



ISPITIVANJE BIOTRIBOLOŠKIH I DIMENZIONALNIH KARAKTERISTIKA  
POLIMETILMETAKRILATA ZA PRIMENU U DENTALNOJ PROTETICI

INVESTIGATION OF BIOTRIBOLOGY AND DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF  
POLYMETHYL METHACRYLATE FOR APPLICATION IN DENTAL PROSTHETICS

Milica Abeer, Mario Šokac, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – BIOMEDICINSKO INŽENJERSTVO**

**Kratak sadržaj** – U okviru ovog rada prikazani su rezultati merenja kinematskog koeficijenta trenja na polimetilmetakrilatu, kao i rezultati dimenzionalne analize u vidu CAD inspekcije. Merenje kinematskog koeficijenta trenja je izvršeno metodom frikcionog para „disk-blok”. Eksperimentalna ispitivanja su izvršena za različite vrednosti normalnog opterećenja na cilindrima napravljenim od polimetilmetakrilata koji su bili izloženi povećanoj temperaturi radi njihove polimerizacije. Na osnovu rezultata može se zaključiti da srednja aritmetička vrednost kinematskog koeficijenta trenja opada sa povećanjem sile, dok kod rezultata CAD inspekcije na osnovu standardne devijacije je ustanovljeno da postoje određena odstupanja.

**Cljučne reči:** trenje, kinematski koeficijent trenja, polimetilmetakrilat, dentalne proteze

**Abstract** - The results of measuring the kinematic friction coefficient on polymethyl methacrylate, as well as the results of dimensional analysis in the form of CAD inspection, are presented in this paper. The measurement of the kinematic friction coefficient was carried out using the "disk-block" friction pair method. Experimental tests were performed for different values of normal load on cylinders made of polymethyl methacrylate that were exposed to increased temperature for their polymerization. Based on the results, it can be concluded that the arithmetic mean value of the kinematic coefficient of friction decreases with increasing force, while for the CAD inspection results, based on the standard deviation, it was established that there are certain deviations present.

**Keywords:** friction, kinematic friction coefficient, polymethyl methacrylate, dental prostheses

**1. UVOD**

Tribologija je naučna disciplina koja uključuje proučavanje i primenu principa trenja, podmazivanja i habanja. Veoma je interdisciplinarna, oslanjajući se na mnoga akademska polja, uključujući fiziku, hemiju, nauku o materijalima, matematiku, biologiju i inženjerstvo. Pod-oblasti tribologije uključuju biotribologiju, nanotribologiju, svemirsku tribologiju i tribotroniku [1]. Tribologija je jedna od nekoliko novih tehničkih disciplina čiji razvoj ima izuzetan uticaj na pouzdanost i vek

mašinskih sistema. Tribološka istraživanja i korišćenje već ostvarenih znanja, kako u procesu konstruisanja tako i u proizvodnji i eksploataciji mašina, predstavljaju neophodnost savremene industrije kada se posmatraju njeni današnji zahtevi za ekonomičnu primenu materijala, racionalno trošenje energije, povećanje pouzdanosti mašinskih sistema, kao i smanjenje troškova održavanja [2]. Biotribologija predstavlja deo tribologije koji se bavi proučavanjem procesa trenja i habanja u tribomehaničkim sistemima u telu čoveka [3].

**2. ODVIJANJE BIOTRIBOLOŠKIH PROCESA U OBLASTI DENTALNE MEDICINE**

Termin trenje koristi se da opiše sve one disipativne pojave, sposobne da proizvode toplotu i da se suprotstave relativnom kretanju između dve površine. Postoje dve glavne vrste trenja. Statičko trenje koje se javlja između površina u fiksnom stanju (ili relativno stacionarnom) i dinamičko trenje koje se dešava između površina u relativnom kretanju. Proučavanje fenomena trenja je pretežno empirijska studija i ne dozvoljava da se dođe do preciznih rezultata, već samo do korisnih približnih zaključaka. Habanje predstavlja progresivno nehotično uklanjanje materijala sa površine koja je u relativnom kretanju sa drugom površinom ili sa fluidom. Mogu se razlikovati dve različite vrste habanja: umereno habanje i jako habanje. Prvi slučaj se odnosi na mala opterećenja i glatke površine, dok se drugi odnosi na znatno veća opterećenja i kompatibilne i hrapave površine, kod kojih su procesi habanja mnogo snažniji. Habanje igra fundamentalnu ulogu u tribološkim studijama [1].

