvideti najslabije i najjače strane same metode. Prilikom tog procesa potrebno je uložiti vreme i novac koji predstavlja investiciju koja se višestruko isplati u korišćenju same metode, jer pruža sigurnost analitičaru i tačnost dobijenih rezultata.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije za finansijsku podršku naznačenu ugovorom br. 451-03-47/2023-01/200052.

LITERATURA

- [1] I. Taverniers, M. de Loose, E. van Bockstaele, Trends in quality in the analytical laboratory. II. Analytical method validation and quality assurance, Trends in Analytical Chemistry, Vol. 23, 8 (2004) 535-552.
- [2] A. Gustavo González, M. Ángeles Herrador, A practical guide to analytical method validation, including measurement uncertainty and accuracy profiles, Trends in Analytical Chemistry, Vol. 26, 3 (2007) 227-238.
- [3] B. Matijević, Kontrola kvaliteta i validacija analitičkih metoda, Novi Sad, 2013.
- [4] M. Watson, J. Molnar Jazić, S. Maletić, J. Beljin, M. Kragulj Isakovski, J. Nikić, Spektroskopske i spektrometrijske metode u analizi životne sredine, Novi Sad, 2021.
- [5] M.B. Rajković, M. Mitrović, S.A. Mladenović, Obezbeđenje poverenja u kvalitet rezultata hemijskih metoda ispitivanja, 60 (4) (2019) 342-359.
- [6] A. Perić-Grujić, Osnovi hemometrije, Beograd, 2012.
- [7] K. Lazarić, Validacija analitičkih metoda - osnovna načela, Svijet po mjeri, Vol. 1, 1 (2012) 61-64.
- [8] M. Medić-Šarić, I. Jasprica, Ž. Deljak, Uvod u validaciju metoda analize lijekova, Farmaceutski glasnik, Vol. 62, 1(2006) 1-7.
- [9] Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods. A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, Second Edition, 2014.
- [10] V.R. Krstić, B.D. Blagojević, L.D. Gomidželović, E.D. Požega, J.V. Petrović, B.T Trumić, Određivanje granica kvantifikacije kalorimetra smešom benzoeve kiseline i silicijum-dioksida, Hemijska industrija, Vol. 65, 1 (2011) 93-97.
- [11] Eurachem Guide: Planning and Reporting Method Validation Studies. Supplement to Eurachem Guide on the Fitness for Purpose of Analytical Methods, First edition, 2019.

BAKAR 48 (2023) 2 COPPER

UDK: 536.5:772.96:681.31(045)=163.41

Primljen: 23.10.2023.

DOI: 10.5937/bakar2302035R

Prerađen: 23.11.2023.

NAUČNI RAD

Prihvaćen: 30.11.2023.

Oblast: *Informacioni sistemi*

PRIMENA TERMOVIZIJE I RAČUNARSKIH SISTEMA ZA MONITORING VITALNIH SISTEMA U ELEKTROTEHNICI, MAŠINSTVU I GRAĐEVINARSTVU

APPLICATION OF THERMOVISION AND COMPUTER SYSTEMS FOR MONITORING VITAL SYSTEMS IN ELECTROTECHNICS, MECHANICAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION

Milan Radivojević^{1a}, Zoran Stević^{2a}, Marijana Pavlov-Kagadejev^{1b}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor

²Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu,

Vojiske Jugoslavije 12, 19210 Bor

E-mail: milan.radivojevic@irmbor.co.rs

Orcid:

^{1a}<https://orcid.org/0000-0003-2337-0306>; ^{2a}<https://orcid.org/0000-0002-1867-9360>;

^{1b}<https://orcid.org/0000-0003-1090-6351>

Izvod

U radu je opisana primena računarskih sistema za monitoring u oblasti elektrotehnike, mašinstva i građevinarstva. Dati su osnovni principi toplotnog zračenja tela i opisan rad i struktura same termovizionske kamere, kao i praktični primeri u navedenim oblastima. Prikazani su primjeri informacionih sistema za monitoring, zajedno sa termogramima dobijenim na ovaj način.

Ključne reči: termovizija, monitoring, elektrotehnika, mašinstvo, građevinarstvo

Abstract

The paper presents the application of computer systems for monitoring in the fields of electrotechnics, mechanical engineering, and construction. It outlines the basic principles of thermal radiation from objects and describes the operation and structure of a thermal imaging camera, providing practical examples in the mentioned fields. The document showcases examples of information systems for monitoring, along with thermograms obtained through this method.

Keywords: thermovision, monitoring, electrotechnics, mechanical engineering, construction

1. UVOD

Termovizija je naučna disciplina novijeg datuma koja se, u znatno većoj meri, praktično primenjuju tek od kraja prošlog i početka ovog veka. Termovizija se bazira na činjenici da sva tela, čija je temperatura veća od apsolutne nule, emituju određenu količinu toplotne energije u okolinu. Ukupna

energija i spektralna raspodela energije, koju tela zrače u okolinu, zavise od njihove temperature i emisivnosti. Najveći deo energije, sva tela zrače u infracrvenom delu spektra (talasne dužine od $0,75 \mu\text{m}$ do 3 mm) [1]. Budući da je energija zračenja posledica zagrejanosti tela, uobičajen naziv za ovu vrstu energije je topotno zračenje. Topotno zračenje se fizički opisuje preko zračenja apsolutno crnog tela. Tela koja se nalaze na sobnoj temperaturi (300 K , ili 27°C), zrače u infracrvenom području elektromagnetske talase talasnih dužina od $8 - 25 \mu\text{m}$, pri čemu se maksimum energije zračenja nalazi na talasnoj dužini od $10 \mu\text{m}$.

Zračenje tela i prostiranje infracrvenog zračenja kroz atmosferu koriste se za rad termovizijskih uređaja. Danas postoji specijalna oprema kojom se može detektovati infracrveno zračenje i na osnovu njega formirati temperaturna slika posmatranog tela. Ta metoda naziva se infracrvena termografija, ili kraće termovizija. Ovom metodom može se dobiti informacija o temperaturi tela, odnosno nekog objekta u svim njegovim tačkama. Daljom obradom ove informacije može se dobiti termogram. Termogram (termalna slika, IC slika, termovizijska slika, temperaturna mapa objekta) je slika nastala delovanjem infracrvenog zračenja, kao što fotografija nastaje delovanjem vidljive svetlosti [2].

