

# Primjena biomaterijala u medicini

---

**Tomazetić, Maro**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:652834>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-17**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PRIMJENA BIOMATERIJALA U MEDICINI**

Rijeka, rujan 2024.

Maro Tomazetić

0035225492

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PRIMJENA BIOMATERIJALA U MEDICINI**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Rijeka, rujan 2024.

Maro Tomazetić

0035225492

Rijeka, 05.03.2024.

Zavod: Zavod za inženjerstvo materijala  
Predmet: Materijali I

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Maro Tomazetić (0035225492)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak: **Primjena biomaterijala u medicini / Application of biomaterials in medicine**

### Opis zadatka:

Definirati biomaterijale i analizirati zahtjeve koje moraju ispunjavati za primjenu u medicinske svrhe. Prikazati osnovne vrste biomaterijala te ih usporediti sa stajališta svojstava i primjene u medicini. Analizirati trendove razvoja i primjene biomaterijala u medicini. Dati odgovarajuće zaključke.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

Maro Tomazetić

Zahvaljujem se svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza na strpljenju i danim savjetima prilikom izrade ovog završnog rada.

Također htio bih se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom ovih 5 kratkih godina studiranja.

Maro Tomazetić

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. DEFINICIJA I ZNAČAJ BIOMATERIJALA U MEDICINI.....	3
2.1. Definicija biomaterijala .....	3
2.2. Povijesni razvoj biomaterijala .....	4
2.3. Značaj biomaterijala za suvremenu medicinu .....	7
2.4. Etički aspekti primjene biomaterijala .....	8
3. KLASIFIKACIJA I VRSTE BIOMATERIJALA.....	10
3.1. Metali.....	10
3.2. Polimeri .....	13
3.3. Keramika .....	15
3.4. Kompozitni materijali.....	18
4. KARAKTERISTIKE I ZAHTIJEVI BIOMATERIJALA ZA MEDICINSKU PRIMJENU .....	20
4.1. Biokompatibilnost .....	20
4.2. Mehaničke karakteristike biomaterijala.....	21
4.3. Površinske karakteristike biomaterijala.....	22
4.4. Biorazgradivost biomaterijala.....	25
4.5. Kemijska stabilnost.....	28
4.6. Mogućnost sterilizacije.....	29
4.7. Prilagodljivost biomaterijala.....	30
5. BIOMATERIJALI U SPECIFIČNIM MEDICINSKIM PRIMJENAMA.....	32
5.1. Kardiovaskularni uređaji .....	32
5.1.1 Stentovi, pacemakeri i umjetne srčane valvule .....	32
5.1.2. Inovacije i napredak.....	33
5.1.3. Biokompatibilnost i dugotrajnost kardiovaskularnih uređaja.....	34
5.2. Ortopedija .....	34
5.2.1. Vrste biomaterijala u ortopediji.....	34

5.2.2. Upotreba biomaterijala u ortopediji.....	36
5.2.3. Prednosti i nedostaci biomaterijala u ortopediji .....	38
5.3. Regenerativna medicina .....	39
5.3.1. Upotreba biomaterijala u tkivnom inženjeringu .....	39
5.3.2. Primjeri regeneracije tkiva.....	40
5.3.3. Buduće perspektive i istraživanja .....	41
5.4. Stomatologija.....	41
5.4.1. Vrste biomaterijala u stomatologiji .....	41
5.4.2. Inovacije i budućnost biomaterijala u stomatologiji.....	44
5.5. Dijagnostički uređaji.....	45
5.5.1. Upotreba biomaterijala u dijagnostici.....	45
5.5.2. Biomehanički senzori i drugi uređaji.....	45
6. NAPREDNE TEHNOLOGIJE I BUDUĆE PERSPEKTIVE .....	48
6.1. Nanotehnologija i biomaterijali .....	48
6.2. 3D ispis biomaterijala.....	49
6.3. Personalizirana medicina i biomaterijali .....	49
6.4. Budući pravci istraživanja i razvoja .....	50
7. ETIKA I REGULACIJA BIOMATERIJALA .....	52
8. ZAKLJUČAK.....	55
LITERATURA .....	57
POPIS SLIKA.....	61
SAŽETAK.....	62
SUMMARY.....	63



## 1. UVOD

Razvoj i primjena biomaterijala u medicini predstavljaju jedan od najdinamičnijih i najperspektivnijih segmenata modernog zdravstvenog sektora. Biomaterijali su materijali koji se koriste za izradu medicinskih uređaja ili implantata koji dolaze u kontakt s biološkim sustavima. Ovi materijali imaju ključnu ulogu u unapređenju medicinske tehnologije i pružanju inovativnih rješenja za različite medicinske izazove. Od prvih pokušaja korištenja prirodnih materijala u rekonstruktivnoj kirurgiji do današnjih sofisticiranih biokompatibilnih i biorazgradivih polimera, razvoj biomaterijala postao je neizostavan dio moderne medicine.

Biomaterijali se dobivaju laboratorijski iz drugih prirodnih ili umjetnih materijala, te moraju ispunjavati određene karakteristike i standarde kako bi se mogli koristiti u biomedicinske svrhe, odnosno implantirati u žive organizme. Biomaterijali su danas neizostavni u raznim medicinskim primjenama, tvoreći strukturu koja poboljšava, povećava ili nadomješta prirodnu funkciju neke strukture unutar organizma [1].

Primjena biomaterijala u medicini obuhvaća širok spektar područja, uključujući ortopediju, stomatologiju, kardiovaskularnu medicinu, oftalmologiju, kao i regenerativnu medicinu i tkivno inženjerstvo. Svako od ovih područja koristi specifične vrste biomaterijala koji su prilagođeni za ispunjavanje određenih funkcionalnih zahtjeva, kao što su biokompatibilnost, mehanička otpornost, razgradivost i interakcija s biološkim tkivom.

U ortopediji se biomaterijali koriste za izradu implantata koji pomažu u rekonstrukciji i zamjeni oštećenih kostiju i zglobova, čime se poboljšava mobilnost i kvaliteta života pacijenata. Stomatologija koristi biomaterijale za zubne implantate i restauracije, omogućavajući dugotrajna i estetski prihvatljiva rješenja za pacijente sa zubnim problemima. Kardiovaskularni uređaji, poput stentova i umjetnih srčanih zalistaka, također se oslanjaju na napredne biomaterijale kako bi osigurali dugotrajnu funkcionalnost i smanjili rizik od komplikacija.

Regenerativna medicina i tkivno inženjerstvo predstavljaju revolucionarne pristupe u medicini koji koriste biomaterijale za stvaranje novih tkiva i organa. Ovi materijali omogućavaju rast stanica i

stvaranje novih bioloških struktura, što otvara mogućnosti za liječenje raznih degenerativnih bolesti i ozljeda koje do sada nisu imale adekvatno rješenje.

Unatoč značajnim naprecima, primjena biomaterijala u medicini suočava se s mnogim izazovima. Biokompatibilnost, sigurnost, dugotrajnost i regulativni zahtjevi predstavljaju ključne aspekte koje je potrebno pažljivo razmotriti prilikom razvoja novih biomaterijala. Također, etički i društveni aspekti primjene ovih materijala igraju važnu ulogu u osiguravanju prihvatljivosti i sigurnosti za pacijente.

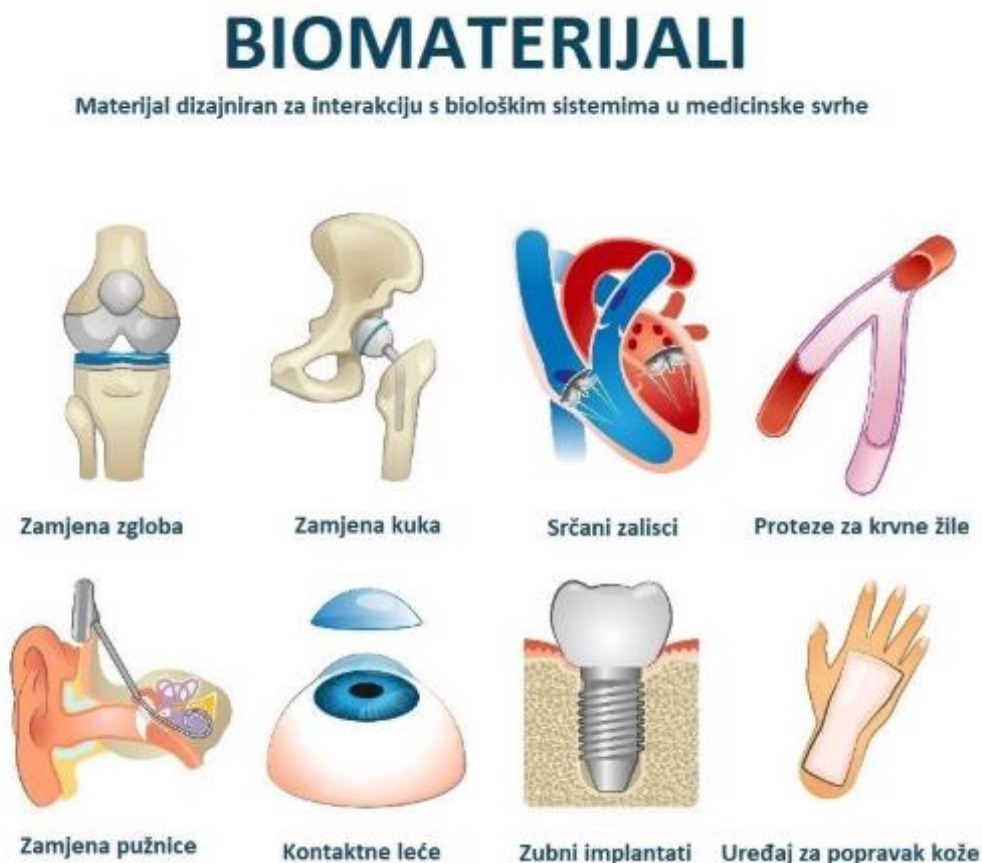
Cilj ovog rada je pružiti sveobuhvatan pregled primjene biomaterijala u medicini, s posebnim osvrtom na različite vrste biomaterijala, njihove specifične primjene, izazove i buduće perspektive. Rad će obuhvatiti detaljnu analizu metala, polimera, keramike i kompozitnih materijala te njihovih specifičnih upotreba u različitim medicinskim disciplinama. Također, razmotrit će se napredne tehnologije, etički aspekti i regulativni okviri koji oblikuju razvoj i primjenu biomaterijala u suvremenoj medicini.

Kroz temeljitu analizu i pregled trenutnog stanja i budućih trendova, ovaj rad će pružiti vrijedne uvide u važnost biomaterijala i njihov utjecaj na poboljšanje kvalitete života pacijenata, kao i na razvoj medicinske tehnologije u cjelini.

## 2. DEFINICIJA I ZNAČAJ BIOMATERIJALA U MEDICINI

### 2.1. Definicija biomaterijala

Biomaterijali su materijali prirodnog ili sintetičkog podrijetla, koji su posebno dizajnirani za interakciju s biološkim sustavima radi dijagnostičkih, terapijskih ili rekonstruktivnih svrha. Ovi materijali moraju biti biokompatibilni, što znači da ne smiju izazvati imunološke reakcije, upale ili druge negativne učinke kada su u kontaktu s tkivima ili tekućinama u tijelu. Osim biokompatibilnosti, biomaterijali moraju posjedovati određena mehanička svojstva te kemijsku stabilnost i ovisno o primjeni, biorazgradivost. Biokompatibilnost podrazumijeva da materijal može obavljati svoju funkciju unutar živog organizma bez izazivanja štetnih učinaka. Raznolika primjena biomaterijala u medicini prikazana je na slici 2.1.



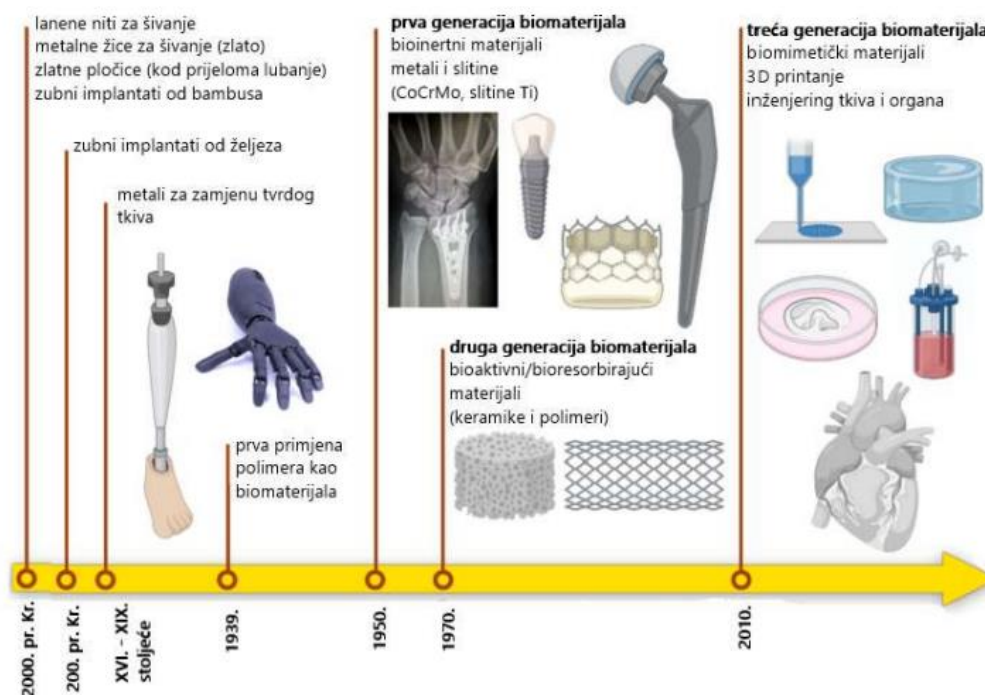
*Slika 2.1. Raznolika primjena biomaterijala u medicini [2]*

## 2.2. Povijesni razvoj biomaterijala

Povijest biomaterijala započinje tisućama godina unatrag, kada su drevne civilizacije koristile prirodne materijale poput drveta, kostiju i školjki za zamjenu ili popravak dijelova tijela. Prvi dokumentirani slučajevi upotrebe biomaterijala su iz vremena Egipćana i Maja, koji su koristili školjke za popravak zuba i kosti za zamjenu dijelova lubanje.