Da bi se smanjilo trenje između površina i držalo habanje pod kontrolom, koriste se maziva koja mogu biti bilo koji tečni materijali koji se odlikuju sa svojom viskoznošću. Viskozitet je ekvivalent trenja u tečnostima, on zapravo opisuje sposobnost tečnosti da se odupre silama koje izazivaju promenu oblika [1]. Kontinuirani naponi su uloženi u istraživanje i razvoj za poboljšanje performansi svih vrsta implantata i restauracije materijala. Zubni implantati se koriste kada nedostaje zub, bilo zbog karijesa ili parodontalne bolesti, i čest su izbor kada je originalni zub ozbiljno pogođen i neophodna je njegova zamena. Takođe, implantati se koriste za pričvršćivanje proteza i/ili delimičnih proteza. Različite vrste restaurativnih materijala se istražuju za popravku pokvarenih zuba, za koje mehanički integritet, korozija, biokompatibilnost, trenje, habanje i estetika su neka od ključnih pitanja, kao što se može videti u tabeli 1.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio doc. dr Mario Šokac.

Tabela 1. *Željena svojstva materijala za izradu proteza [4]*

Biološka svojstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biokompatibilnost</li> <li>• Neiritantnost</li> <li>• Netoksičnost</li> <li>• Nekancerogenost</li> </ul>
Hemijska svojstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nerastvorljivost</li> <li>• Nereaktivnost</li> <li>• Kompatibilnost</li> </ul>
Mehanička svojstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visok moduo elastičnosti</li> <li>• Proporcionalna granica i otpornost</li> <li>• Abrazivna otpornost</li> <li>• Zamor</li> <li>• Snaga udara</li> </ul>
Fizička svojstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mala specifična težina</li> <li>• Dimenzionalna stabilnost</li> <li>• Dobar toplotni provodnik</li> <li>• Koefikasnost toplotnog širenja sličan termičkoj stabilnosti zuba</li> </ul>
Estetika	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozračnost</li> <li>• Sposobnost bojenja i pigmentacije u skladu sa bojom zuba i desni</li> </ul>
Ostala svojstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pristupačna cena</li> <li>• Lako manipulisanje i popravka</li> <li>• Lako se čisti</li> <li>• Duži rok trajanja</li> </ul>

### 3. ZNAČAJ DIMENZIONALNIH ANALIZA

Proces 3D skeniranja predstavlja analizu predmeta ili okruženja u stvarnom svetu radi prikupljanja podataka o njegovom obliku i geometriji. Prikupljeni podaci se zatim mogu koristiti za rekonstrukciju digitalnih 3D modela gde su prikupljeni 3D podaci korisni za širok spektar aplikacija. Ovi uređaji se u velikoj meri koriste u industriji zabave u proizvodnji filmova i video igara, uključujući i virtuelnu stvarnost. Druge uobičajene primene ove tehnologije uključuju snimanje i prepoznavanje pokreta, robotsko mapiranje, industrijski dizajn, primena kod izrade medicinske protetike, reverzibilni inženjering i izradu prototipa, kvalitet kontrola/inspekcija, kao i kod digitalizacije kulturnih artefakata [5].