Termovizijski uređaji, termovizijske kamere, ili infracrveni sistemi za snimanje u realnom vremenu (eng. *forward looking real time infrared imaging system*) su uređaji koji rade u infracrvenoj oblasti i po funkciji su analogni TV kamerama, koje rade u vidljivoj oblasti spektra. U suštini, termovizijski uređaj služi za prevodenje nevidljivog infracrvenog zračenja u vidljivo zračenje i formiranje lika predmeta. Različitim temperaturama pri tome odgovaraju različite boje i nijanse boja, što omogućava da ljudsko oko postane osetljivo na širi deo spektra nego što njegova anatomija to dozvoljava.

Sopstveno zračenje tela se, zajedno sa reflektovanim zračenjem drugih prirodnih izvora zračenja, prostire kroz atmosferu. Sve bitne informacije o predmetima u posmatranoj sceni mogu se izraziti kroz topotni kontrast. Termovizijski uređaj omogućava vizuelizaciju topotnog kontrasta zahvaljujući mogućnosti detektora da razlike u snazi (fluksu) primljenog infracrvenog zračenja pretvoriti u električni signal. Električni signal služi za generisanje kontrasta vidljive slike srazmerno topotnom kontrastu posmatrane scene.

Danas je primena termovizije veoma raznovrsna, pa je merenje intenziteta infracrvenog zračenja našlo primenu u različitim oblastima industrije i medicine [3]. Posebno se primenjuje u procesima održavanja koji se baziraju na merenjima stanja, zatim u istraživačkim i razvojnim projektima, medicini, kontroli kvaliteta, u procesnoj kontroli, itd. Kao beskontaktna metoda za merenje temperature, termovizija omogućava otkrivanje potencijalnih kvarova i to bez potrebe prekida procesa. Isto tako, koristi se i za detekciju prisustva ljudi i životinja, snimanje terena u noćnim i maglovitim uslovima [2].

2. TEORIJSKE OSNOVE ZRAČENJA TELA

Toplotno zračenje tela spada u elektromagnetno zračenje koje se emituje kao posledica topotnih oscilacija nanelektrisanja, ili haotičnog kretanja atoma i molekula koji se nalaze u posmatranom telu. Toplotno zračenje je osobina svih tela koje se nalaze na temperaturama iznad apsolutne nule. Čvrsta i tečna tela emituju kontinuirani spektar u kome položaj maksimuma intenziteta zračenja zavisi od temperature tela. Na temperaturama nižim od 500°C telo zrači elektromagnetne talase u infracrvenoj oblasti. Sa porastom temperature, zračenje se proširuje najpre na vidljivi deo spektra (telo postaje tamno crveno, zatim žuto, i konačno tamno plavo), a zatim ultraljubičasti deo spektra, kada telo dobija belu boju.

Telo koje emituje zračenje gubi energiju. Gubitak energije tela manifestuje se smanjenjem njegove unutrašnje energije, odnosno njegove temperature. Ovaj proces emisije zračenja trajao bi, kada telo koje zrači ne bi dobijalo energiju od svoje okoline, sve dok temperatura tela ne dođe do apsolutne nule. Međutim predmeti oko tela, takođe zrače i deo te energije koji pada na telo može biti apsorbovan i pretvoren u unutrašnju energiju tela, što će sprečiti dalji pad njegove temperature. Dakle, proizilazi zaključak da sva tela, koja se nalaze na temperaturama većim od apsolutne nule, istovremeno emituju i apsorbuju energiju. Pri konstantnoj temperaturi, energija emitovanog zračenja u jedinici vremena jednak je apsorbovanoj energiji u jedinici vremena.

Fizička veličina koja karakteriše zračenje tela naziva se *spektralna emisiona moć*, $e(v, T)$, koja pored temperature (T) zavisi i od prirode tela i frekvencije (v), odnosno talasne dužine (λ) emitovanog zračenja. Spektralna emisiona moć tela brojno je jednaka energiji koju emituje jedinica površine tela u jedinici vremena i jediničnom intervalu frekvencije [4], odnosno:

$$e(v, T) = \frac{dE_{v, v+dv}}{dv} \quad (1)$$

gde su dE_v , $v+dv$ – energija koja se emituje u jedinici vremena (snaga) sa jedinične površine tela i dv -interval frekvencije.

Ukupna emisiona moć tela (ili samo: emisiona moć) $E(T)$, može se izraziti kao:

$$E(T) = \int_0^{\infty} e(v, T) \cdot dv = \frac{\lambda^2}{c} \cdot \int_0^{\infty} e(\lambda, T) \cdot d\lambda \quad (2)$$

Sposobnost tela da apsorbuje zračenje koje pada na njega karakteriše se korišćenjem dve fizičke veličine: *spektralna apsorbaciona moć*, $a(v, T)$, koja zavisi od prirode tela, temperature i talasne dužine apsorbovanog zračenja, i *integralna apsorbaciona moć*, $A(T)$, koja zavisi od prirode tela i njegove temperature. Ove veličine se definišu kao:

$$a(v, T) = \frac{dA_{v, v+dv}}{dE_{v, v+dv}^u} \quad (3)$$

$$A(T) = \frac{A}{E^u} \quad (4)$$

gde je $dA_{v, v+dv}$ - deo elektromagnetskog zračenja po jedinici površine u intervalu $v, v+dv$ koje se u jedinici vremena apsorbuje, $dE_{v, v+dv}^u$ - elektromagnetno zračenje u jedinici vremena u intervalu frekvencija $v, v+dv$ koje pada na jedinicu površine neprozračnog tela, A – deo elektromagnetskog zračenja svih talasnih dužina po jedinici površine koje se apsorbuje u jedinici vremena i E^u – ukupna energija elektromagnetskog zračenja svih talasnih dužina u jedinici vremena koja pada na jedinicu površine tela. Veličine $a(v, T)$ i $A(T)$ su bezdimenzione veličine.

Telo koje na bilo kojoj temperaturi apsorbuje celokupno upadno zračenje, proizvoljne frekvencije, naziva se *apsolutno crno telo*. U prirodi ne postoji absolutno crno telo. Međutim, neki materijali kao što su čad, grafit, crni filc i slični, imaju osobine bliske osobinama absolutno crnog tela za neke intervale frekvencija. Za absolutno crno telo važi relacija:

$$a^{act}(v, T) = A^{act}(T) = 1 \quad (5)$$

dok su za sva druga tela spektralna i integralna apsorbpciona moć manje od jedinice, odnosno $0 < a(v, T) < 1$ i $0 < A(T) < 1$ u bilo kom delu spektra. Tela za koje je $0 < a(v, T) < 1$ za sve frekfencije i zavisi samo od temperature, vrste materijala i stanja površine tela nazivaju se *siva tela*.