U 19. stoljeću, s razvojem kirurgije i sterilizacijskih tehnika, počinje moderni razvoj biomaterijala. Tijekom tog perioda, korišteni su materijali poput gume, parafina i voska za različite medicinske primjene. Početkom 20. stoljeća, napredak u kemiji i metalurgiji doveo je do razvoja novih materijala poput nehrđajućeg čelika, kobalta i njegovih legura, te polimera poput polietilena i polipropilena.

1950-ih godina, uvođenje titanija i njegovih legura značajno je unaprijedilo područje ortopedskih i dentalnih implantata zbog njihove izuzetne mehaničke čvrstoće i otpornosti na koroziju. Uvođenje sintetičkih polimera kao što su polilaktična kiselina i poliglikolna kiselina omogućilo je razvoj resorptivnih šavova i drugih biorazgradivih medicinskih uređaja. Na slici 2.2 prikazan je povijesni razvoj biomaterijala.



Slika 2.2. Povijesni razvoj biomaterijala [3]

Prva generacija biomaterijala obuhvaća materijale koji su prvenstveno dizajnirani da budu bioinertni, tj. da ne izazivaju nikakve negativne biološke reakcije kada su implantirani u tijelo. Bioinertni materijali ne reagiraju s biološkim okruženjem, što znači da ne potiču imunološke odgovore niti utječu na okolna tkiva. Njihova uloga je pružanje mehaničke podrške ili zamjena bez interakcije s tjelesnim tekućinama i tkivima. Prvoj generaciji također pripadaju metali i slitine:

- Co-Cr-Mo slitine (kobalt-krom-molibden)
  - Ove slitine se koriste u ortopedskim implantatima, kao što su umjetni zglobovi kuka i koljena, te u dentalnim aplikacijama.
  - Co-Cr-Mo slitine su poznate po svojoj visokoj mehaničkoj čvrstoći, otpornosti na koroziju i biokompatibilnosti.
  - Imaju izvanrednu otpornost na habanje, što ih čini idealnim za primjenu u zglobovima koji su podložni stalnom pokretu i opterećenju.
- Slitine titanija (Ti i njegove legure)
  - Titanij i njegove legure, poput Ti-6Al-4V, koriste se u širokom spektru medicinskih aplikacija, uključujući ortopedske implantate, dentalne implantate, ploče i vijke za frakture, te srčane uređaje.
  - Titanij je izuzetno lagan, ima visoku mehaničku čvrstoću i otpornost na koroziju, te je biokompatibilan.
  - Površina titanija može se dodatno obrađivati kako bi se poboljšala osteointegracija (prianjanje kosti) za ortopedske i dentalne implantate.

Druga generacija biomaterijala uključuje materijale koji su dizajnirani da budu bioaktivni ili bioresorbirajući. Ovi materijali ne samo da su biokompatibilni, već mogu i aktivno sudjelovati u biološkim procesima potičući regeneraciju tkiva. Drugoj generaciji pripadaju keramike i polimeri:

- Keramike
  - Keramički biomaterijali poput kalcijevog fosfata (hidroksiapatita) i aluminijevog oksida koriste se u dentalnim i ortopedskim aplikacijama, uključujući zubne implantate i koštane zamjene.
  - Keramike su poznate po svojoj biokompatibilnosti, tvrdoći i otpornosti na habanje.
  - Bioaktivne keramike, poput hidroksiapatita, mogu se vezati na kost i poticati regeneraciju koštanog tkiva.

- Polimeri
  - Polimeri kao što su polilaktična kiselina (PLA) i poliglikolna kiselina (PGA) koriste se za izradu resorptivnih šavova, skafolda za tkivno inženjerstvo i sustava za kontrolirano otpuštanje lijekova.
  - Ovi polimeri su biorazgradivi, što znači da se mogu razgraditi unutar tijela i postupno zamijeniti prirodnim tkivom.
  - Polimeri se također mogu oblikovati u različite strukture i oblike, što ih čini prilagodljivima za razne medicinske primjene.

Treća generacija biomaterijala usmjerena je na razvoj biomimetičkih materijala, koji oponašaju prirodne strukture i funkcije bioloških sustava. Ovi materijali ne samo da su biokompatibilni i bioaktivni, već su i dizajnirani da oponašaju složene biološke procese, omogućujući napredne terapijske pristupe. Uz biomimetičke materijale treća generacija uvodi proces 3D printanja biomaterijala te inženjering tkiva i organa:

- Biomimetički materijal
  - Biomimetički materijali se koriste za izradu naprednih skafolda za tkivno inženjerstvo, sustava za isporuku lijekova i regenerativne terapije.
  - Ovi materijali su dizajnirani da oponašaju prirodnu ekstracelularnu matricu, pružajući strukturalnu i biokemijsku podršku za stanični rast, diferencijaciju i regeneraciju tkiva.
- 3D printanje
  - 3D printanje, ili aditivna proizvodnja, omogućava precizno oblikovanje biomaterijala u složene strukture koje su prilagođene specifičnim potrebama pacijenata.
  - 3D printanje se koristi za izradu prilagođenih implantata, protetskih dijelova, skafolda za tkivno inženjerstvo i modela za kirurško planiranje.
  - Ova tehnologija omogućava brzu izradu složenih geometrijskih oblika s visokom preciznošću, što rezultira boljim prilagođavanjem i funkcionalnošću u kliničkoj primjeni.
  - 3D printani materijali mogu biti izrađeni od različitih biomaterijala, uključujući metale, polimere i keramike.
- Inženjering tkiva i organa
  - Inženjering tkiva i organa predstavlja najnapredniji aspekt primjene biomaterijala, gdje se koriste kombinacije biomaterijala, stanica i bioloških čimbenika za stvaranje funkcionalnih tkiva i organa.

- Ova tehnologija se koristi za regeneraciju ili zamjenu oštećenih tkiva i organa, uključujući kožu, hrskavicu, kosti, jetru i srčane zakrpe.
- Inženjering tkiva koristi skafolde izrađene od biomaterijala koji pružaju strukturnu podršku za stanični rast i diferencijaciju.
- Skafoldi mogu biti biorazgradivi, omogućujući postupno zamjenu umjetnog materijala s novonastalim tkivom.
- Inženjering tkiva također koristi biološke čimbenike i signalne molekule kako bi potaknuo regeneraciju i funkcionalnu integraciju s okolnim tkivom.

Razvoj biomaterijala kroz tri generacije ilustrira kontinuirani napredak u medicinskoj tehnologiji, omogućavajući sve sofisticiranije i učinkovitije terapijske pristupe. Svaka generacija biomaterijala donosi nove mogućnosti i izazove, s ciljem poboljšanja kvalitete života pacijenata i unaprjeđenja medicinske njege.

### **2.3. Značaj biomaterijala za suvremenu medicinu**

Biomaterijali imaju ključnu ulogu u suvremenoj medicini, omogućujući razvoj novih terapijskih strategija i poboljšanje postojećih metoda liječenja. Njihova primjena obuhvaća širok spektar područja, uključujući:

1. **Ortopediju:** Biomaterijali se koriste za izradu ortopedskih implantata kao što su umjetni zglobovi, ploče, vijci i intramedularni čavli. Metali poput titanija i legura kobalta-kroma često se koriste zbog njihove izuzetne mehaničke čvrstoće i otpornosti na koroziju, dok se polimeri poput polietilena koriste za izradu zamjenskih zglobnih površina.
2. **Stomatologiju:** U stomatologiji, biomaterijali se koriste za izradu dentalnih implantata, krunica, mostova i proteza. Titanij i cirkonij-oksidi su uobičajeni materijali za dentalne implantate zbog njihove biokompatibilnosti i otpornosti na habanje. Polimeri i kompozitni materijali koriste se za dentalne ispune i restauracije zbog njihove estetike i jednostavnosti obrade.
3. **Kardiovaskularnu medicinu:** U kardiovaskularnoj medicini, biomaterijali se koriste za izradu stentova, srčanih zalisaka, umjetnih krvnih žila i srčanih zakrpa. Materijali poput

nehrđajućeg čelika, nitinola (nikal-titanij) i politetrafluoretilena (PTFE) koriste se zbog njihove fleksibilnosti, biokompatibilnosti i otpornosti na trombozu.

4. Regenerativnu medicinu i tkivno inženjerstvo: Biomaterijali igraju ključnu ulogu u regenerativnoj medicini i tkivnom inženjerstvu. Oni omogućuju rast i regeneraciju tkiva, stvarajući skafolde koji podupiru stanični rast i diferencijaciju. Biorazgradivi polimeri poput polilaktične i poliglikolne kiseline često se koriste za ove svrhe, jer se mogu resorbirati u tijelu nakon što izvrše svoju funkciju.

## **2.4. Etički aspekti primjene biomaterijala**

Primjena biomaterijala u medicini nosi sa sobom niz etičkih pitanja koja se moraju pažljivo razmotriti kako bi se osigurala sigurnost i dobrobit pacijenata. Ključni etički aspekti uključuju:

1. Sigurnost pacijenta: Biomaterijali moraju biti temeljito testirani kako bi se osigurala njihova sigurnost i učinkovitost. Klinička ispitivanja su ključna za potvrdu da biomaterijali neće izazvati štetne reakcije u tijelu. Testiranja obuhvaćaju in vitro (laboratorijska) i in vivo (na životinjama i ljudima) ispitivanja kako bi se procijenili potencijalni rizici.
2. Regulacija i standardi: Potrebno je uspostaviti stroge regulative i standarde za proizvodnju i primjenu biomaterijala kako bi se osigurala njihova kvaliteta i sigurnost. Međunarodne organizacije poput ISO (International Organization for Standardization) i FDA (Food and Drug Administration) postavljaju smjernice i propise za evaluaciju i certificiranje biomaterijala.
3. Pristupačnost: Važno je osigurati da inovacije u području biomaterijala budu dostupne svim pacijentima, bez obzira na njihovu socioekonomsku situaciju. Ovo uključuje osiguravanje pristupa novim terapijama i uređajima te poticanje razvoja troškovno učinkovitih rješenja.
4. Informirani pristanak: Pacijenti moraju biti potpuno informirani o rizicima i koristima korištenja biomaterijala u njihovom liječenju te moraju dati svoj pristanak prije primjene.



Informirani pristanak uključuje detaljno objašnjenje svih mogućih nuspojava, postupaka te alternativnih tretmana.

Biomaterijali predstavljaju ključnu komponentu suvremene medicine, pružajući inovativna rješenja za liječenje i poboljšanje kvalitete života pacijenata. Ipak, njihova primjena zahtijeva pažljivu evaluaciju etičkih pitanja kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost za sve korisnike. Kontinuirani napredak u istraživanju i razvoju biomaterijala obećava daljnje unapređenje medicinskih tretmana i bolje ishode za pacijente.

### **3. KLASIFIKACIJA I VRSTE BIOMATERIJALA**

Biomaterijali su ključni elementi moderne medicine, omogućavajući napredak u liječenju i poboljšanju kvalitete života pacijenata. Oni se koriste u raznim medicinskim primjenama, od ortopedskih implantata do dentalnih uređaja i sustava za kontrolirano otpuštanje lijekova.

Mogu se klasificirati u četiri osnovne kategorije: metale, polimere, keramiku i kompozitne materijale. Svaka od ovih kategorija ima jedinstvene karakteristike koje ih čine pogodnima za specifične medicinske primjene.

Metali, poput titanija i njegovih legura, poznati su po svojoj mehaničkoj čvrstoći i otpornosti na koroziju, čime su idealni za ortopedske i dentalne implantate. Polimeri nude fleksibilnost i mogućnost prilagodbe, što ih čini pogodnima za raznovrsne medicinske uređaje i resorptivne šavove. Keramički materijali, zbog svoje biokompatibilnosti i otpornosti na habanje, često se koriste u dentalnim i koštanim aplikacijama. Kompozitni materijali, koji kombiniraju svojstva različitih materijala, omogućavaju stvaranje naprednih medicinskih uređaja s poboljšanim mehaničkim i biološkim karakteristikama.

#### **3.1. Metali**

Metali su među prvim materijalima korištenim kao biomaterijali zbog svoje visoke mehaničke čvrstoće, otpornosti na habanje i koroziju, te dugovječnosti. U medicini se koriste za izradu različitih implantata i medicinskih uređaja koji zahtijevaju izdržljivost i pouzdanost. U prošlosti, metali poput zlata i srebra koristili su se za dentalne aplikacije, dok su suvremene primjene usmjerene na sofisticiranije legure i metale poput titanija, kobalt-krom-molibden (Co-Cr-Mo) slitina i nehrđajućeg čelika. Metali imaju velik broj prednosti koje ih ističu od ostalih vrsta biomaterijala, ali također imaju i niz nedostataka koji se moraju uračunati prilikom odabira odgovarajućeg biomaterijala.

Prednosti metala su:

- Mehanička čvrstoća: Metali su izuzetno čvrsti i otporni na naprezanje, što ih čini pogodnima za implantate koji moraju podnijeti velike sile, poput umjetnih zglobova.

- Otpornost na koroziju: Moderni metali, osobito titanij i njegove legure, vrlo su otporni na koroziju u tjelesnim tekućinama, što osigurava dugovječnost implantata.
- Biokompatibilnost: Metali poput titanija i Co-Cr-Mo slitina pokazuju izvrsnu biokompatibilnost, što znači da ne izazivaju štetne reakcije u tijelu.