#### 3.1. Primena u dentalnoj medicini

Komercijalni 3D skeneri se koriste za snimanje oblika pacijenta u ortotici i stomatologiji. Softver se zatim koristi za projektovanje i proizvodnju ortoza, proteza ili zubnih implantata [5]. Tačnost je jedan od glavnih zahteva u stomatološkoj medicini. Da bi se proverila tačnost, potrebni su skeneri. Cilj je da se metodom skeniranja dobije širok spektar dentalnih morfologija sa visokom tačnošću.

Mnogi stomatološki sistemi koriste tehnologije 3D skenera za digitalizaciju 3D objekata zubnog preparata (bilo u *in vivo* ili *in vitro* uslovima), kako bi se digitalno proizvela restauracija koristeći softver za dizajn i na kraju proizvela konačna restauracija primenom konvencionalnih tehnologija izrade, ili čak i primenom aditivnih tehnologija (3D štampa).

Ovakvi sistemi su dizajnirani tako da olakšaju proces 3D skeniranja objekta *in vivo* i da, na ovaj način, proizvedu zamensku restauraciju [5].

### 4. POLIMETILMETAKRILAT I NJEGOVA PRIMENA U OBLASTI STOMATOLOGIJE

Polimetilmetakrilat (PMMA) pripada grupi materijala koji se nazivaju još i inženjerska plastika. To je providni termoplast, a takođe je poznat kao akril, odnosno akrilno staklo. Ova plastika se često koristi u obliku listova kao laganija i otpornija alternativa staklu. Takođe se može koristiti kao smola za livenje, u mastilima i premazima i za mnoge druge svrhe. PMMA je ekonomična alternativa polikarbonatu kada su zatezna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, transparentnost, poliranje i UV tolerancija važniji od udarne čvrstoće, hemijske otpornosti i otpornosti na toplotu. Pored toga, PMMA ne sadrži potencijalno štetne podjedinice bisfenol-A koje se nalaze u polikarbonatu. Što se tiče primene u medicini, PMMA ima zadovoljavajući stepen kompatibilnosti sa ljudskim tkivom. Koristi se za izradu naočara, u ortopediji, plastičnoj hirurgiji i dentalnoj medicini [6].

### 5. ISPITIVANJE BIOTRIBOLOŠKIH I DIMENZIONALNIH KARAKTERISTIKA

Ispitivanje biotriboloških i dimenzionalnih karakteristika vršeno je na cilindrima i pločici napravljenim od polimetilmetakrilata. Za pravljenje cilindara korišćeni su profili od aluminijuma prečnika 5 mm i dužine 50 mm.

Koraci pri izradi testnih uzoraka za analizu su sledeći (slika 1):

- Postavljanje voska na dno profila/epruvete kako polimer ne bi iscureo prilikom polimerizacije;
- Unutrašnjost epruvete se oblaže lubrikantom na bazi kreme radi lakšeg vađenja;
- Sipanje PMMA u epruvete;
- Uklanjanje viška voska sa dna epruvete;
- Polimerizacija epruveta napunjenih sa PMMA kuvanjem u ključaloj vodi u vremenskom periodu od 45 minuta.



Slika 1. 4 aluminijumske epruvete napunjene sa PMMA korišćene za eksperiment

Za eksperiment je izabrano da se polimerizuju kuvanjem samo dve epruvete označene sa 1 i 2, a druge dve epruvete 3 i 4 su ostavljene da očvrstnu na sobnoj temperaturi. Na slici 2 se može primetiti kako je polimer počeo da se širi u epruvetama 1 i 2 pri povećanju temperature (kuvanju). Nakon završetka ovog procesa, cilindri su izvađeni iz epruvete. Primećeno je da su uzorci 1 i 2 koji su bili izloženi polimerizaciji u ključaloj vodi veoma lako ispali i bili su zadovoljavajuće tvrdoće, dok uzorci 3 i 4 koji su bili na sobnoj temperaturi ostali u

deformabilnom stanju sa smanjenom tvrdoćom i njihovo vađenje je bilo otežano.