3. TERMOVIZIJSKI UREĐAJI

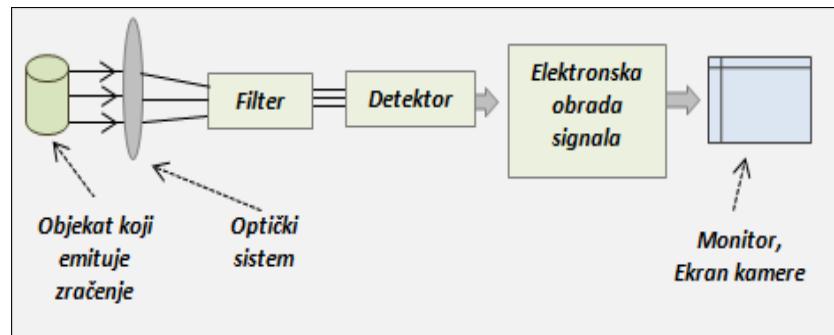
Termovizijski uređaji rade u infracrvenoj oblasti i po funkciji su slični TV kamerama koje rade u vidljivom delu spektra. Osnovni deo termovizijskog uređaja je infracrvena, ili termovizijska kamera. Zračenje tela i prostiranje zračenja kroz atmosferu koriste se za rad termovizijskih uređaja. Danas postoji oprema kojom se može detektovati infracrveno zračenje i na osnovu toga formirati temperaturna slika posmatranog tela. U literaturi se, metoda formiranja temperaturne slike tela, obično naziva infracrvena termografija, ili termovizija, a slika tela koja se tom prilikom dobija, termogram, ili termalna slika [2,10].

Termovizijsku kameru čine sledeći elementi: optički sistem, filter, detektor, blok za elektronsku obradu signala i displej sa kontrolama.

Na slici 1 prikazana je blok šema termovizijske kamere. Struktura osnovnih komponenti kamere bitno zavisi od njene namene i tehnoloških mogućnosti proizvođača termovizijskih uređaja.

Termalna slika objekata, čije se zračenje detektuje, formira se na bazi razlika u snazi (tzv. toplojni kontrast), fluksu njihovog infracrvenog zračenja koje se prima pomoću detektora

termovizijske kamere. Termovizijska kamera omogućava vizuelizaciju toplojnog kontrasta zahvaljujući mogućnosti detektora da razlike u snazi primljenog zračenja, pretvori u električni signal koji se na odgovarajući način može prikazati tako da se, srazmerno toplonom kontrastu, generiše kontrast vidljive slike, odnosno termograma [5].



Sl. 1. Blok šema termovizijske kamere

Snaga primljenog zračenja zavisi od emisione moći objekata, koja zavisi od temperature i emisivnosti objekata, relacija (6). Ako se objekti nalaze na istoj temperaturi, veću snagu zračenja sa jedinice površine imaju objekti sa većom emisivnosti. Ukoliko su objekti na različitim temperaturama i imaju iste emisivnosti, veću snagu zračenja imaju oni objekti čija je temperatura veća.

$$E(T) = A(T) \cdot E^{act}(T) = A(T) \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (6)$$

gde je: $\sigma = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ - Štefan-Bolcmanova konstanta.

Relacija (7) predstavlja Štefan-Bolcmanov zakon zračenja apsolutno cenu tela.

$$E^{act} = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (7)$$

- $A(T)$ predstavlja integralnu apsorpcionu moć, što je dato relacijom (4).

Temperatura tela se iz relacije (6), može izraziti na sledeći način:

$$T = \left[\frac{E(T)}{A(T) \cdot \sigma} \right]^{1/4} \quad (8)$$

4. PRIMENA TERMOVIZIJE I RAČUNARSKIH SISTEMA ZA MONITORING

Monitoring je sistematsko, stalno i neprekidno praćenje i procena stanja odgovarajućeg sistema, tokom određenog vremenskog perioda, sa ciljem da se identifikuju i reše sledeći problemi:

- *dodata na nepredvidljivost*: okruženje sistema koji se nadgleda nije idealno, tako da određene nasavršenosti mogu uzrokovati pojavu ovakvog problema,
- *promena sadržaja pretpostavki tokom projektovanja sistema*: zbog neočekivanih, ili nepredviđenih uslova, moguće je da tokom rada sistema dođe do promene sadržaja određenih pretpostavki utvrđenih u procesu njegovog projektovanja, i
- *primena formalnih tehnika i algoritama vremenskog planiranja za praćenje zahteva pretpostavki o posmatranom sistemu.*

Da bi se došlo do odgovarajućih sadržaja navedenih problema, neophodno je izvršiti proveru sistema koji se nadgleda tokom njegovog rada, kako bi se utvrdilo da li funkcioniše ispravno, ili ne.

4.1. Povezivanje termovizijske kamere sa personalnim računarom

Većina termovizijskih kamera ima sopstveni procesor koji omogućava autonoman rad kamera. Nakon uključivanja, kamera se inicijalizuje i pokreće sopstveni operativni sistem koji kontroliše rad kamere i omogućava snimanje i elementarnu analizu dobijenih termograma. Termovizijske kamere imaju monitore relativno malih dimenzija, tako da se ne mogu koristiti za ozbiljnije primene u sistemima za nadzor. Zbog toga se termovizijske kamere povezuju sa personalnim računarima, formirajući termovizijski sistem. Kamere poseduju ugrađeni serijski komunikacioni priključak, pa je za njihovo povezivanje sa računarom potrebno obezbediti i odgovarajući serijski kabl sa DB-9 M/F priključcima i povezati komunikacioni priključak kamere i serijski port personalnog računara. Na taj način je hardverski potpuno konfigurisan, računarski podržan termovizijski sistem, koji može biti upotrebljen u različitim sistemima za nadzor, upravljanje i preventivno održavanje industrijskih procesa [6].

Softverska podrška ovakvom sistemu može biti sopstvene izrade, ili se može upotrebiti neka od već razvijenijih verzija, koja omogućava dodatno daljinsko upravljanje kamerom preko računara, kao i programiranje kamere da identificiše temperature koje odstupaju od propisanih vrednosti i pošalje alarm računaru.