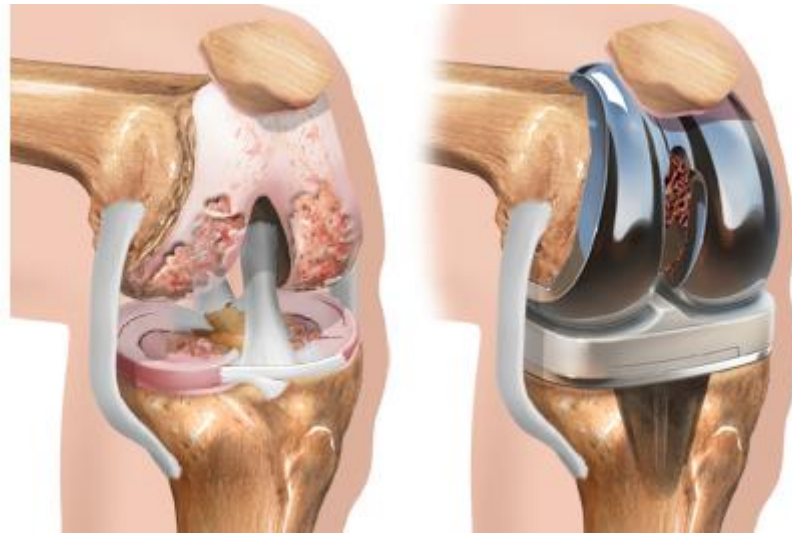
Nedostaci materijala su:

- Težina: Metali su često teži od drugih biomaterijala poput polimera i keramike, što može ograničiti njihovu upotrebu u određenim aplikacijama.
- Moguća korozija: Iako su mnogi metali otporni na koroziju, neki, poput nehrđajućeg čelika, mogu biti podložni koroziji u specifičnim uvjetima.
- Alergijske reakcije: Neki ljudi mogu razviti alergijske reakcije na metale, osobito na nikal koji se nalazi u nekim legurama.

Metali igraju ključnu ulogu kao biomaterijali u modernoj medicini, zahvaljujući svojoj mehaničkoj čvrstoći, otpornosti na koroziju i biokompatibilnosti. Specifične primjene metala uključuju:

### 1. Ortopediju

- Metali su ključni materijali u ortopediji. Koriste se za izradu različitih implantata, uključujući umjetne zglobove, ploče i vijke za frakture, te intramedularne čavle. Titanij i njegove legure su posebno cijenjeni zbog svoje kombinacije čvrstoće, biokompatibilnosti i otpornosti na koroziju. Co-Cr-Mo slitine koriste se za izradu umjetnih zglobova kuka i koljena zbog svoje visoke otpornosti na habanje. Na slici 3.1. prikazan je umjetni metalni zglob prije i poslije postavljanja metalnog implantata.



*Slika 3.1. Umjetni metalni zglob prije i poslije postavljanja metalnog implantata [4]*

## 2. Stomatologiju

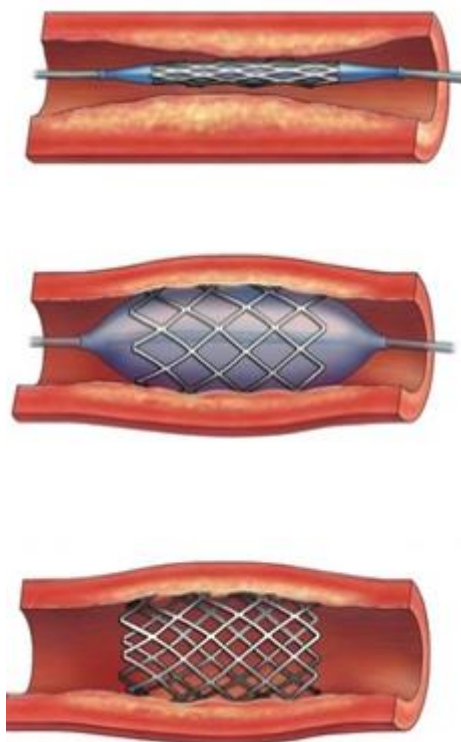
- U stomatologiji, metali se koriste za izradu dentalnih implantata, krunica i mostova. Titanij je najčešći materijal za dentalne implantate zbog svoje biokompatibilnosti i sposobnosti osteointegracije, što znači da se može čvrsto povezati s kostima čeljusti. Osim toga, zlato i njegovi legirani oblici koriste se za izradu dentalnih ispuna zbog svoje inertnosti i dugotrajnosti. Na slici 3.2. prikazan je metalni zubni implantat.



*Slika 3.2. Metalni zubni implantat [5]*

### 3. Izradu kardiovaskularnih uređaja

- Metali se koriste za izradu različitih kardiovaskularnih uređaja, uključujući stentove, srčane zalistke i pacemakerske elektrode. Nehrđajući čelik i nitinol (nikal-titanij) su često korišteni materijali za stentove zbog svoje fleksibilnosti i otpornosti na koroziju. Stentovi se koriste za održavanje prohodnosti arterija kod pacijenata s koronarnom bolešću. Na slici 3.3. prikazan je postupak postavljanja stenta unutar arterije.



*Slika 3.3. Postavljanje stenta unutar arterije [6]*

### 3.2. Polimeri

Polimeri su organski materijali sastavljeni od dugih lanaca molekula, a njihove osobine mogu se prilagoditi promjenom njihove kemijske strukture. Polimeri koji se koriste u medicini uključuju:

- Polietilen (PE): Koristi se za izradu ortopedskih implantata, kao što su acetabularne čašice u zamjeni kuka. PE je poznat po svojoj otpornosti na habanje i dugovječnosti.
- Polilaktična kiselina (PLA) i poliglikolna kiselina (PGA): Biorazgradivi polimeri koji se koriste za izradu resorptivnih šavova, skafolda za tkivno inženjerstvo i sustava za

kontrolirano otpuštanje lijekova. PLA i PGA se postupno razgrađuju u tijelu na netoksične produkte.

- Poliuretani: Fleksibilni polimeri koji se koriste za izradu medicinskih katetera i elastičnih traka. Poliuretani su cijenjeni zbog svoje biokompatibilnosti i otpornosti na trošenje.

Skafold u medicini označava trodimenzionalnu strukturu koja se koristi u tkivnom inženjerstvu za poticanje rasta i regeneracije tkiva. Ovi skafoldi pružaju fizički okvir koji omogućava stanicama da se pridržavaju, proliferiraju i formiraju novo tkivo.

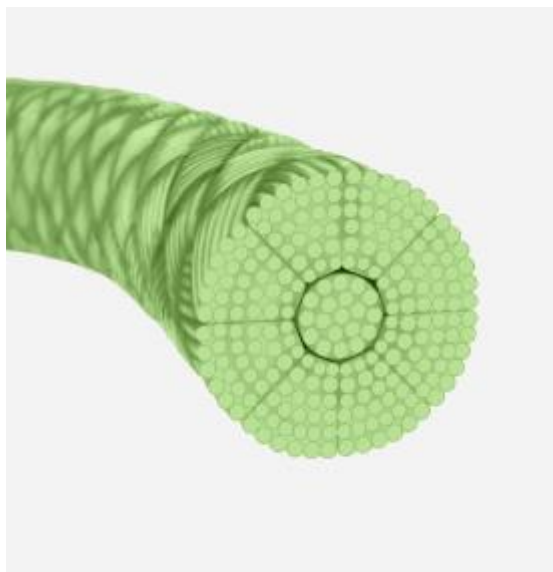
Polimeri koji se koriste u medicini moraju biti biokompatibilni, što znači da ne smiju izazivati imunološke reakcije, upalu ili toksičnost. Biokompatibilnost polimera može se postići modifikacijom njihove površine ili kemijske strukture. Na primjer, površinska obrada polimera može poboljšati njihovu sposobnost interakcije s biološkim tkivom.

Biorazgradivi polimeri imaju sposobnost da se razgrade unutar tijela na netoksične produkte koji se mogu prirodno eliminirati. Ova svojstva čine ih idealnim za privremene aplikacije, kao što su šavovi i skafoldi za tkivno inženjerstvo. Razgradnja polimera kontrolirana je njihovom kemijskom strukturom i uvjetima u tijelu, što omogućava prilagodbu trajanja implantata prema potrebama aplikacije.

Polimeri su izuzetno važni biomaterijali u medicini zbog svoje fleksibilnosti, biorazgradivosti i prilagodljivosti. Njihova primjena obuhvaća širok spektar medicinskih uređaja i sustava, uključujući resorptivne šavove, skafolde za inženjering tkiva, sustave za kontrolirano otpuštanje lijekova i različite vrste proteza. Polimeri omogućavaju stvaranje materijala koji se mogu precizno prilagoditi specifičnim potrebama pacijenata, čime se značajno unapređuje učinkovitost i sigurnost medicinskih tretmana. Neke od značajnijih medicinskih primjena polimera su:

- Šavovi i kirurški konci: Biorazgradivi polimeri poput PLA i PGA koriste se za izradu resorptivnih šavova koji se postupno razgrađuju unutar tijela, eliminirajući potrebu za

njihovim uklanjanjem. Ovi šavovi omogućuju zacjeljivanje rana bez potrebe za dodatnim kirurškim zahvatom. Na slici 3.4. prikazan je resorptivni konac za šivanje.



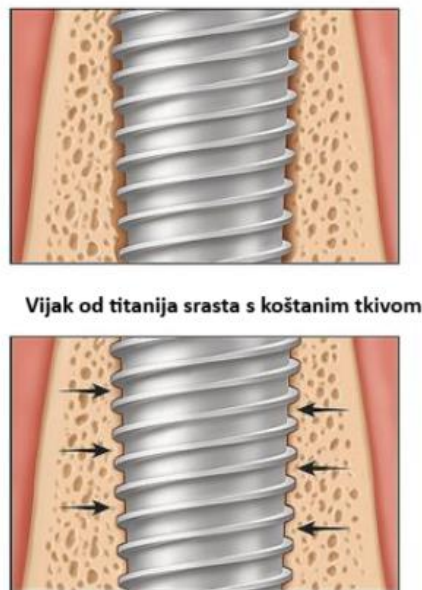
*Slika 3.4. Resorptivni konac za šivanje [7]*

- Skafoldi za tkivno inženjerstvo: Polimeri se koriste za izradu skafolda koji podržavaju rast novih stanica i tkiva. Ovi skafoldi se postupno razgrađuju, omogućujući prirodnom tkivu da zauzme njihovo mjesto. Skafoldi od biorazgradivih polimera koriste se za regeneraciju kože, hrskavice i drugih tkiva.
- Sustavi za kontrolirano otpuštanje lijekova: Polimeri se koriste za izradu mikročestica i hidrogelova koji omogućavaju postupno otpuštanje lijekova tijekom vremena, poboljšavajući učinkovitost terapije i smanjujući nuspojave. Ovi sustavi omogućuju precizno doziranje i smanjenje učestalosti primjene lijekova.

### **3.3. Keramika**

Keramički biomaterijali su anorganski, ne-metalni materijali koji su poznati po svojoj tvrdoći, otpornosti na habanje i biokompatibilnosti. Keramike koje se koriste u medicinskim aplikacijama uključuju:

- Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): Koristi se za izradu dentalnih implantata i ortopedskih kugličnih zglobova zbog svoje iznimne tvrdoće i otpornosti na habanje. Aluminijev oksid je također biokompatibilan i kemijski inertan.
- Kalcijev fosfat (hidroksiapatit,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ): Koristi se za izradu koštanih zamjena i premaza za metalne implantate zbog svoje sposobnosti da se veže s kostima. Hidroksiapatit je glavni mineralni sastojak kosti, što ga čini idealnim za osteointegraciju (proces srastanja implantata sa okolnom kosti). Na slici 3.5. prikazana je osteointegracija.



*Slika 3.5. Osteointegracija [8]*

Keramika kao biomaterijal ima ključnu ulogu u modernoj medicini zahvaljujući svojoj izvanrednoj biokompatibilnosti, otpornosti na habanje i kemijskoj stabilnosti. Njihove primjene uključuju dentalne implantate, gdje se koriste zbog svoje estetske sličnosti s prirodnim zubima, te ortopedske aplikacije, gdje keramike poput aluminijevog oksida i kalcijevog fosfata doprinose dugotrajnosti i funkcionalnosti koštanih implantata. Također, keramički materijali nalaze primjenu u kardiovaskularnim uređajima i sustavima za isporuku lijekova, čime značajno poboljšavaju medicinske tretmane i kvalitetu života pacijenata. Primjene keramike u medicini uključuju:

- Dentalne implantate: Keramika se koristi za izradu dentalnih implantata zbog svoje biokompatibilnosti, estetike i otpornosti na habanje. Aluminijev oksid se koristi za izradu keramičkih krunica i mostova, pružajući dugotrajne i estetski prihvatljive rješenja.



- Ortopedske implantate: Keramički materijali poput hidroksiapatita koriste se za izradu koštanih zamjena i premaza za metalne implantate. Hidroksiapatit može potaknuti rast kosti i osigurati čvrstu vezu između implantata i kosti, čime se poboljšava stabilnost i dugotrajnost implantata.
- Biokompatibilnost: Keramike su vrlo biokompatibilne, što znači da ne izazivaju imunološke reakcije ili upalu. To ih čini idealnim za dugotrajne implantate koji su u kontaktu s biološkim tkivom. Njihova inertnost također smanjuje rizik od infekcije.

Keramike imaju velik broj prednosti koje ih ističu od ostalih vrsta biomaterijala, ali također imaju i niz nedostataka koji se moraju uračunati prilikom odabira odgovarajućeg biomaterijala.