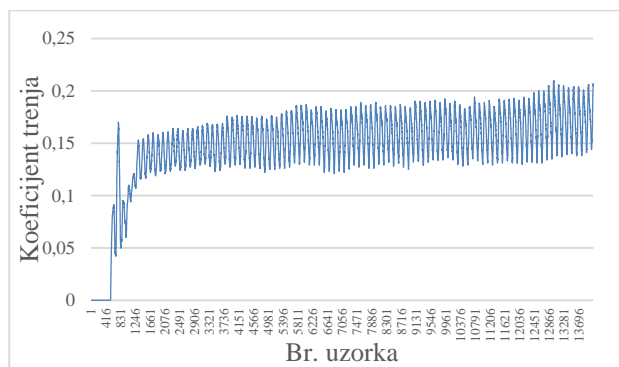


Slika 2. Proces polimerizacije PMMA kod ključanja vode

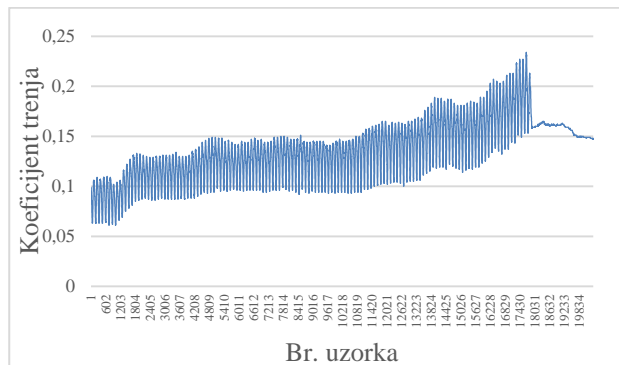
### 5.1. Biotribološke karakteristike

Merenje kinematskog koeficijenta trenja izvedeni su na frikcionom paru „disk-blok“. Kontakt se ostvaruje između dve površine na dvodimenzionalnoj liniji [7]. Tokom merenja korišćene su različite vrednosti normalnog opterećenja (10N i 20N) na bloku. Brzina obrtanja diska je bila ista za oba merenja kod oba cilindra, i iznosila je 250 o/min. Uzorci za disk i blok bili su od istog materijala, polimetilmetakrilata.

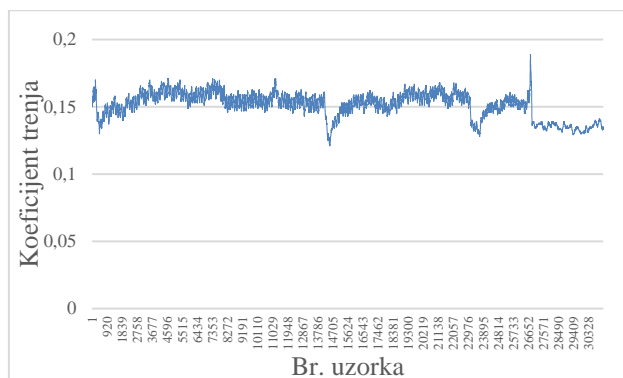
Merenje kinematskog koeficijenta trenja je vršeno samo na cilindrima 1 i 2 koji su polimerizovani na povišenoj temperaturi iz razloga što su druga dva cilindra 3 i 4 bila previše mekana za ovu analizu. Rezultati merenja kinematskog koeficijenta trenja za epruvete 1 i 2 sa vrednošću normalnog opterećenja od 10N i 20N pri broju obrtaja od 250 o/min su prikazani na graficima 1, 2, 3 i 4.