4.2. Informacioni sistem za kontinuirano termovizijsko praćenje rada sistema

U mnogim sistemima koji funkcionišu u oblastima mašinstva, građevinarstva, snabdevanja električnom energijom, medicine i drugim, sve se više zahteva kontinuirano nadgledanje i praćenje kako bi se obezbedilo, efikasno prediktivno održavanje sistema. Da bi se to obezbedilo neophodno je tehnički omogućiti direktni i stalni pristup mernim tačkama u sistemu na osnovu kojih se obezbeđuju potrebni podaci o parametrima koji se posmatraju. Nakon toga unos, memorisanje i obrada podataka i na kraju dobijanje odgovarajućih izlaznih rezultata. Drugim rečima, potrebno je postojanje odgovarajućeg informacionog sistema (IS) sa potrebnom hardverskom i softverskom strukturom, kojim bi se realizovale navedene aktivnosti. U tom slučaju govori se o kontinuiranom monitoringu, monitoringu u realnom vremenu, ili on-line monitoringu (eng. *on-line condition monitoring*). Dakle, kontinuirani monitoring je proces stalnih nadgledanja i praćenja rada sistema, postrojenja, ili neke opreme u cilju osiguravanja ispravnog funkcionisanja i otkrivanja nenormalnosti koje najavljuju nastupajući otkaz [7].

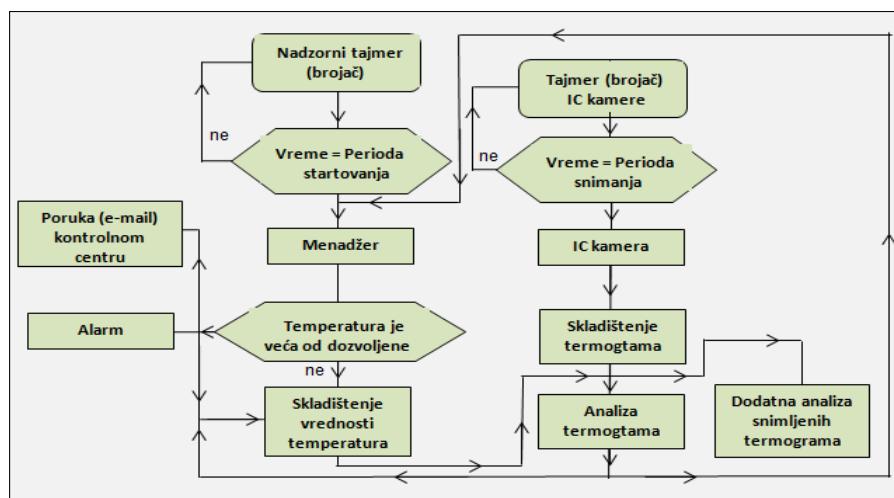
Potrebno je razlikovati prediktivno i preventivno održavanje, pre svega zbog činjenice da se preventivno održavanje realizuje po unapred usvojenom planu i odgovarajućoj dinamici. Ima više razloga zbog kojih se danas prelazi na monitoring u realnom vremenu.

Iz do sada navedenog, može se zaključiti da informacioni sistemi za monitoring u realnom vremenu rade sa velikim brojem podataka. Zbog toga se mora naglasiti da je softverska i hardverska tehnologija koja se koristi u prediktivnom održavanju veoma sofisticirana i složena.

Informacioni sistem za monitoring jednog proizvoljnog sistema, postrojenja, ili opreme u oblasti mašinstva, elektroenergetike, medicine, ili nekoj drugoj, obuhvata module koji su kao celina prikazani na slici 2.

- modul *Nadzorni tajmer* u procesu monitoringa se koristi za startovanje glavnog aplikacionog programa, odnosno *Menadžer modula* i za detekciju toka kontrole. Proverava vreme izvršenja programa i restartuje sekvence ugrađene u glavni program. Modul *Nadzorni tajmer* koristi kratke programske sekвенце brojače-tajmere kao uređaje za definisanje vremenskih trenutaka startovanja glavnog modula [2].
- *menadžer modul* je upravljački softver za monitoring sistema. Između ostalog, on prihvata podatke iz modula *Analiza termograma* i ukoliko utvrdi da je temperatura (registrovana termovizijskom kamerom) veća od dozvoljene, aktivira modul za alarmiranje, prosleđuje odgovarajuću poruku kontrolnom centru i memoriše temperaturu u modul *Skladištenje vrednosti temperatura*, a ako nije veća od dozvoljene, menadžer modul je direktno memoriše u ovaj modul.

- modul *Analiza termograma* je najčešće integriran u menadžer modulu. Može se koristiti i u okviru kontrolnog centra. Modul prati trendove rasta prosečne temperature na celom, ili na delu snimka, odnosno zadatoj poziciji, ili uređaju. Trend rasta prosečnih temperatura se izračunava i priprema za grafičku prezentaciju pojave i to za ceo posmatrani objekat, ili za delove objekta koji su posebno naznačeni kao kritični. Pored toga vrši i uporednu analizu prema referentnom snimku i ukazuje na moguće kvarove u sistemu. Podaci o vrednostima temperatura kao i snimljeni termogrami, koji se takođe nalaze u ovom modulu, mogu se iskoristiti za dodatnu analizu i odgovarajuću obradu.



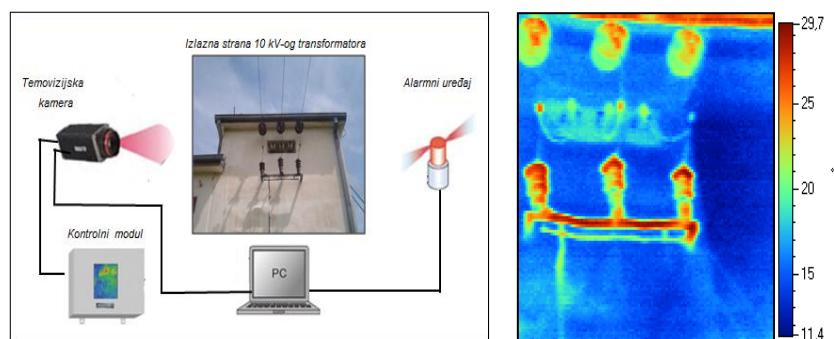
Sl. 2. Struktura modela informacionog sistema za monitoring i analizu sistema, postrojenja, ili opreme

- modul *IC kamera* samostalno izvršava snimanje objekata, ili delova objekata koristeći svoj nezavisni tajmer. Pored snimanja zadužen je i za memorisanje snimljenih termograma u modul *Skladištenje termograma*.
- dodatna obrada i analiza snimljenih termograma realizuje se u modulu *Dodatna analiza snimljenih termograma*. Po pravilu, ovaj modul je smešten u kontrolnom centru i u njemu su instalirane profesionalne verzije odgovarajućeg softvera.