Prednosti keramike kao biomaterijala su:

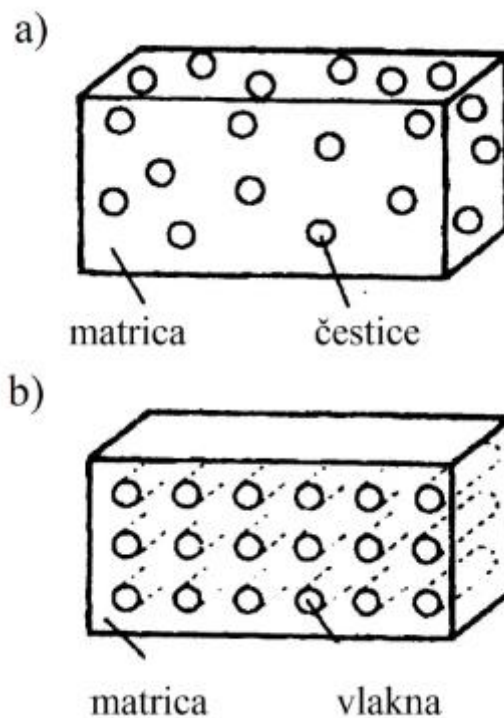
- Otpornost na habanje: Keramike su vrlo otporne na habanje, što ih čini idealnim za zglobne površine i dentalne primjene.
- Estetika: Keramike poput cirkonijevog oksida koriste se za izradu estetskih dentalnih implantata i krunica zbog svoje sličnosti s prirodnim zubima.
- Biokompatibilnost: Keramike su izuzetno biokompatibilne, što ih čini sigurnima za dugotrajnu upotrebu u tijelu.

Nedostaci keramike kao biomaterijala su:

- Krhkost: Keramike su sklone pucanju i lomu zbog svoje krhkosti, što može ograničiti njihovu upotrebu u aplikacijama koje zahtijevaju visoku otpornost na udarce.
- Teškoća obrade: Keramike su teško obradive, što može povećati troškove proizvodnje i komplicirati kirurške zahvate.

### 3.4. Kompozitni materijali

Kompozitni materijali su kombinacije dvaju ili više različitih materijala, dizajnirani kako bi se iskoristile najbolje osobine svakog pojedinačnog materijala. Kompoziti obično sadrže matricu (bazni materijal) i ojačala (poput vlakana ili čestica) kao što je prikazano na slici 3.6. Najčešće korišteni kompoziti u medicini uključuju kombinacije polimera, keramike i metala.



*Slika 3.6. a) Kompozitni materijal ojačan česticama, b) Kompozitni materijal ojačan vlaknima [9]*

Kombinacija materijala omogućava stvaranje kompozita s poboljšanim mehaničkim svojstvima, uključujući veću čvrstoću, fleksibilnost i otpornost na habanje. Na primjer, kompoziti na bazi ugljičnih vlakana imaju visoku čvrstoću i nisku težinu, što ih čini pogodnima za ortopedske implantate.

Kompozitni materijali često su lakši od tradicionalnih metalnih implantata, što može smanjiti opterećenje na tijelo i poboljšati udobnost pacijenta.

Kompoziti se mogu dizajnirati tako da zadovolje specifične potrebe aplikacije, prilagođavajući sastav i raspored komponenti kako bi se postigle željene karakteristike. To omogućava stvaranje implantata s optimalnom kombinacijom čvrstoće, fleksibilnosti i biokompatibilnosti. Neke od primjena kompozita u medicini su:

- Dentalni kompoziti- Kompozitni materijali se koriste za izradu dentalnih ispuna i krunica. Dentalni kompoziti obično sadrže smolu kao matricu i anorganske čestice kao ojačalo, pružajući estetski ugodne i dugotrajne ispune.
- Ortopedske proteze- Kompozitni materijali se koriste za izradu ortopedskih proteza, uključujući proteze koljena i kuka. Kompoziti na bazi ugljičnih vlakana i polimera omogućavaju izradu laganih i izdržljivih proteza koje pružaju visoku funkcionalnost i udobnost.
- Regeneracija tkiva- Kompoziti se koriste za izradu skafolda za inženjering tkiva, kombinirajući polimere i biokeramike kako bi se stvorili materijali koji potiču rast novih stanica i regeneraciju tkiva.

## **4. KARAKTERISTIKE I ZAHTIJEVI BIOMATERIJALA ZA MEDICINSKU PRIMJENU**

### **4.1. Biokompatibilnost**

Biokompatibilnost materijala odnosi se na sposobnost materijala da obavlja svoju funkciju unutar živog organizma bez izazivanja štetnih reakcija, poput upale, imunološkog odgovora ili toksičnosti. Biokompatibilni materijali moraju biti kemijski inertni u biološkom okruženju, tj. ne smiju reagirati s tjelesnim tekućinama i tkivima na način koji bi izazvao štetne posljedice. Osim toga, biokompatibilnost podrazumijeva da materijal može poticati pozitivne biološke reakcije, kao što je stvaranje nove kosti oko koštanog implantata ili integracija s okolnim tkivom.

Ključni aspekti biokompatibilnosti uključuju:

1. Kemijsku stabilnost: Materijal ne smije otpuštati toksične tvari ili proizvode degradacije.
2. Mehaničku kompatibilnost: Materijal mora imati odgovarajuća mehanička svojstva koja odgovaraju tkivu koje zamjenjuje ili s kojim dolazi u kontakt.
3. Imunološku kompatibilnost: Materijal ne smije izazivati imunološki odgovor koji bi doveo do odbacivanja ili kronične upale.
4. Funkcionalnu integraciju: Materijal mora omogućiti funkcionalnu integraciju s okolnim tkivom, potičući iscjeljenje i regeneraciju bez komplikacija.

Biokompatibilnost se procjenjuje kroz niz laboratorijskih i kliničkih ispitivanja kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost biomaterijala prije njihove upotrebe u medicinskoj primjeni.

## 4.2. Mehaničke karakteristike biomaterijala

Također biomaterijali moraju imati mehaničke karakteristike koje odgovaraju funkciji koju će obavljati u tijelu. Na primjer, ortopedski implantati poput umjetnih zglobova moraju biti dovoljno čvrsti da izdrže sile koje djeluju na zglob tijekom kretanja, ali i dovoljno elastični da apsorbiraju udarce i prenesu opterećenje na okolne kosti. To uključuje čvrstoću, elastičnost, tvrdoću i otpornost na umor i habanje:

- Čvrstoća
  - Čvrstoća materijala odnosi se na njegovu sposobnost da izdrži sile bez lomljenja ili deformiranja. Ovo je posebno važno za materijale koji se koriste u ortopedskim implantatima, poput umjetnih zglobova i pločica za fiksaciju kostiju. Na primjer, titanij i njegove legure često se koriste u ovim primjenama zbog svoje visoke čvrstoće i otpornosti na lomljenje. Čvrstoća materijala mora odgovarati opterećenjima kojima će biti izloženi tijekom svakodnevnih aktivnosti pacijenta.
- Elastičnost
  - Elastičnost je sposobnost materijala da se vrati u svoj izvorni oblik nakon deformacije pod opterećenjem. Ova karakteristika je važna za implantate koji trebaju apsorbirati i prenositi sile bez trajne deformacije. U ortopediji, materijali poput kobalt-krom legura koriste se za komponente zglobova zbog njihove elastičnosti koja omogućava prijenos opterećenja na okolne kosti i zglobne površine. Elastičnost također igra ključnu ulogu u stomatologiji, gdje materijali moraju izdržati sile žvakanja i vratiti se u svoj izvorni oblik.
- Tvrdoća
  - Tvrdoća materijala odnosi se na njegovu otpornost na deformaciju pod površinskim pritiskom. Ova karakteristika je posebno važna za materijale koji su izloženi abraziji i habanju, poput dentalnih implantata i proteza. Keramike, kao što je aluminijev oksid, koriste se u dentalnim primjenama zbog svoje visoke tvrdoće i otpornosti na habanje, čime osiguravaju dugotrajnost i funkcionalnost implantata.
- Otpornost na umor

- Otpornost na umor je sposobnost materijala da izdrži ponovljena opterećenja tijekom dugog vremenskog razdoblja bez puknuća. Ovo je kritično za implantate koji su podložni cikličkim opterećenjima, kao što su umjetni zglobovi i srčani zalisci. Na primjer, kobalt-krom legure i titanij imaju visoku otpornost na umor, što ih čini pogodnima za primjene gdje su dugotrajna opterećenja neizbježna. Otpornost na umor osigurava da implantati mogu izdržati milijune ciklusa opterećenja bez gubitka funkcionalnosti.

- Otpornost na habanje

- Otpornost na habanje odnosi se na sposobnost materijala da izdrži trošenje uzrokovano trenjem. Materijali koji se koriste u zglobnim površinama, poput onih u umjetnim kukovima i koljenima, moraju imati visoku otpornost na habanje kako bi osigurali dugotrajnu funkcionalnost i smanjili rizik od otpuštanja čestica koje mogu izazvati upalu. Keramike i specijalno obrađeni metali često se koriste u ovim primjenama zbog svoje sposobnosti da izdrže habanje i osiguraju glatke površine za kretanje.

### **4.3. Površinske karakteristike biomaterijala**

Površinske karakteristike biomaterijala igraju ključnu ulogu u njihovoj funkcionalnosti i učinkovitosti u medicinskim primjenama. Površina biomaterijala može značajno utjecati na način na koji materijal komunicira s biološkim sustavima, uključujući adheziju stanica (proces kojim se stanice međusobno vežu ili vežu za podlogu putem specifičnih molekularnih interakcija), stvaranje biofilma i interakciju s proteinima. Ove karakteristike su od presudne važnosti za uspješnu integraciju biomaterijala u tijelo i njihovu dugoročnu funkcionalnost.

- Hrapavost

- Hrapavost površine biomaterijala odnosi se na mikroskopske nepravilnosti na površini materijala koje mogu utjecati na adheziju stanica i proces osteointegracije. Površina s odgovarajućom hrapavošću može potaknuti bolju adheziju stanica i njihovu proliferaciju, što je ključno za uspjeh implantata. Na primjer, površine ortopedskih implantata često se obrađuju kako bi se postigla određena hrapavost koja poboljšava integraciju s kostima. Metode za postizanje hrapavosti uključuju pjeskarenje i elektro-eroziju. U stomatologiji,

zubni implantati često imaju hrapave površine kako bi se poboljšala njihova stabilnost u čeljusnoj kosti.

- **Kemijska struktura**

- Kemijska struktura površine biomaterijala utječe na njihovu biokompatibilnost i interakciju s biološkim molekulama. Površinski slojevi biomaterijala mogu biti modificirani kako bi se poboljšala njihova sposobnost da se povežu s biološkim tkivima ili da se spriječi nepoželjna reakcija. Na primjer, implantati od titanija često su premazani s titanij dioksidom ( $\text{TiO}_2$ ) kako bi se poboljšala njihova biokompatibilnost i stimulirala osteointegracija. U slučaju polimernih biomaterijala, površinska kemijska modifikacija može uključivati grafting ili plazma tretmane kako bi se poboljšala adhezija stanica ili kontrolirala brzina otpuštanja lijekova.

- **Energija površine**

- Energija površine materijala odnosi se na sposobnost površine da stupa u interakciju s okolnim medijem. Visoka energija površine obično poboljšava adheziju stanica i upijanje biofluida, dok niska energija površine može smanjiti adheziju i interakciju s biološkim materijalima. U kontekstu biomaterijala, energija površine može biti modificirana kako bi se prilagodila specifičnim zahtjevima primjene. Na primjer, u tkivnom inženjeringu, površinska energija može biti prilagođena kako bi se potaknula proliferacija i diferencijacija stanica na skafoldu. Modifikacije površinske energije mogu se postići različitim metodama, uključujući plazma tretmane, kemijske premazivanja i elektroforetske metode.

- **Adhezija stanica**

- Adhezija stanica na površinu biomaterijala je ključna za integraciju materijala s biološkim tkivima i dugoročnu funkcionalnost implantata. Površinske karakteristike poput hrapavosti, kemijske strukture i energije površine igraju značajnu ulogu u ovom procesu. Površine biomaterijala koje potiču adheziju stanica mogu poboljšati zacjeljivanje rana,

stimulirati regeneraciju tkiva i osigurati bolju stabilnost implantata. U slučaju ortopedskih implantata, na primjer, poboljšana adhezija stanica može ubrzati proces osteointegracije i smanjiti rizik od implantacijskih komplikacija.

- Stvaranje biofilma

- Biofilm je sloj mikroorganizama koji se može formirati na površini biomaterijala i može uzrokovati infekcije i druge komplikacije. Površinske karakteristike materijala mogu značajno utjecati na sklonost formiranju biofilma. Materijali s glatkim površinama i niskom energijom površine mogu smanjiti adheziju mikroorganizama, dok hrapave i kemijski reaktivne površine mogu povećati rizik od biofilma. U slučaju medicinskih uređaja kao što su kateteri i implantati, upravljanje formiranjem biofilma je ključno za smanjenje rizika od infekcija i osiguranje dugotrajne sigurnosti.

- Površinski tretmani

- Površinski tretmani biomaterijala često se koriste za prilagodbu njihovih karakteristika i poboljšanje njihovih performansi. Metode kao što su pjeskarenje, elektro-erozija, plazma tretmani i nano-oblaganje mogu se koristiti za postizanje željenih površinskih svojstava. Na primjer, površinske obloge poput hidroksiapatita mogu se koristiti za poboljšanje osteointegracije ortopedskih implantata, dok površinske modifikacije polimera mogu poboljšati kontrolirano otpuštanje lijekova.

Površinske karakteristike biomaterijala igraju ključnu ulogu u njihovoj funkcionalnosti i uspjehu u medicinskim primjenama. Hrapavost, kemijska struktura, energija površine i sposobnost interakcije s biološkim sustavima utječu na adheziju stanica, stvaranje biofilma i opću biokompatibilnost materijala. Prilagodba ovih karakteristika putem površinskih tretmana omogućava optimizaciju biomaterijala za specifične medicinske primjene, čime se poboljšava njihova učinkovitost i sigurnost.



#### 4.4. Biorazgradivost biomaterijala

Biorazgradivost je ključna karakteristika biomaterijala koji su dizajnirani da se nakon obavljanja svoje funkcije razgrade i apsorbiraju u tijelu. Ovi materijali omogućuju medicinskim uređajima i implantatima da pruže potrebnu podršku ili terapiju tijekom određenog vremenskog perioda, a zatim se prirodno razgrade, čime se eliminira potreba za kirurškim uklanjanjem.