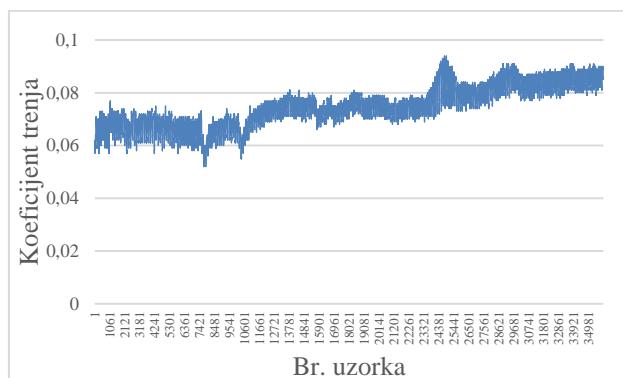
Grafik 1. Kinematski koeficijent trenja (sila 10N, br. obrtaja 250 o/min) - cilindar 1



Grafik 2. Kinematski koeficijent trenja (sila 20N, br. obrtaja 250 o/min) - cilindar 1



Grafik 3. Kinematski koeficijent trenja (sila 10N, br. obrtaja 250 o/min) - cilindar 2



Grafik 4. Kinematski koeficijent trenja (sila 20N, br. obrtaja 250 o/min) - cilindar 2

Rezultati eksperimenta kinematskog koeficijenta trenja daju uvid u vrednosti standardne devijacije i aritmetičke sredine odstupanja rezultata (Tabela 2).

Tabela 2. Rezultati srednje vrednosti i standardne devijacije kod kinematskog koeficijenta trenja

Sila	Cilindar 1		Cilindar 2	
	Srednja vrednost	Standardna devijacija	Srednja vrednost	Standardna devijacija
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10 N	0.155598	0.038468	0.151538	0.009507
20 N	0.079145	0.051183	0.074667	0.007702

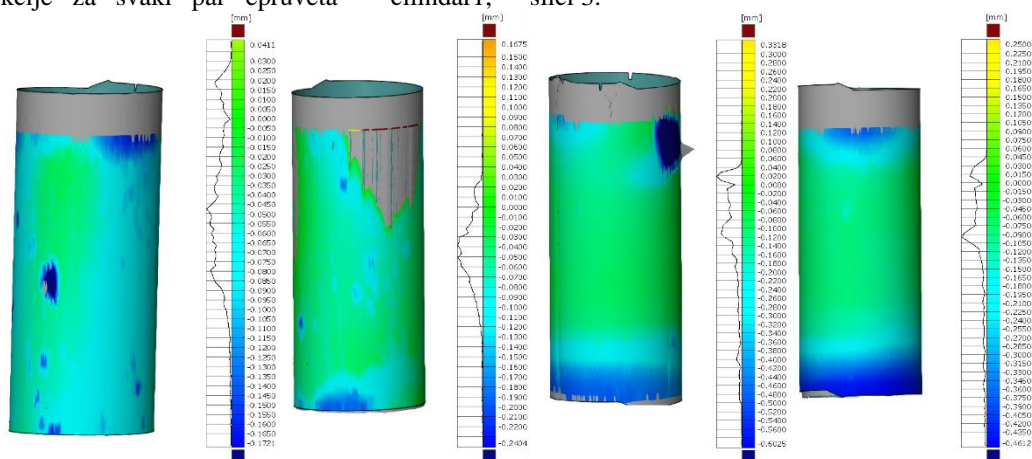
Na osnovu rezultata iz tabele može se zaključiti da srednja aritmetička vrednost kinematskog koeficijenta trenja opada sa povećanjem sile, dok se kod vrednosti standardne devijacije može videti da nema većih odstupanja.

### 5.2. Dimenzionalne karakteristike

Za dimenzionalno merenje epruveta pre sprovođenja eksperimenata, kao i cilindra od PMMA, korišćena je troosna koordinatna merna mašina KMM Contura G2 (CARL ZEISS). Cilj ovog eksperimenta je da se ustanove dimenzionalne promene između polimerizovanog PMMA (epruveta 1 i 2) i PMMA materijala koji je očvrstnuo na sobnoj temperaturi (epruveta 3 i 4). Izvršena su merenja

unutrašnjosti praznih epruveta i spoljašnjeg omotača cilindara od PMMA za sva 4 uzorka. Tokom sprovođenja CAD inspekcije za svaki par epruveta – cilindar1,

epruveta – cilindar2, epruveta – cilindar3 i epruveta – cilindar4 sprovedena je odgovarajuća analiza prikazana na slici 3.