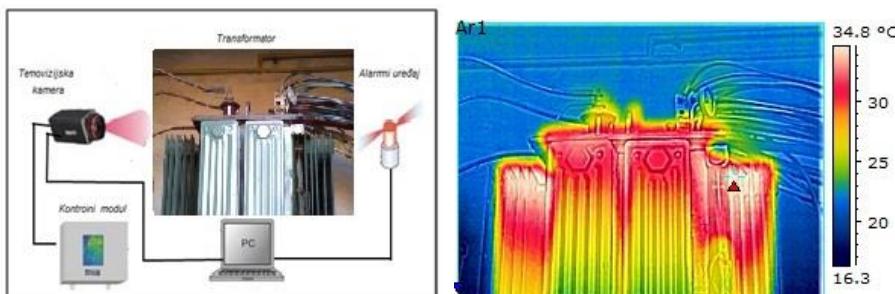
4.2.1. Informacioni sistemi za monitoring postrojenja u oblasti elektroenergetike

Informacioni sistemi za monitoring, koji u svojoj hardverskoj strukturi uključuju termovizionske kamere kao savremene uređaje za merenje, sve više se koriste za skladištenje i analizu podataka, njihovog poređenja i monitoringa u oblasti distribucije električne energije i kontrole elektroenergetskih postrojenja.

Njihovom primenom mogu se postići značajni efekti kako u prevenciji kvarova, tako i u smanjenju gubitaka električne energije. Oni omogućavaju detekciju loših spojeva na priključcima transformatora, prekidača, sabirnica i drugih ključnih elemenata elektroenergetskih postrojenja, čime se obezbeđuje pravovremena intervencija, smanjenje broja zastoja i stvaranje tehničkih i organizacionih preduslova za znatno povećanje energetske efikasnosti postrojenja i mreže u celini [8]. Na slikama 3 i 4 prikazane su neke od šema informacionih sistema za monitoring u oblasti elektroenergetike i po jedan termogram, iz skupa memorisanih u toku nadgledanja, na osnovu koga se mogu detektovati odgovarajuće nepravilnosti, ili kvarovi u postrojenju, ili opremi.



Sl. 3. Šema IS-a za monitoring izolatora na izlazu iz postrojenja 10 kV [2]



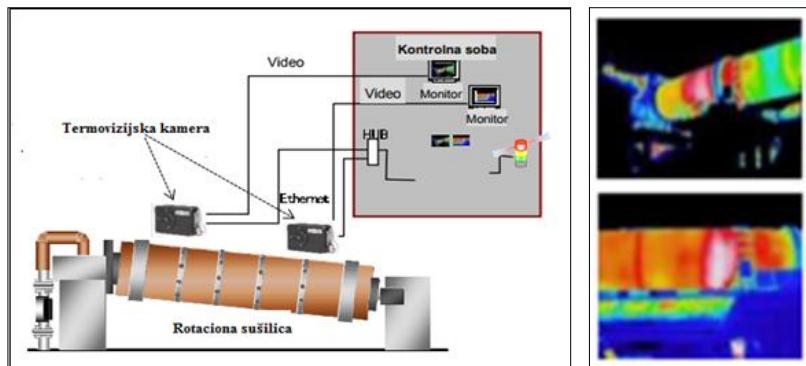
Sl. 4. Šema IS-a za monitoring transformatora

4.2.2. Informacioni sistemi za monitoring postrojenja u oblasti mašinstva

U oblasti mašinstva informacioni sistemi za monitoring, podržani računarima i termovizijskim kamerama, najčešće se koriste na mestima kontakta pokretnih i nepokretnih delova mašina gde dolazi do manjeg, ili većeg zagrevanja. Kod ispravnih i dobro podešenih mašina to zagrevanje se održava u dozvoljenim granicama, dok se kod pohabanih sklopova, ili loše podešenih mašina (vibracije, ekscentričnost, neadekvatna pritegnutost ležajeva i drugo)

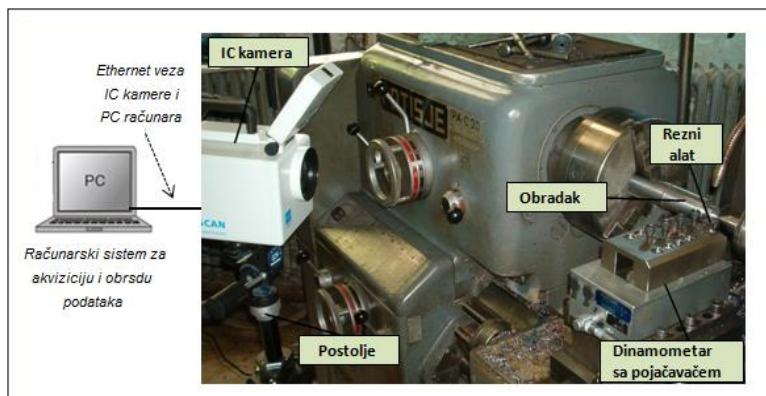
javlja pregrevanje koje se može detektovati termovizijskom kamerom. Na taj način mogu se uočiti dotrajali ležajevi, oštećenja površine, pregrevanje delova postrojenja, loše podmazivanje, itd.

Na slici 5 šematski je prikazan informacioni sistem za monitoring u oblasti mašinstva i termogrami, iz skupa memorisanih u toku nadgledanja, na osnovu kojih se mogu detektovati odgovarajuće nepravilnosti, ili kvarovi u postrojenju i opremi.



Sl. 5. Šema IS-a za monitoring rotacione sušilice i dva termograma [9]

Termovizijska kamera može se uspešno koristiti i kao efikasan uređaj za akviziciju podataka u okviru IS-a za nadzor i praćenje procesa obrade materijala struganjem. Temperatura koja se prilikom ovog procesa razvija, zavisi od uslova pod kojima se obrada izvodi, kao i od režima rezanja. Ona ima veliki, negativan uticaj na parametre procesa obrade rezanjem i zato se u određenim slučajevima nameće potreba za kontinuiranim praćenjem vrednosti temperature tokom odvijanja ovog procesa. Na slici 6 prikazana je jedna od praktičnih realizacija IS-a za monitoring procesa obrade materijala skidanjem strugotine.