- Važnost biorazgradivosti
  - Smanjenje rizika od komplikacija: Nakon što materijal obavi svoju funkciju, razgrađuje se i apsorbira u tijelu, čime se smanjuje rizik od dugotrajnih komplikacija ili infekcija.
  - Eliminacija potrebe za dodatnim operacijama: Biorazgradivi materijali eliminiraju potrebu za kirurškim uklanjanjem, što smanjuje troškove i stres za pacijenta.
  - Kontrolirano otpuštanje lijekova: Biorazgradivi materijali mogu se koristiti za sustave koji omogućuju kontrolirano otpuštanje lijekova tijekom vremena, čime se poboljšava terapijska učinkovitost.
- Primjene biorazgradivih materijala
  - Šavovi: Biorazgradivi šavovi izrađeni od materijala kao što su poliglikolna kiselina (PGA) i polilaktična kiselina (PLA) razgrađuju se nakon što rana zacijeli, eliminirajući potrebu za njihovim uklanjanjem. Na slici 4.1. prikazan je biorazgradivi šav.



*Slika 4.1. Biorazgradivi šavovi [10]*

- Stentovi: Biorazgradivi stentovi pružaju privremenu podršku krvnim žilama ili drugim strukturama u tijelu, a zatim se razgrađuju, čime se smanjuje rizik od dugoročnih komplikacija poput restenoziranja (proces ponovnog sužavanja ili preuskočenja arterije nakon što je prvotno proširena ili otpuštena kroz medicinski postupak).

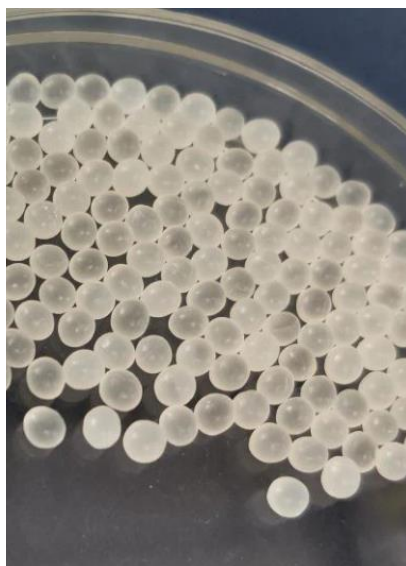
- Skafoldi za tkivno inženjerstvo: Skafoldi izrađeni od biorazgradivih polimera služe kao privremena potpora za rast novih tkiva. Kako se skafold razgrađuje, novo tkivo preuzima njegovu funkciju.

- Sustavi za kontrolirano otpuštanje lijekova: Biorazgradivi polimeri omogućuju kontrolirano otpuštanje lijekova tijekom vremena, osiguravajući konstantnu terapijsku razinu i smanjujući potrebu za čestim dozama.

- Najvažniji biorazgradivi materijali

- Polimeri su najčešće korišteni biorazgradivi materijali zbog svojih prilagodljivih svojstava i sposobnosti razgradnje u netoksične komponente:

- Polilaktična kiselina (PLA): PLA je popularan biorazgradivi polimer koji se razgrađuje hidrolizom u mliječnu kiselinu, koja se prirodno metabolizira u tijelu. PLA se često koristi u šavovima, skafoldima za tkivno inženjerstvo i sustavima za kontrolirano otpuštanje lijekova. Na slici 4.2. prikazana je polilaktična kiselina.



*Slika 4.2. Poliaktična kiselina (PLA) [11]*

- Poliglikolna kiselina (PGA): PGA je visoko hidrofilan polimer koji se brzo razgrađuje u tijelu u glikolnu kiselinu. Koristi se u šavovima i skafoldima zbog svoje visoke čvrstoće i brzine razgradnje.

- Polikaprolakton (PCL): PCL je polimer s sporijom stopom razgradnje, što ga čini pogodnim za aplikacije koje zahtijevaju dužu vremensku podršku, kao što su određeni sustavi za kontrolirano otpuštanje lijekova i skafoldi za dugotrajnu regeneraciju tkiva.

- **Mehanizmi razgradnje**

Biorazgradivi materijali razgrađuju se u tijelu putem različitih mehanizama, uključujući hidrolizu, enzimsku razgradnju i kombinaciju oba procesa:

- Hidroliza: Mnogi biorazgradivi polimeri razgrađuju se hidrolizom, pri čemu se kemijske veze unutar polimera prekidaju vodom. Brzina razgradnje ovisi o kemijskoj strukturi polimera, prisutnosti katalizatora i uvjetima u tijelu.

- Enzimska razgradnja: Neki materijali razgrađuju se djelovanjem specifičnih enzima prisutnih u tijelu. Na primjer, kolagen i hitosan razgrađuju se putem enzima koji su specifični za njihove strukture.

- Kombinirana razgradnja: U mnogim slučajevima, razgradnja biorazgradivih materijala uključuje kombinaciju hidrolitičkih i enzimskih procesa, što omogućuje precizno podešavanje brzine razgradnje prema specifičnim zahtjevima aplikacije.

- Izazovi i buduće perspektive

- Kontrola brzine razgradnje: Postizanje precizne kontrole nad brzinom razgradnje može biti izazovno, posebno kada su potrebni dugotrajni sustavi za kontrolirano otpuštanje lijekova ili dugotrajni skafoldi za tkivno inženjerstvo.

- Biokompatibilnost proizvoda razgradnje: Važno je osigurati da proizvodi razgradnje biomaterijala budu biokompatibilni i da ne izazivaju štetne reakcije u tijelu.

- Individualna varijabilnost: Razgradnja biomaterijala može varirati ovisno o individualnim karakteristikama pacijenata, kao što su razine specifičnih enzima i pH vrijednosti.

#### **4.5. Kemijska stabilnost**

Kemijska stabilnost biomaterijala je ključna za osiguranje njihove dugotrajne funkcionalnosti i sigurnosti u tijelu. Biomaterijali moraju biti otporni na kemijske promjene i koroziju kako bi se spriječile neželjene reakcije koje bi mogle dovesti do upala, toksičnosti ili neuspjeha implantata. Na primjer, metali koji se koriste za implantate, poput titanija i njegovih legura, često imaju pasivne površinske slojeve oksida koji sprječavaju koroziju i osiguravaju dugotrajnu stabilnost. Ovi slojevi ne samo da štite materijal od kemijskih promjena, već također smanjuju rizik od otpuštanja metalnih iona u tijelo, što bi moglo izazvati imunološke reakcije ili toksičnost.

Osim metala, polimeri i keramika također moraju pokazati visoku kemijsku stabilnost kako bi održali svoju funkcionalnost tijekom vremena. Na primjer, polimeri moraju biti otporni na hidrolizu i druge kemijske reakcije koje bi mogle narušiti njihovu strukturu, dok keramika mora zadržati svoje kemijske karakteristike kako bi osigurala biokompatibilnost i otpornost na habanje.

Osiguravanje kemijske stabilnosti biomaterijala kroz odgovarajuće tretmane i obrade površine ključno je za njihovu uspješnu primjenu u medicinskim uređajima i implantatima, čime se poboljšava kvaliteta života pacijenata i smanjuju rizici od komplikacija.

#### 4.6. Mogućnost sterilizacije

Biomaterijali moraju biti sposobni izdržati procese sterilizacije bez gubitka svojih svojstava kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost medicinskih uređaja i implantata. Sterilizacija je ključna za uklanjanje mikroorganizama, uključujući bakterije, viruse i gljivice, te za sprječavanje infekcija koje bi mogle nastati nakon kirurških zahvata ili implantacije medicinskih uređaja. Različite metode sterilizacije koriste se ovisno o tipu biomaterijala i specifičnim zahtjevima primjene.

Metode sterilizacije uključuju:

- Autoklaviranje: Proces u kojem se koristi visoka temperatura i tlak pare za uništavanje mikroorganizama. Autoklaviranje je učinkovito za metale i određene polimere, ali može biti štetno za materijale osjetljive na visoke temperature. Na slici 4.3. prikazan je uređaj za autoklaviranje.



*Slika 4.3. Uređaj za autoklaviranje [12]*

- Sterilizaciju etilen-oksikom: Provodi se na nižim temperaturama i pogodna je za materijale koji ne mogu izdržati visoku temperaturu autoklavliranja. Etilen oksid je učinkovit protiv širokog spektra mikroorganizama, ali može zahtijevati dugotrajan proces ventilacije za uklanjanje ostataka plina.

- Zračenje: Koristi se gama zračenje ili elektronski snopovi za sterilizaciju materijala. Ova metoda je brza i učinkovita, ali može utjecati na mehaničke i kemijske karakteristike nekih polimera.

Materijali poput titanija, poznat po svojoj otpornosti i stabilnosti, mogu izdržati autoklaviranje bez promjene svojih ključnih karakteristika, što ga čini idealnim za ortopedske i dentalne implantate. Određeni polimeri, poput polietilena i polipropilena, također mogu podnijeti sterilizaciju zračenjem ili etilen oksidom, čime se osigurava njihova primjena u različitim medicinskim uređajima, uključujući šavove, katetere i skafolde za tkivno inženjerstvo.

Osiguravanje sterilizabilnosti biomaterijala kroz pažljiv odabir materijala i metoda sterilizacije ključ je za njihovu uspješnu primjenu u medicinskoj praksi. To ne samo da jamči sigurnost pacijenata, već također produžuje vijek trajanja medicinskih uređaja i implantata, poboljšavajući tako ukupnu kvalitetu zdravstvene skrbi.

#### **4.7. Prilagodljivost biomaterijala**

Prilagodljivost biomaterijala na različite oblike i veličine ključna je prilikom izrade medicinskih uređaja i implantata. Mogućnost oblikovanja materijala prema specifičnim anatomskim potrebama pacijenata omogućava personaliziranu medicinu, koja se sve više prepoznaje kao standard u modernom zdravstvu. Ova prilagodljivost osigurava bolje prijanjanje, funkcionalnost i estetski izgled implantata, čime se značajno povećava udobnost i zadovoljstvo pacijenata.

Polimeri su posebno cijenjeni zbog svoje iznimne sposobnosti oblikovanja u različite strukture. Na primjer, polimeri poput polietilena, poliuretana i polilaktične kiseline mogu se lako obraditi i prilagoditi za izradu specifičnih medicinskih uređaja kao što su šavovi, kateteri, proteze i skafoldi za tkivno inženjerstvo. Ovi materijali mogu biti oblikovani kroz različite tehnike kao što su injekcijsko prešanje, ekstrudiranje, 3D printanje i termooblikovanje.

Tehnologije poput 3D printanja dodatno su unaprijedile mogućnosti prilagodbe biomaterijala. Korištenjem 3D printanja, medicinski stručnjaci mogu izraditi precizne modele implantata na

temelju digitalnih slika dobivenih putem CT-a ili MRI-a, što omogućava stvaranje implantata koji savršeno odgovaraju anatomiji pojedinog pacijenta. Ova tehnika je posebno korisna u složenim slučajevima rekonstruktivne kirurgije i ortopedije, gdje su potrebna individualna rješenja.

Osim polimera, i drugi biomaterijali poput metala i keramike mogu biti prilagodljivi. Na primjer, implantati od titanija se mogu precizno oblikovati pomoću CNC (računalno numeričko upravljanje) strojeva, dok se keramički materijali mogu oblikovati pomoću tehnika sinteriranja i obrade pod visokim tlakom.

Prilagodljivost biomaterijala omogućava izradu prilagođenih rješenja koja ne samo da poboljšavaju funkcionalnost i estetiku medicinskih uređaja, već i smanjuju rizik od komplikacija poput infekcija i odbacivanja implantata. Ova sposobnost prilagodbe biomaterijala prema specifičnim potrebama pacijenata igra ključnu ulogu u postizanju uspješnih kliničkih ishoda i podizanju standarda zdravstvene skrbi na novu razinu.

## 5. BIOMATERIJALI U SPECIFIČNIM MEDICINSKIM PRIMJENAMA

Biomaterijali su ključni za napredak u medicini, omogućujući razvoj sofisticiranih uređaja, terapija i tehnika za liječenje, rehabilitaciju i dijagnostiku. Ova široka primjena biomaterijala obuhvaća različite medicinske specijalnosti, uključujući kardiovaskularnu medicinu, ortopediju, regenerativnu medicinu, stomatologiju i dijagnostičke uređaje.

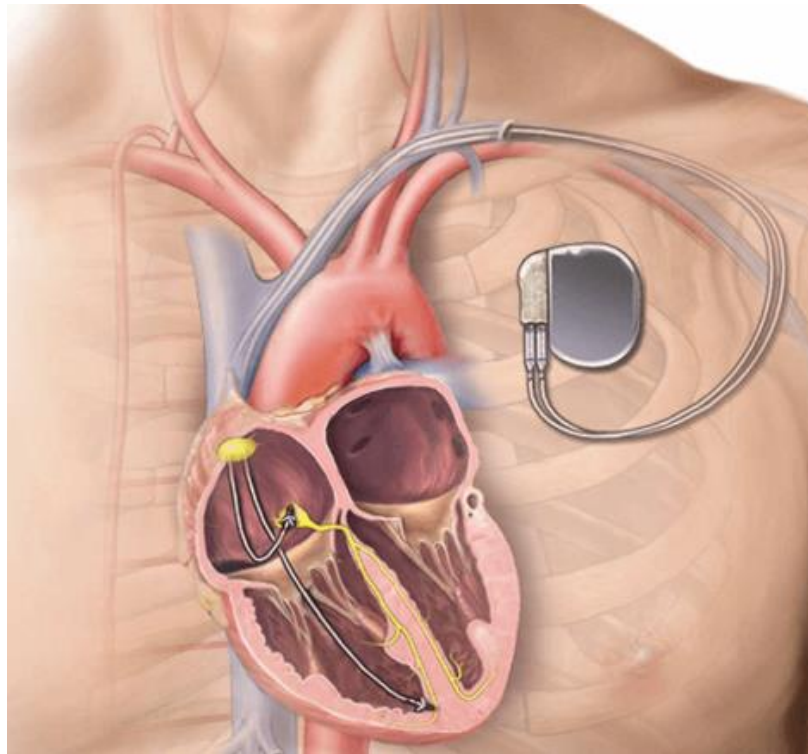
### 5.1. Kardiovaskularni uređaji

#### 5.1.1 Stentovi, pacemakeri i umjetne srčane valvule

Biomaterijali igraju ključnu ulogu u razvoju kardiovaskularnih uređaja kao što su stentovi, pacemakeri i umjetne srčane valvule. Svaki od ovih uređaja zahtijeva specifična svojstva biomaterijala kako bi bio funkcionalan i dugotrajan.