Slika 3. Prikaz rezultata CAD Inspekcije za par a) epruveta – cilindar1, b) epruveta – cilindar2, c) epruveta – cilindar3 i d) epruveta – cilindar4

Na bazi CAD inspekcije se mogu primetiti odstupanja između unutrašnje površine epruvete i spoljašnjeg omotača cilindara od PMMA.

Može se uočiti da cilindri od PMMA (1 i 2) koji su bili izloženi povišenoj temperaturi imaju veće odstupanje od unutrašnje površine epruvete u vidu redukovano prečnika (prikazano plavom bojom). Pretpostavka je da je uzrok ovakvih rezultata temperaturno skupljanje PMMA materijala tokom hlađenja, čemu dodatno svedoči i njihovo olakšano vađenje iz epruveta.

Kod nepolimerizovanih cilindara 3 i 4 koji su očvrstnula na sobnoj temperaturi, osim njihovog otežanog vađenja iz epruveta (usled njihove adhezije za unutrašnji omotač epruvete), takođe se na osnovu rezultata CAD inspekcije može uočiti njihova deformacija po celom omotaču, gde je došlo do formiranja tzv. buričastog oblika, što se takođe može videti i na rezultatima CAD inspekcije u vidu plave boje pri vrhu i pri dnu epruveta 3 i 4.

## 6. ZAKLJUČAK

Uzimajući u obzir značaj primene polimetilmetakrilata u oblasti dentalne protetike, bolje poznavanje njegovih kako triboloških, tako i dimenzionalnih karakteristika je od velikog značaja danas. Posmatrajući rezultate koji su ostvareni u okviru ovog master rada, može se uočiti da dolazi do određenih promena prilikom polimerizacije PMMA materijala, sa samim tim i do dimenzionalnih promena, što za rezultat može omogućiti bolji uvid u ponašanje ovog materijala tokom njegove primene.

## 7. LITERATURA

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Tribology> (pristupljeno u oktobru 2022).
- [2] <http://tribolab.mas.bg.ac.rs/tribologija.htm> (pristupljeno u oktobru 2022).
- [3] Radenko Blažević: Tribodijagnostika kinematskog koeficijenta trenja metodom blok na disku, master rad, Novi Sad – Fakultet tehničkih nauka, oktobar 2018

[4] Muhammad Sohail Zafar: Prosthetic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update, Polymers, vol. 12, no. 10., pp. 1-35, 2020.

[5] [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanning](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanning) (pristupljeno u oktobru 2022).

[6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(methyl\\_methacrylate\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate)) (pristupljeno u oktobru 2022)

[7] Vukelić Đ., Santoši Ž., Šokac M., Budak I., Šarić T., Šimunović G., Tadić B.: Evaluation of the kinetic friction coefficient by using „disc-block“ friction pair of different wooden samples, 16. International Conference on Tribology - SERBIATRIB, Kragujevac: Faculty of Engineering, 15-17 May, pp. 287-292, 2019.

### Kratka biografija:



**Milica Abeer** rođena je u Novom Sadu 1995. godine. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Biomedicinskog inženjerstva – Mašinstvo u biomedicinskom inženjerstvu odbranila je 2022. godine.  
kontakt: [abeer.milica@gmail.com](mailto:abeer.milica@gmail.com)



**Mario Šokac** rođen je u Somboru 1989. god. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2019. god., a od 2020. god. je zvanju docenta. Uže oblasti interesovanja su reverzibilni inženjerski dizajn, metode 3D digitalizacije i dizajn biomedicinskih modela.