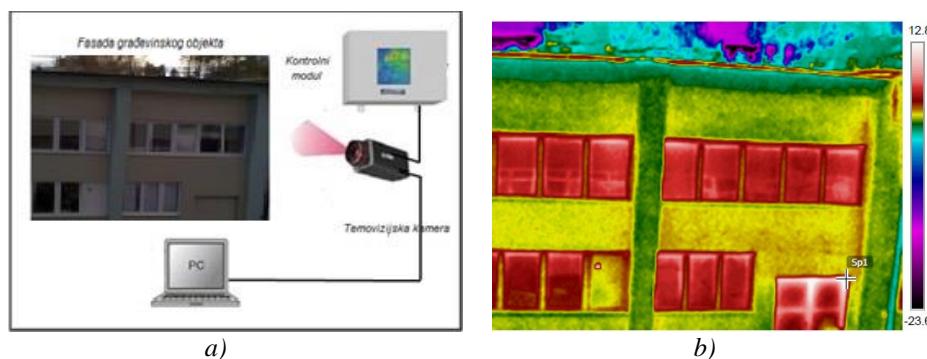
Sl. 6. Jedna od praktičnih realizacija IS-a za nadzor i merenje temperature rezanja [2]

4.2.3. Informacioni sistemi za monitoring u oblasti građevinarstva

Primena termovizije u građevinarstvu postala je posebno aktuelna krajem dvadesetog veka kada su zahtevi za ostvarivanje energetske efikasnosti u razvijenim evropskim zemljama postali integralni deo arhitektonске prakse i strateško pitanje u domenu tretmana postojećeg građevinskog fonda. Polja primene termovizije u oblasti građevinarstva su raznovrsna i uglavnom se odnose na:

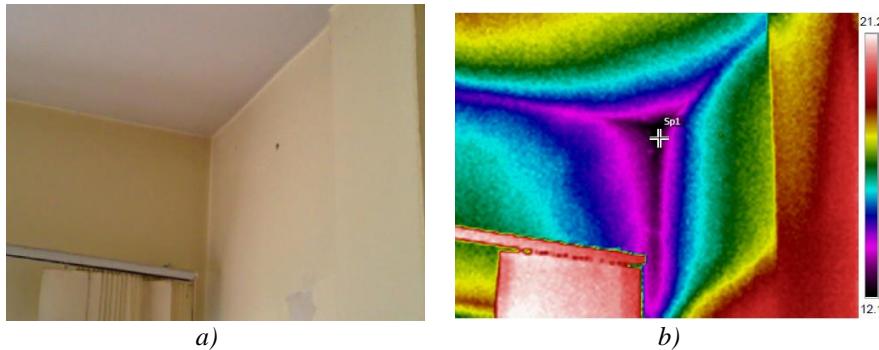
- dijagnostiku kvaliteta termoizolacije objekata, utvrđivanje prodora vlage u objektima, utvrđivanje zona kondenzacije i infiltriranja vazduha, pregled podnog grejanja i eventualnih curenja sistema grejanja i drugih instalacija, varijacije temperature konstrukcija i omotača, procenu termičkih performansi dihtunga i zaptivki, i sl.

Na slici 7 šematski je prikazan informacioni sistem za monitoring fasade jednog građevinskog objekta sa ciljem ispitivanja kvaliteta termoizolacije i jedan od memorisanih termograma.



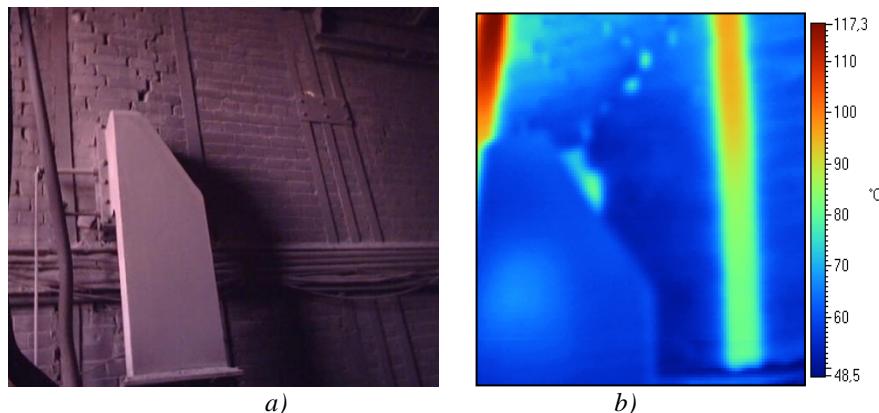
Sl. 7. Šema IS-a za nadzor a) fasade građevinskog objekta i b) jedan od memorisanih termograma

Pored primene termovizije u funkcionalisanju informacionih sistema za nadzor i praćenje stanja na objektima, ona se uspešno primenjuje, kao što je već rečeno, i u mnogim drugim segmentima građevinarstva, što se može ilustrovati mnogobrojnim primerima. Ovde je navedeno samo nekoliko primera, slike 8 i 9.



Sl. 8. Detekcija vlage na plafonu a) fotografija i b) termogram

Infracrvena termografija se pokazala kao korisna metoda vizuelizacije toplotnih gubitaka kroz elemente konstrukcija. Termovizijskim snimanjem detektuju se „topla mesta“, ili tačnije mesta velikih gubitaka energije i „hladna mesta“ koja predstavljaju područja vlaženja.



Sl. 9. Mehanička oštećenja na spoljašnjem ozidu kotla a) video snimak i b) termogram [2]

Pored detekcije gubitaka toplotne energije i mnogih drugih primena, infracrvena termografija se koristi i kao kvalitativna metoda kontrole pri izgradnji novih objekata. Termovizijskim snimanjem zgrada i kasnijom stručnom analizom i interpretacijom dobijenih snimaka moguće je otkriti nedostatke konstrukcije i pravovremeno i preventivno izvoditi zahvate u cilju povećanja energetske efikasnosti objekata.

5. ZAKLJUČAK

Zračenje tela i njegovo prostiranje kroz atmosferu predstavljaju osnovu na kojoj se bazira rad termovizijskih uređaja. Ovi uređaji danas poseduju specijalnu opremu kojom se može detektovati infracrveno zračenje i na osnovu njega formirati temperaturna slika posmatranog tela. Ta metoda naziva se infracrvena termografija, ili ukratko termovizija. Ovom metodom može se dobiti informacija o temperaturi tela, odnosno nekog objekta u svim njegovim tačkama.

Zahvaljujući najnovijim dostignućima u mnogim naukama, termovizijski uređaji su postali komercijalno dostupni velikom broju raznovrsnih korisnika i relativno jednostavnii za rukovanje. Trend tehnološkog razvoja omogućio je primenu termovizije u oblastima elektroenergetike, mašinstva, metalurgije, građevinarstva, medicine, veterine, u sistemima za prenos topotne energije, izgradnji i implementaciji računarskih sistema za monitoring mnogobrojnih vitalnih sistema, vizuelizaciju kretanja fluida, kao i u mnogim drugim oblastima rada i detekciji stanja postrojenja i objekata.