- **Stentovi:** Stentovi su male cjevaste mrežaste strukture koja se umetne u sužene arterije kako bi se održala njihova prohodnost. Materijali poput legura kobalta i kroma (Co-Cr) te nehrđajući čelik koriste se zbog svoje čvrstoće, fleksibilnosti i otpornosti na koroziju. Biorazgradivi stentovi, izrađeni od polimernih materijala poput polilaktične kiseline (PLA), nude prednosti u smanjenju dugoročnih komplikacija jer se postupno razgrađuju i apsorbiraju u tijelu.
- **Pacemakeri:** Pacemakeri koriste elektroničke komponente za regulaciju srčanog ritma. Kućišta pacemakera često su izrađena od biokompatibilnih metala poput titanija, koji pružaju dugotrajnu zaštitu od korozije i smanjuju rizik od imunoloških reakcija. Interni dijelovi, uključujući elektroide, često koriste materijale kao što su platina i iridij, koji su poznati po svojoj dugovječnosti i otpornosti na električni otpor. Na slici 5.1. prikazana je ugradnja pacemakera.





*Slika 5.1. Ugradnja pacemakera [13]*

- Umjetne srčane valvule: Umjetne srčane valvule mogu biti izrađene od biokompatibilnih polimera, metala ili kombinacije materijala. Valvule od poliuretana ili ePTFE-a (ekspandirani politetrafluoretilen) pružaju fleksibilnost i dugotrajnu funkcionalnost. Biokompatibilnost ovih materijala je kritična za smanjenje rizika od tromboze i drugih komplikacija.

#### 5.1.2. Inovacije i napredak

Inovacije u kardiovaskularnim uređajima uključuju razvoj novih materijala i tehnologija. Na primjer, napredni bioaktivni premazi na stentovima mogu smanjiti rizik od reokluzije i poboljšati dugoročne rezultate. Razvoj bežičnih pacemakera i naprednih sustava za praćenje srčanog ritma omogućuju pacijentima veći komfor i smanjenje potrebe za invazivnim procedurama. Također, razvoj umjetnih srčanih valvula s poboljšanim biokompatibilnim materijalima i tehnologijama omogućuje bolju prilagodbu i funkcionalnost.

### 5.1.3. Biokompatibilnost i dugotrajnost kardiovaskularnih uređaja

Biokompatibilnost je ključna za uspjeh kardiovaskularnih uređaja, jer neodgovarajući materijali mogu uzrokovati imunološke reakcije ili dugoročne komplikacije. Testiranja biokompatibilnosti uključuju in vitro i in vivo studije kako bi se osigurala sigurnost materijala. Dugotrajnost je također bitna, jer uređaji moraju izdržati fizičke i kemijske uvjete u tijelu kroz dugi period bez gubitka funkcionalnosti ili izazivanja komplikacija.

## 5.2. Ortopedija

Ortopedija, grana medicine koja se bavi liječenjem i rehabilitacijom bolesti i ozljeda mišićno-koštanog sustava, značajno ovisi o napretku biomaterijala za razvoj i primjenu različitih implantata i uređaja. Biomaterijali u ortopediji služe za zamjenu, podršku ili obnovu oštećenih kostiju i zglobova, čime poboljšavaju funkciju i kvalitetu života pacijenata.

### 5.2.1. Vrste biomaterijala u ortopediji

Metali su odavno osnovni materijal za ortopedске implantate zbog svoje izuzetne čvrstoće, otpornosti na koroziju i dugovječnosti. Najčešće korišteni metali u ortopediji uključuju titanij, nehrđajući čelik i kobalt-krom legure.

- Titanij: Titanij i njegove legure (npr. Ti-6Al-4V) su široko korišteni zbog njihove visoke čvrstoće i odlične biokompatibilnosti. Implantati od titanija imaju dobru otpornost na koroziju i nisku gustoću, što ih čini idealnim za endoproteze zgloba, spinalne implantate i osteosintezu. Titanij također potiče osteointegraciju, proces kojim se kosti rastu u kontaktu s površinom implantata, čime se osigurava stabilnost i dugotrajnost.
- Nehrđajući čelik: Nehrđajući čelik, poput legure 316L, koristi se zbog svoje čvrstoće i otpornosti na koroziju. Iako je manje biokompatibilan od titanija, nehrđajući čelik je ekonomski pristupačniji i koristi se za privremene implantate i u situacijama kada su dugoročne posljedice manje kritične.

- Kobalt-krom legure: Ove legure pružaju izuzetnu čvrstoću i otpornost na trošenje, što ih čini pogodnim za zglobne implantate i dijelove ortopedskih uređaja koji su podložni velikim opterećenjima.

Keramički biomaterijali su cijenjeni zbog svoje visoke tvrdoće i otpornosti na habanje. U ortopediji se često koriste za zglobne površine i druge aplikacije gdje je potrebna izuzetna otpornost na trošenje i kemijsku stabilnost.

- Aluminijski oksid ( $Al_2O_3$ ): Ovaj materijal nudi izuzetnu tvrdoću i otpornost na habanje. U kombinaciji s polietilenom, koristi se za stvaranje zglobnih površina u totalnoj artroplastici koljena i kuka. Aluminijski oksid ima visoku otpornost na trošenje i dugotrajnu funkcionalnost.
- Cirkonij: Cirkonij je poznat po svojoj visokoj čvrstoći i estetici, zbog čega se koristi za zubne i ortopedске implantate. Cirkonij je posebno koristan u aplikacijama gdje je potrebna dobra otpornost na naprezanja i dugotrajan kontakt s koštanim tkivom.

Polimeri se koriste zbog svoje fleksibilnosti i mogućnosti prilagodbe različitim funkcijama i uvjetima. Polimeri se često koriste u kombinaciji s drugim materijalima za poboljšanje performansi implantata.

- Ultra-visoko molekularni polietilen (UHMWPE): UHMWPE je najčešće korišteni materijal za zglobne ležajeve u totalnim artroplastikama zbog svoje izuzetne otpornosti na trošenje i niskog koeficijenta trenja. Ovaj materijal je otporniji na degradaciju u kontaktu s kostima i omogućava dugotrajnu funkcionalnost zglobnih implantata.
- Polilaktična kiselina (PLA) i poliglikolna kiselina (PGA): Ovi biorazgradivi polimeri koriste se za skafolde i koštane graftove u regenerativnoj ortopediji. Oni se postupno razgrađuju u tijelu, omogućujući rast novih tkiva dok se materijal razlaže.

Kompozitni materijali kombiniraju prednosti različitih materijala kako bi se postigli specifični zahtjevi za funkcionalnost i performanse.

- Polimerni kompoziti: Kombinacija polimera s ojačavajućim vlaknima, kao što su staklena ili ugljična vlakna, pruža poboljšane mehaničke karakteristike kao što su čvrstoća i fleksibilnost. Ovi materijali koriste se za ortopedske uređaje koji zahtijevaju kombinaciju čvrstoće i lakoće.
- Keramički kompoziti: Ovi kompoziti često uključuju keramičke materijale kao što je cirkonij, ojačane s drugim materijalima, kako bi se poboljšala njihova otpornost na trošenje i mehaničke karakteristike.

#### 5.2.2. Upotreba biomaterijala u ortopediji

Implantati za kosti i zglobove igraju ključnu ulogu u ortopediji, gdje se koriste za zamjenu oštećenih ili bolesnih dijelova tijela i pružanje potpore za liječenje prijeloma i drugih ozljeda.

- Umjetni zglobovi: Totalna artroplastika kuka i koljena uključuje zamjenu oštećenog zgloba umjetnim zglobom. Ovi implantati često koriste metale i keramiku za izradu komponenti koje omogućuju bolju funkcionalnost i dugotrajnost. Implantati se moraju prilagoditi anatomske strukturi pacijenta i omogućiti glatko kretanje zgloba.
- Spinalni implantati: Spinalni implantati, uključujući intervertebralne proteze i spinalne fiksatore, koriste se za stabilizaciju kralježnice i liječenje deformacija. Legure titanija i UHMWPE su česti materijali u ovoj primjeni zbog svoje čvrstoće i biokompatibilnosti. Na slici 5.2. prikazan je ugrađeni spinalni implantat.



*Slika 5.2. Ugrađeni spinalni implantat [14]*

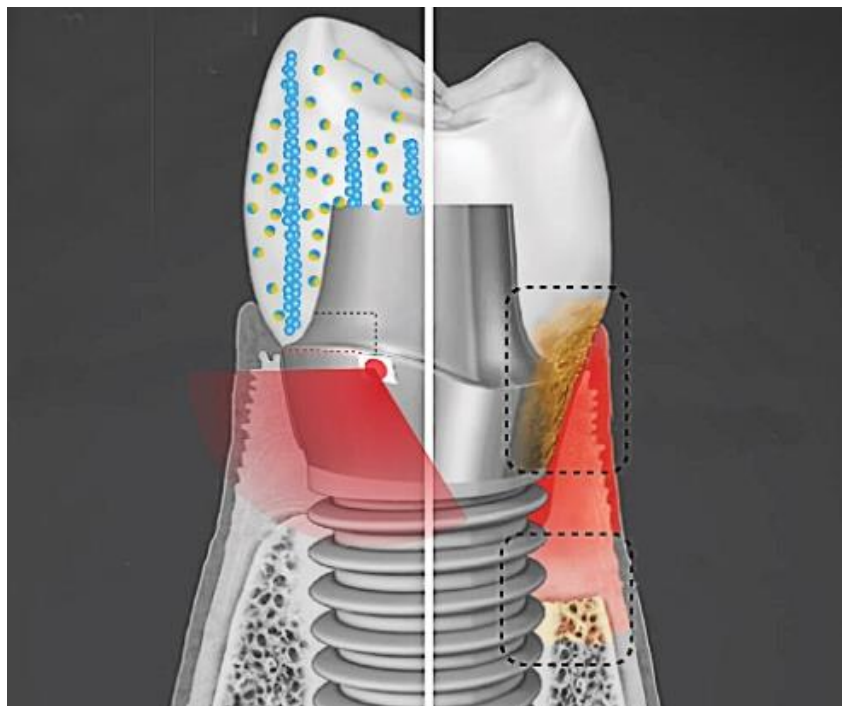
- Koštani graftovi: Koštani graftovi koriste se za obnavljanje oštećenih kostiju i često se koriste u kombinaciji s biomaterijalima kao što su PLA i PGA za podršku regeneraciji kostiju.

Primjena biomaterijala u ortopediji poboljšava kvalitetu života pacijenata omogućujući im povratak normalnim aktivnostima, smanjenje boli i poboljšanje funkcionalnosti zahvaćenih područja. Implantati mogu smanjiti bolove uzrokovane oštećenjem kostiju ili zglobova i omogućiti bolju mobilnost i samostalnost.

Inovacije u dizajnu ortopedskih implantata uključuju razvoj naprednih materijala i tehnologija koje omogućavaju bolje performanse i prilagodbu potrebama pacijenata.

- 3D ispis: 3D ispis omogućuje proizvodnju implantata s kompleksnim geometrijama i personaliziranim dimenzijama koje se prilagođavaju specifičnim potrebama pacijenata. Ova tehnologija omogućuje bržu proizvodnju i prilagodbu implantata, što može poboljšati rezultate liječenja.
- Pametni implantati: Razvoj pametnih implantata s ugrađenim sensorima omogućuje praćenje stanja pacijenta u stvarnom vremenu i prilagodbu tretmana. Ovi implantati mogu

pružiti informacije o opterećenju, naprezanju i zdravlju kostiju. Na slici 5.3. prikazan je pametni zubni implantat.



*Slika 5.3. Pametni zubni implantat s ugrađenim sensorima [15]*

### 5.2.3. Prednosti i nedostaci biomaterijala u ortopediji

Prednosti:

- **Biokompatibilnost:** Moderni biomaterijali osiguravaju visoku razinu biokompatibilnosti, smanjujući rizik od imunoloških reakcija i poboljšavajući integraciju s okolišnim tkivom.
- **Dugotrajnost:** Napredni materijali, poput legura titanija i keramike, nude dugotrajnu funkcionalnost i otpornost na habanje, što je ključno za uspjeh ortopedskih implantata.
- **Prilagodljivost:** Različiti biomaterijali mogu se prilagoditi specifičnim potrebama pacijenata, omogućujući razvoj personaliziranih rješenja za ortopedske probleme.

Nedostaci:

- Troškovi: Napredni biomaterijali i tehnologije mogu biti skupi, što može ograničiti pristup vrhunskim rješenjima za neke pacijente.
- Komplikacije: Iako je biokompatibilnost poboljšana, još uvijek postoji rizik od komplikacija, uključujući infekcije, upalne reakcije i istrošenost implantata.
- Tehnička ograničenja: Razvoj i proizvodnja visokokvalitetnih biomaterijala zahtijevaju napredne tehnologije i stručnost, što može predstavljati tehničke izazove i zahtijevati stalna istraživanja i inovacije.

Biomaterijali su ključni za napredak u ortopediji, omogućujući razvoj implantata i uređaja koji poboljšavaju kvalitetu života pacijenata i liječe različite ortopedske probleme. Razumijevanje različitih vrsta biomaterijala, njihovih karakteristika i primjena omogućuje učinkovitu i sigurnu upotrebu u ortopedskim zahvatima. Inovacije u dizajnu implantata, uključujući 3D ispis i pametne tehnologije, obećavaju daljnje poboljšanje u funkcionalnosti i prilagodbi, dok istraživanja i razvoj novih biomaterijala nastavljaju unapređivati rezultate liječenja i rehabilitacije.