U elektroenergetici termovizija se koristi za praćenje stanja energetskih postrojenja, snimanje i detekciju eventualnih neispravnosti transformatora, dovodnih kablova, sabirnica, metalnih glava i tela prekidača, osigurača, strujnih stezaljki i spojnica i drugih elemenata.

U oblasti mašinstva termovizija se može koristiti za praćenje rada proizvodnih postrojenja, brzu i efikasnu kontrolu temperature ležajeva rotacionih mašina, kontrolu elemenata u procesnoj industriji, praćenje nivoa tečnosti u rezervoarima, raspodele i gubitaka fluida u gasovodima i raznim drugim postrojenjima i drugo.

Polja primene termovizije u građevinarstvu uglavnom se odnose na dijagnostiku kvaliteta termoizolacije, način njenog postavljanja i defekata, zatim za utvrđivanje zona infiltracije vazduha, prodora vlage i zona kondenzacije. Takođe se uspešno može koristiti za proveru betonskih konstrukcija, proveru termičkih dihtunga i zaptivki, lociranje mesta curenja sistema grejanja i drugih instalacija, zastoja u cevima, detekciju varijacija temperature konstrukcija i omotača i drugo. Termovizijom, kao beskontaktnom metodom merenja temperature, može se realizovati dijagnostika postrojenja i opreme skoro u svim granama industrije što omogućava tačnu identifikaciju uzroka neispravnosti, izbegavanje neočekivanih zastoja, povećanje pogonske sigurnosti, optimalno korišćenje radne snage i rezervnih delova, smanjenje potrošnje i gubitka energije i smanjenje troškova osiguranja.

Ostvareni rezultati u primeni termovizije otvorili su široki prostor za njenu primenu u istraživanjima i u drugim oblastima nauke za vizuelizaciju pojava nedostupnih u vidljivom delu spektra. Mogućnost beskontaktnog i daljinskog

snimanja ukupnog temperaturnog polja površine posmatranog objekta daje velike prednosti u odnosu na klasične načine određivanja temperature, jer je za svrhe naučnih istraživanja od posebnog značaja da samo merenje ni na koji način ne remeti sistem koji se ispituje.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/200052.

LITERATURA

- [1] <https://energetskiportal.rs/predstavljam-termoviziju-skeniranje-i-analizu-termalnih-karakteristika-objekata/>
- [2] Z. Stević, M. Rajčić-Vujasinović, D. Antić, Primena termovizije, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, 2008.
- [3] O. Tasić, V. Tasić, Ispitivanje električnih uređaja i instalacija u domaćinstvu primenom termovizijske kamere, Bakar, Vol. 41, 2 (2016) 59-68.
- [4] http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni_materijali/Atomska_fizika/predavanja/1-Toplotno_zracenje.pdf
- [5] Lj. Tomić, R. Karkalić, Analiza maskirnih karakteristika vojničke uniforme IC termografijom, ML2.6-1-4, Zbornik radova 53. Konferencije za ETRAN, Vrnjačka banja, 15-18. juna, 2009.
- [6] Z. Stević, M. Rajčić-Vujasinović, D. Antić, Računarski upravljan termovizijski sistem za monitoring i dijagnostiku stanja u elektroistributivnim postrojenjima, Zbornik radova INFOTEH, Jahorina, 22-24. marta 2006, pp. 225-229.
- [7] M. Aleksić, P. Stanojević, Prilog definisanju održavanja prema stanju u mornarici, Tehnička dijagnostika, 2007, Vol. 6, 1 (2007) 27-36.
- [8] Z. Stević, M. Rajčić-Vujasinović, M. Jevtić, S. Bugarinović, M. Tripunović, Termovizija u dijagnostici malih hidroelektrana, Zbornik radova INFOTEH, Jahorina, 16-18. mart 2011, pp. 865-868.
- [9] https://www.ekapija.com/dokumenti/termovizijske_kamere_nec.pdf
- [10] Z. Stević, Primena termovizije u građevinarstvu I deo, Industrija, 60 (2) (2016) 14-19.

UPUTSTVO AUTORIMA

Časopis BAKAR izlazi dva puta godišnje i objavljuje naučne, stručne i pregledne radove. Za objavljivanje u časopisu prihvataju se isključivo originalni radovi koji nisu prethodno objavljivani i nisu istovremeno podneti za objavljivanje negde drugde. Radovi se anonimno recenziraju od strane recenzenta posle čega uredništvo donosi odluku o objavljinju. Rad priložen za objavljinje treba da bude pripremljen prema dole navedenom uputstvu da bi bio uključen u proceduru recenziranja. Neodgovarajuće pripremljeni rukopisi biće vraćeni autoru na doradu.

Obim i font. Rad treba da je napisan na papiru A4 formata (210x297 mm), margine (leva, desna, gornja i donja) sa po 25 mm, u Microsoft Wordu novije verzije, fontom Times New Roman, veličine 12, sa razmakom 1,5 reda, obostrano poravnat prema levoj i desnoj margini. Preporučuje se da celokupni rukopis ne bude manji od 5 strana i ne veći od 10 strana.

Naslov rada treba da je isписан velikim slovima, bold, na srpskom i na engleskom jeziku. Ispod naslova rada pišu se imena autora i institucija u kojoj rade. Autor rada zadužen za korespondenciju sa uredništvom mora da navede svoju e-mail adresu za kontakt u fusuotni.

Izvod se nalazi na početku rada i treba biti dužine do 200 reči, da sadrži cilj rada, primenjene metode, glavne rezultate i zaključke. Veličina fonta je 10, italic.

Ključne reči se navode ispod izvoda. Treba da ih bude minimalno 3, a maksimalno 6. Veličina fonta je 10, italic.

Izvod i ključne reči treba da budu date i na engleski jezik.

Osnovni tekst. Radove treba pisati jezgrovito, razumljivim stilom i logičkim redom koji, po pravilu, uključuje uvodni deo s određenjem cilja ili problema rada, opis metodologije, prikaz dobijenih rezultata, kao i diskusiju rezultata sa zaključcima i implikacijama.

Glavni naslovi trebaju biti urađeni sa veličinom fonta 12, bold, sve velika slova i poravnati sa levom marginom.

Podnaslovi se pišu sa veličinom fonta 12, bold, poravnato prema levoj margini, velikim i malim slovima.