### **5.3. Regenerativna medicina**

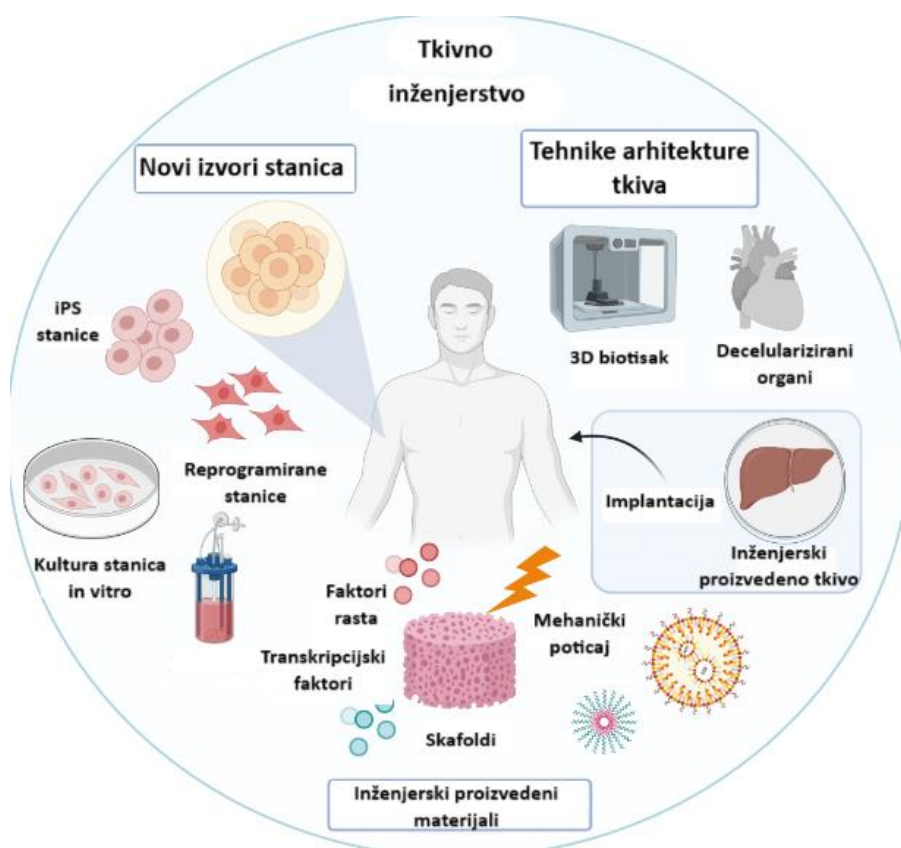
#### **5.3.1. Upotreba biomaterijala u tkivnom inženjeringu**

Regenerativna medicina koristi biomaterijale za stvaranje skafolda koji služe kao okviri za rast novih tkiva. Ovi materijali omogućuju stvaranje struktura koje podržavaju rast i organizaciju stanica u funkcionalna tkiva i organe. U praksi koriste se najviše polimeri i prirodni materijali:

- Polimeri: Biorazgradivi polimeri kao što su polilaktična kiselina (PLA) i poliglikolna kiselina (PGA) koriste se za izradu skafolda koji se postepeno razgrađuje u tijelu, omogućujući rast novih tkiva. Ovi materijali mogu se prilagoditi za različite aplikacije, uključujući regeneraciju kostiju, hrskavice i kože.

- Prirodni materijali: Kolagen, elastin i hialuronska kiselina često se koriste zbog svoje biokompatibilnosti i sposobnosti da potiču rast stanica. Ovi materijali mogu se koristiti za stvaranje matrica koje omogućuju regeneraciju složenijih tkiva.

Sveobuhvatan grafički prikaz tkivnog inženjerstva prikazan je na slici 5.4.



*Slika 5.4. Sveobuhvatan grafički prikaz tkivnog inženjerstva [16]*

### 5.3.2. Primjeri regeneracije tkiva

Primjeri uspješne regeneracije tkiva uključuju razvoj koštanih graftova za liječenje prijeloma i oštećenja kostiju, kao i regeneraciju hrskavice za liječenje osteoartritisa. U području regeneracije kože, biomaterijali se koriste za izradu umjetnih kožnih graftova koji pomažu u liječenju teških opeklini i rana.



### 5.3.3. Buduće perspektive i istraživanja

Buduće perspektive u regenerativnoj medicini uključuju razvoj naprednih biomaterijala s poboljšanim svojstvima za stvaranje funkcionalnih tkiva i organa. Istraživanja usmjerena na korištenje matičnih stanica i genetski modificiranih stanica u kombinaciji s biomaterijalima mogu omogućiti razvoj složenijih regenerativnih rješenja. Također, integracija bioprintanja i nano tehnologija obećava nove mogućnosti za personaliziranu i učinkovitiju regeneraciju tkiva.

## 5.4. Stomatologija

Stomatologija, koja se bavi zdravljem i liječenjem zuba i usne šupljine, koristi širok spektar biomaterijala za različite terapijske i restaurativne primjene. Biomaterijali u stomatologiji igraju ključnu ulogu u obnovi funkcionalnosti, estetskoj rekonstrukciji i dugotrajnoj održivosti zubnih i oralnih struktura.

### 5.4.1. Vrste biomaterijala u stomatologiji

Metali se koriste u stomatologiji zbog svoje izdržljivosti, otpornosti na habanje i dugovječnosti. U stomatološkoj praksi najčešće korišteni metali uključuju nehrđajući čelik, zlato, platinu, i kobalt-krom legure.

- **Nehrđajući čelik:** Nehrđajući čelik se koristi u različitim stomatološkim aplikacijama, uključujući zubne proteze (slika 5.5.) i ortodontske aparate. Zbog svoje čvrstoće i otpornosti na koroziju, nehrđajući čelik je pogodan za privremene i dugoročne dentalne aplikacije.



*Slika 5.5. Zubna proteza [17]*

- Zlato: Zlato se koristi u izradi zubnih krunica i mostova zbog svoje biokompatibilnosti i izdržljivosti. Iako je skuplje od drugih materijala, zlato je vrlo otporno na habanje i pruža dugotrajan estetski i funkcionalni rezultat.
- Kobalt-krom legure: Ove legure su vrlo čvrste i otporne na habanje, što ih čini pogodnim za izradu zubnih mostova (slika 5.6.) i proteza. Kobalt-krom legure također nude dobru biokompatibilnost i dugotrajan rad.



*Slika 5.6. Zubni most [18]*

Keramički biomaterijali su cijenjeni zbog svoje estetske privlačnosti, čvrstoće i otpornosti na trošenje. Keramika se često koristi za izradu krunica, ljuskica i implantata.

- Porculan: Porculan se koristi za izradu estetskih zubnih krunica i ljuskica zbog svoje sposobnosti da imitira izgled prirodnog zuba. Porculan je otporan na promjene boje i dobro se slaže s okolnim zubima.
- Cirkonij: Cirkonij je visoko cijenjen zbog svoje izuzetne čvrstoće i estetskog izgleda. Koristi se za zubne krunice, mostove i implantate, posebno u situacijama gdje je potrebno postići vrhunsku estetiku uz dugotrajnost.

Polimeri su široko korišteni u stomatologiji zbog svoje svestranosti, prilagodljivosti i mogućnosti prilagodbe različitim potrebama.

- Kompozitne smole: Kompozitne smole (slika 6.7.) koriste se za dentalne restoracije kao što su ispunjene šupljine i ljuskice. Ove smole nude estetski prihvatljiv rezultat i mogu se uskladiti s bojom prirodnih zuba, čime se postiže prirodan izgled.



*Slika 5.7. Dentalne kompozitne smole [19]*

- Akrilati: Akrilati se koriste za izradu denture i ortodontskih aparata. Ovi materijali su lako oblikovani i prilagodljivi, ali mogu pokazivati znakove trošenja tijekom vremena.

Kompozitni materijali kombiniraju prednosti različitih materijala kako bi postigli specifične performanse.

- Stakleni ionomer: Ovaj materijal se koristi za ispunu zuba i kao cement za cementiranje krunica i mostova. Stakleni ionomer oslobađa fluor, što može pomoći u prevenciji karijesa.
- Kompozitni materijali sa staklenim vlaknima: Ovi kompoziti koriste staklena vlakna za poboljšanje čvrstoće i otpornosti na naprezanje u dentalnim aplikacijama, kao što su dentalne korekcije i ispunjene šupljine.

#### 5.4.2. Inovacije i budućnost biomaterijala u stomatologiji

Pametni materijali u stomatologiji uključuju materijale koji reagiraju na promjene u okolišu, kao što su temperatura ili pH, kako bi poboljšali funkcionalnost i performanse dentalnih restoracija. Nanotehnologija omogućava razvoj materijala na nanoskopskoj razini, što može poboljšati svoje karakteristike, poput otpornosti na trošenje i antibakterijskih svojstava.

3D ispis omogućuje preciznu izradu dentalnih implantata, krunica i drugih nadomjestaka prema individualnim potrebama pacijenata. Ova tehnologija omogućava personalizirane i brže proizvodne procese.

CAD/CAM (računalno potpomognuto dizajniranje i proizvodnja) tehnologija omogućava preciznu izradu dentalnih nadomjestaka i restauracija pomoću računalnih modela i automatskih strojeva.

Razvoj novih materijala i tehnologija nastavlja se s ciljem poboljšanja dugoročne stabilnosti dentalnih restoracija i implantata. Ove inovacije pomažu u smanjenju broja potrebnih zahvata i poboljšanju dugovječnosti tretmana.

Biomaterijali igraju ključnu ulogu u modernoj stomatologiji, omogućujući širok spektar restaurativnih i terapijskih rješenja. Razumijevanje različitih vrsta biomaterijala, njihovih karakteristika i primjena pomaže u odabiru najprikladnijih materijala za specifične stomatološke potrebe. Inovacije u tehnologiji i materijalima nastavljaju poboljšavati rezultate stomatoloških tretmana, pružajući pacijentima dugotrajna i estetski prihvatljiva rješenja. Stalna istraživanja i razvoj u ovom području obećavaju daljnje napretke u kvaliteti i učinkovitosti stomatološke njege.

## **5.5. Dijagnostički uređaji**

### **5.5.1. Upotreba biomaterijala u dijagnostici**

Biomaterijali su sve prisutniji u dijagnostičkim uređajima, gdje pomažu u poboljšanju preciznosti i funkcionalnosti. Koriste se u raznim uređajima, uključujući biosenzore, mikrofluidičke uređaje i medicinske senzore.

- **Biosenzori:** Biosenzori koriste biomaterijale za detekciju bioloških markera i analiza bioloških uzoraka. Polimeri i nanomaterijali često se koriste za poboljšanje osjetljivosti i specifičnosti biosenzora.
- **Mikrofluidni uređaji:** Ovi uređaji koriste biomaterijale za manipulaciju malim količinama tekućina i omogućuju analize u stvarnom vremenu. Mikrofluidni uređaji koriste materijale kao što su polidimetilsiloksan (PDMS) i akrilati za izradu kanala i komora.

### **5.5.2. Biomehanički senzori i drugi uređaji**

U medicini, biomehanički senzori se koriste za praćenje fizičkih parametara kao što su tlak u arterijama, pritisak na zglobove i deformacije kostiju. Ovi senzori mogu pomoći u dijagnosticiranju i praćenju različitih stanja, uključujući kardiovaskularne bolesti, ortopedske probleme i rehabilitaciju.

Biomehanički senzori predstavljaju naprednu tehnologiju koja koristi biomaterijale za precizno mjerenje različitih fizičkih parametara, uključujući tlak, napetost i deformaciju. Ovi senzori su ključni u medicinskim aplikacijama jer omogućuju praćenje i analizu biomehaničkih svojstava ljudskog tijela u stvarnom vremenu. Razvoj ovih senzora oslanja se na inovativne biomaterijale, kao što su nanomaterijali, koji pružaju visoku osjetljivost i preciznost.

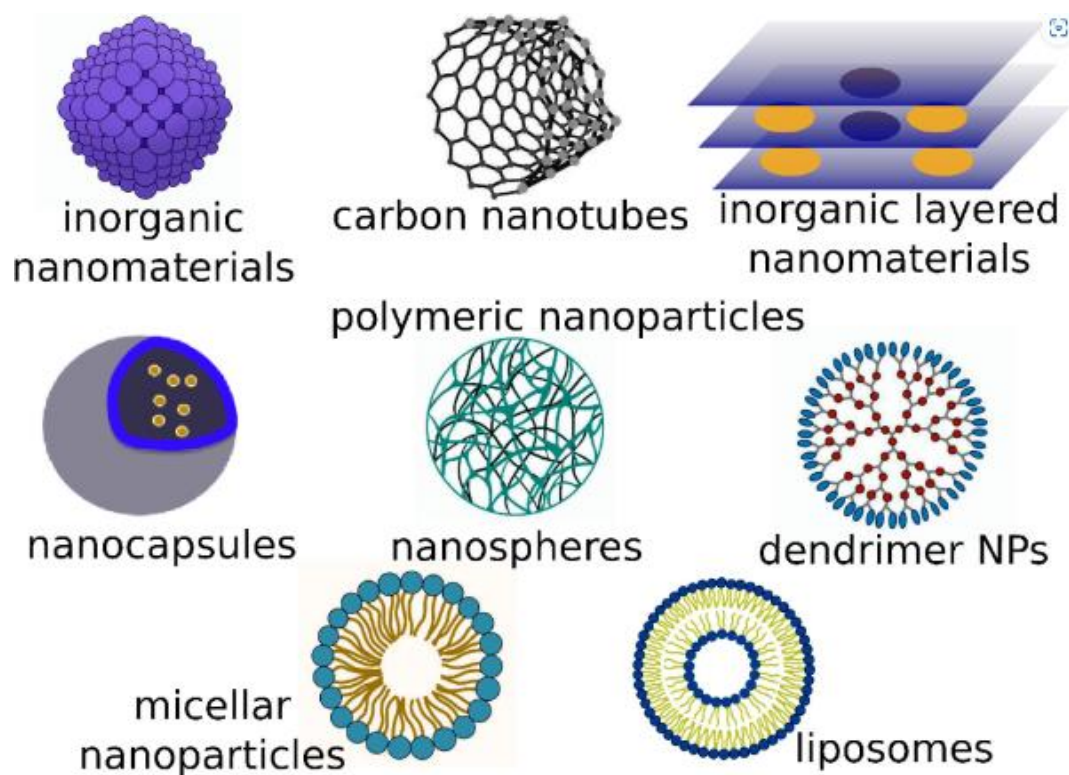
Biomehanički senzori funkcioniraju na osnovi pretvorbe fizičkih parametara u električne signale koji se mogu analizirati. Ovi senzori često koriste različite vrste biomaterijala koji mogu reagirati na promjene u okolini (npr. tlak) i pretvoriti te promjene u mjerenja koja se mogu interpretirati. Ključni principi uključuju:

- Pretvorba naprezanja u električni signal: Mnogi biomehanički senzori koriste materijale koji se deformiraju pod djelovanjem naprezanja ili tlaka, stvarajući promjene u njihovim električnim svojstvima. Ove promjene se potom pretvaraju u električne signale koji se mogu analizirati za određivanje napetosti ili tlaka.
- Mjerenje deformacija: Deformacijski senzori mjere promjene u obliku ili veličini materijala. Ovi senzori često koriste materijale koji se linearno šire ili skupljaju u odgovoru na deformaciju, što omogućuje točno mjerenje promjena u strukturi.