Slike i tabele. Svaka ilustracija i tabela moraju biti razumljive i bez čitanja teksta, odnosno, moraju imati redni broj, naslov i legendu (objašnjenje oznaka, šifara, skraćenica i sl.). Tekst se navodi ispod slike, a iznad tabele. Redni brojevi slika i tabela se daju arapskim brojevima.

Reference u tekstu se navode u uglačastim zagradama, na pr. [1,3]. Reference se prilaže na kraju rada na sledeći način:

[1] B.A. Willis, Mineral Procesing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, str. 35. (za poglavje u knjizi)

[2] H. Ernst, Research Policy, 30 (2001) 143–157. (za članak u časopisu)

[3] www: <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (za web dokument)

Navedenje neobjavljenih radova nije poželjno, a ukoliko je neophodno treba navesti što potpunije podatke o izvoru.

Zahvalnost se daje po potrebi, na kraju rada, a treba da sadrži ime institucije koja je finansirala rezultate koji se daju u radu, sa nazivom i brojem projekta; ili ukoliko rad potiče iz magistarske teze ili doktorske disertacije, treba dati naziv teze/disertacije, mesto, godinu i fakultet na kojem je odbranjena. Veličina fonta 10, italic.

Radovi se šalju prevashodno elektronskom poštom ili u drugom elektronskom obliku.

Adresa uredništva je: Časopis BAKAR

Institut za rудarstvo i metalurgiju

Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

E-mail: nti@irmbor.co.rs; ana.kostov@irmbor.co.rs

Telefon: 030/454-260; 030/454-108

Svim autorima se zahvaljujemo na saradnji.

INSTRUCTIONS FOR THE AUTHORS

COPPER Journal is published twice a year and publishes the scientific, technical and review paper works. Only original works, not previously published and not simultaneously submitted for publications elsewhere, are accepted for publication in the journal. The papers are anonymously reviewed by the reviewers after that the Editorial decided to publish. The submitted work for publication should be prepared according to the instructions below as to be included in the procedure of reviewing. Inadequate prepared manuscripts will be returned to the author for finishing.

Volume and Font Size. The paper needs to be written on A4 paper (210x297 mm), margins (left, right, top and bottom) with each 25 mm, in the Microsoft Word later version, font Times New Roman, size 12, with 1.5 line spacing, justified to the left and right margins. It is recommended that the entire manuscript cannot be less than 5 pages and not exceed 10 pages.

Title of Paper should be written in capital letters, bold, in Serbian and English. Under the title, the names of authors and their affiliations should be written. Corresponding author must provide his/her e-mail address for contact in a footnote.

Abstract is at the beginning of the paper and should be up to 200 words include the aim of the work, the applied methods, the main results and conclusions. The font size is 10, italic.

Keywords are listed below the abstract. They should be minimum 3 and maximum of 6. The font size is 10, italic.

Abstract and Keywords should be also given in English language.

Basic Text. The papers should be written concisely, in understandable style and logical order that, as a rule, including the introduction part with a definition of the aim or problem of the work, a description of the methodology, presentation of the obtained results as well as a discussion of the results with conclusions and implications.

Main Titles should be done with the font size 12, all capital letters and aligned to the left margin.

Subtitles are written with the font size 12, bold, aligned to the left margin, large and small letters.

Figures and Tables. Each figure and table must be understandable without reading the text, i.e., must have a serial number, title and legend (explanation of marks, codes, abbreviations, etc.). The text is stated below the figure and above the table. Serial numbers of figures and tables are given in Arabic numbers.

References in the text are cited in square brackets, e.g. [1,3]. References are enclosed at the end of the paper as follows:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, p. 35. (*for the chapter in a book*)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (*for the article in a journal*)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (*for web document*)

Citation of the unpublished works is not preferable and, if it is necessary, as much as possible completed data source should be listed.

Acknowledgement is given, as needed, at the end of the paper and should include the name of institution that funded the given results in the paper, with the project title and number; or if the work is resulted from the master thesis or doctoral dissertation, it should give the title of thesis/dissertation, place, year and faculty/university where it was defended. Font size is 10, italic.

The manuscripts are primarily sent by e-mail or in other electronic form.

Editorial Address: Journal COPPER
 Mining and Metallurgy Institute Bor
 35 Zeleni bulevar, 19210 Bor
 E-mail: nti@irmbor.co.rs; ana.kostov@irmbor.co.rs
 Telephone: +381 30/454-260; +381 30/454-108

We are thankful for all authors on cooperation.

SADRŽAJ
CONTENS

Ana Petrović, Radmila Marković, Dragana Božić

**MORFOLOGIJA METALNIH PENA I NJIHOVA PRIMENA
ZA PROCES PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA**

MORPHOLOGY OF METALLIC FOAMS AND THEIR APPLICATION IN
THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS1

Slavica Miletić, Biserka Trumić, Suzana Stanković, Zdenka Stanojević Šimšić

**MEĐUPROVERA OPREME PRIMENOM X-KONTROLNE KARTE U
LABORATORIJI ZA ISPITIVANJE MATERIJALA U INSTITUTU ZA
RUDARSTVO I METALURGIJU BOR**

INTER-VERIFICATION OF EQUIPMENT USING THE
X-CONTROL CARD IN THE LABORATORY FOR MATERIAL TESTING
IN THE MINING AND METALLURGY INSTITUTE BOR9

Zorica Sovrić, Lidija Kalinović, Sanela Vasiljević, Vojka Gardić, Miloš Đukić

GC/MS ANALIZA OTPADNIH ULJA I NJIHOVA KARAKTERIZACIJA

GC/MS ANALYSIS OF WASTE OILS AND THEIR CHARACTERIZATION15

Miloš Đukić, Sanela Vasiljević, Zorica Sovrić, Dragana Adamović

**VERIFIKACIJA I VALIDACIJA ANALITIČKIH METODA
U SKLADU SA STANDARDOM ISO/IEC 17025**

VERIFICATION AND VALIDATION OF ANALYTICAL METHODS IN
ACCORDANCE WITH THE ISO/IEC 17025 STANDARD25

Milan Radivojević, Zoran Stević, Marijana Pavlov-Kagadejev

**PRIMENA TERMOVIZIJE I RAČUNARSKIH SISTEMA ZA MONITORING
VITALNIH SISTEMA U ELEKTROTEHNICI, MAŠINSTVU I GRAĐEVINARSTVU**

APPLICATION OF THERMOVISION AND COMPUTER SYSTEMS
FOR MONITORING VITAL SYSTEMS IN ELECTROTECHNICS,
MECHANICAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION35