Nanomaterijali (slika 5.8.), koji uključuju materijale čije su strukture u nanometarskom rasponu, imaju revolucionaran utjecaj na razvoj biomehaničkih senzora. Njihove karakteristike omogućuju postizanje iznimno visoke osjetljivosti i preciznosti:

- Povećana površinska površina: Nanomaterijali imaju veliku površinu u odnosu na svoju masu, što omogućuje bolju interakciju s okolinom i povećava osjetljivost senzora na promjene u napetosti, tlaku ili deformaciji.

- Izuzetna mehanička svojstva: Nanomaterijali poput nanovlakana ili nanočestica često pokazuju poboljšana mehanička svojstva, uključujući povećanu čvrstoću i elastičnost, što poboljšava performanse senzora.
- Napredne električne karakteristike: Mnogi nanomaterijali imaju izuzetna električna svojstva, poput visoke provodljivosti, koja omogućuje precizno pretvaranje fizičkih promjena u električne signale. To poboljšava točnost i pouzdanost senzora.



*Slika 5.8. Grafički prikaz različitih nanomaterijala [20]*

## 6. NAPREDNE TEHNOLOGIJE I BUDUĆE PERSPEKTIVE

Razvoj biomaterijala u medicini neprestano napreduje zahvaljujući inovacijama u tehnologiji. Napredne tehnologije poput nanotehnologije, 3D ispisa i personalizirane medicine donose nove mogućnosti za primjenu biomaterijala, dok budući pravci istraživanja obećavaju daljnja poboljšanja u ovom području.

### 6.1. Nanotehnologija i biomaterijali

Nanotehnologija predstavlja revoluciju u razvoju biomaterijala, omogućujući stvaranje materijala na molekularnoj i atomskoj razini. Korištenjem nanotehnologije, moguće je poboljšati svojstva biomaterijala, uključujući njihovu mehaničku čvrstoću, biokompatibilnost i sposobnost isporuke lijekova.

Primjene nanotehnologije u biomaterijalima:

- Liječenje raka: Nanočestice mogu ciljati tumorske stanice s velikom preciznošću, smanjujući nuspojave kemoterapije i povećavajući učinkovitost liječenja.
- Regeneracija tkiva: Nanočestice se mogu koristiti za poboljšanje rasta stanica i tkiva, što je posebno korisno u regenerativnoj medicini.
- Dijagnostika: Nanočestice omogućuju razvoj visoko osjetljivih dijagnostičkih alata koji mogu otkriti bolesti u ranoj fazi.

Nanotehnologija također omogućava stvaranje površina biomaterijala s poboljšanom biokompatibilnošću, što je ključno za uspjeh implantata i drugih medicinskih uređaja. Površine tretirane nanotehnologijom mogu poticati staničnu adheziju, rast i diferencijaciju, što ubrzava proces ozdravljenja i integracije implantata s okolnim tkivom.



## **6.2. 3D ispis biomaterijala**

3D ispis predstavlja još jednu značajnu tehnologiju koja mijenja način na koji se biomaterijali koriste u medicini. 3D ispis omogućava izradu složenih struktura s velikom preciznošću, prilagođenih individualnim potrebama pacijenata.

Primjene 3D ispisa biomaterijala:

- Izrada implantata: 3D ispis omogućava izradu prilagođenih ortopedskih i dentalnih implantata koji se savršeno uklapaju u anatomiju pacijenta.
- Tkivno inženjerstvo: 3D ispis omogućava stvaranje skafolda za uzgoj tkiva, što je ključni korak u regenerativnoj medicini.
- Protetika: 3D ispis se koristi za izradu prilagođenih proteza koje bolje odgovaraju potrebama pacijenata.

Korištenje 3D ispisa u medicini omogućava bržu izradu i testiranje prototipova, smanjujući vrijeme i troškove razvoja novih medicinskih uređaja. Ova tehnologija također otvara vrata personaliziranoj medicini, gdje se tretmani i uređaji mogu prilagoditi specifičnim potrebama svakog pacijenta.

## **6.3. Personalizirana medicina i biomaterijali**

Personalizirana medicina predstavlja pristup liječenju koji je prilagođen individualnim karakteristikama pacijenta. Korištenje biomaterijala igra ključnu ulogu u personaliziranoj medicini, omogućavajući izradu prilagođenih implantata, lijekova i drugih medicinskih rješenja.

Primjene biomaterijala u personaliziranoj medicini:

- Prilagođeni implantati: Biomaterijali se mogu prilagoditi specifičnim anatomskim i fiziološkim potrebama pacijenata, povećavajući učinkovitost i sigurnost implantata.

- Lijekovi s kontroliranim otpuštanjem: Biomaterijali mogu omogućiti preciznu isporuku lijekova, prilagođenu potrebama pacijenta, čime se povećava učinkovitost liječenja i smanjuju nuspojave.
- Regenerativna medicina: Personalizirani skafoldi i drugi biomaterijali omogućavaju regeneraciju tkiva koja je prilagođena specifičnim potrebama pacijenata.

Personalizirana medicina koristi podatke iz genetskih testova, medicinske povijesti i drugih izvora kako bi razvila prilagođene tretmane. Biomaterijali igraju ključnu ulogu u ovom procesu, omogućavajući razvoj prilagođenih medicinskih rješenja koja bolje odgovaraju individualnim potrebama pacijenata.

#### **6.4. Budući pravci istraživanja i razvoja**

Budući pravci istraživanja i razvoja biomaterijala usmjereni su na poboljšanje postojećih materijala i razvoj novih, inovativnih rješenja. Neka od ključnih područja istraživanja uključuju:

1. Biomimetiku: Razvoj materijala koji oponašaju prirodne biološke strukture i funkcije, čime se poboljšava njihova integracija s tijelom i funkcionalnost.
2. Napredne površinske obrade: Razvoj novih površinskih tretmana koji poboljšavaju biokompatibilnost, sprječavaju infekcije i ubrzavaju proces zacjeljivanja.
3. Inženjering tkiva i organa: Istraživanje novih metoda za uzgoj funkcionalnih tkiva i organa koristeći biomaterijale, što bi moglo revolucionirati transplantacijsku medicinu.
4. Nanomedicinu: Daljnji razvoj nanotehnologije u medicini, uključujući ciljanje lijekova, regeneraciju tkiva i dijagnostiku.
5. Ekološki prihvatljive biomaterijale: Razvoj biorazgradivih i ekološki prihvatljivih biomaterijala koji smanjuju negativan utjecaj na okoliš.

Razvoj novih biomaterijala zahtijeva multidisciplinarni pristup, uključujući suradnju između znanstvenika, inženjera, liječnika i regulatornih tijela. Ovo osigurava da novi biomaterijali budu sigurni, učinkoviti i u skladu s najvišim standardima kvalitete.

Napredne tehnologije i buduće perspektive u razvoju biomaterijala otvaraju nove mogućnosti za medicinu, poboljšavajući liječenje pacijenata i omogućavajući razvoj personaliziranih medicinskih rješenja. Nanotehnologija, 3D ispis i personalizirana medicina samo su neki od trendova koji oblikuju budućnost biomaterijala. Kontinuirano istraživanje i inovacije u ovom području ključni su za daljnji napredak i poboljšanje kvalitete života pacijenata.

## 7. ETIKA I REGULACIJA BIOMATERIJALA

Etika upotrebe biomaterijala u medicini obuhvaća niz pitanja koja se odnose na sigurnost pacijenata, transparentnost istraživanja, informirani pristanak i pravednost u pristupu liječenju. Upotreba biomaterijala mora biti u skladu s etičkim načelima kako bi se osigurala dobrobit pacijenata i poštivanje njihovih prava. Jedan od najvažnijih etičkih principa u primjeni biomaterijala je osiguranje sigurnosti pacijenata. Svi biomaterijali moraju proći rigorozna ispitivanja kako bi se potvrdila njihova biokompatibilnost i sigurnost za upotrebu u ljudskom tijelu. Etika nalaže da se pacijenti ne smiju izlagati nepotrebnim rizicima, a svaki potencijalni rizik mora biti jasno objašnjen prije primjene biomaterijala.

Istraživanja koja uključuju biomaterijale moraju biti transparentna i dostupna znanstvenoj zajednici i javnosti. Transparentnost pomaže u izbjegavanju sukoba interesa i osigurava da su rezultati istraživanja vjerodostojni i reproducibilni. Također, transparentnost omogućava pacijentima da budu informirani o najnovijim dostignućima i potencijalnim rizicima. Pacijenti moraju biti potpuno informirani o prirodi biomaterijala koji se koriste, potencijalnim rizicima i koristima te alternativnim opcijama liječenja. Informirani pristanak je temeljno etičko načelo koje osigurava da pacijenti donose svjesne odluke o svom liječenju. Liječnici i istraživači imaju obvezu pružiti sve potrebne informacije na jasan i razumljiv način.

Pravednost zahtijeva da svi pacijenti imaju jednaki pristup naprednim biomaterijalima i da se nikoga ne diskriminira na temelju socioekonomskog statusa, rase, spola ili drugih osobnih karakteristika. Biomaterijali bi trebali biti dostupni svima kojima su potrebni, a etički okvir mora osigurati da inovacije u medicini ne povećavaju nejednakosti u zdravstvenoj skrbi. Regulacija biomaterijala ključna je za osiguranje njihove sigurnosti, učinkovitosti i kvalitete. Različite zemlje imaju specifične pravne okvire i regulative koje se odnose na razvoj, ispitivanje, proizvodnju i distribuciju biomaterijala.

Međunarodne organizacije, poput Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) i Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO), pružaju smjernice i standarde za regulaciju biomaterijala. ISO standardi, poput ISO 10993 koji se odnosi na biološku evaluaciju medicinskih uređaja, igraju ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti biomaterijala. Svaka zemlja ima svoje regulatorne agencije koje nadziru primjenu biomaterijala. U Sjedinjenim Američkim Državama, to je Agencija

za hranu i lijekove (FDA), dok je u Europskoj uniji to Europska agencija za lijekove (EMA). Te agencije osiguravaju da svi biomaterijali zadovoljavaju stroge sigurnosne i kvalitativne standarde prije nego što se odobre za upotrebu.

Postupci odobravanja biomaterijala uključuju preklinička i klinička ispitivanja. Preklinička ispitivanja uključuju laboratorijske i životinjske studije koje procjenjuju biokompatibilnost i sigurnost biomaterijala. Klinička ispitivanja uključuju ispitivanja na ljudima koja procjenjuju učinkovitost i sigurnost biomaterijala u stvarnim uvjetima primjene. Osiguranje sigurnosti biomaterijala zahtijeva primjenu strogih standarda i postupaka odobravanja. Ovi standardi uključuju biokompatibilnost, mehanička svojstva, sterilnost i post-market nadzor.

Biokompatibilnost je ključna za osiguranje da biomaterijali ne izazivaju štetne reakcije u tijelu. Testiranje biokompatibilnosti uključuje procjenu citotoksičnosti, senzibilizacije, iritacije i toksičnosti nakon implantacije. Biomaterijali moraju imati odgovarajuća mehanička svojstva, uključujući čvrstoću, elastičnost i otpornost na umor. Testiranja mehaničkih svojstava osiguravaju da biomaterijali mogu izdržati naprezanja i opterećenja koja će biti prisutna u tijelu. Sterilnost je ključna za sprječavanje infekcija. Biomaterijali moraju biti sterilizirani prije upotrebe, a postupci sterilizacije moraju biti validirani kako bi se osiguralo da ne oštećuju materijal.

Nakon što biomaterijali budu odobreni za upotrebu, potrebno je provoditi nadzor nakon puštanja na tržište kako bi se pratile njihove performanse i sigurnost u stvarnoj kliničkoj praksi. Ovaj nadzor omogućava brzo otkrivanje i rješavanje eventualnih problema. Biomaterijali imaju značajan društveni i ekonomski utjecaj. Njihova primjena može poboljšati kvalitetu života pacijenata, smanjiti zdravstvene troškove i potaknuti gospodarski rast kroz inovacije i razvoj novih tehnologija.

Biomaterijali omogućuju razvoj naprednih medicinskih tretmana koji mogu značajno poboljšati kvalitetu života pacijenata. Na primjer, ortopedski implantati mogu obnoviti mobilnost, a dentalni implantati mogu poboljšati oralno zdravlje i funkcionalnost. Iako inicijalni troškovi razvoja i primjene biomaterijala mogu biti visoki, dugoročno oni mogu smanjiti zdravstvene troškove. Na primjer, implantati s dugim vijekom trajanja mogu smanjiti potrebu za ponovnim operacijama i komplikacijama, čime se smanjuju ukupni troškovi zdravstvene skrbi.

Industrija biomaterijala doprinosi gospodarskom rastu kroz stvaranje radnih mjesta, poticanje inovacija i razvoj novih tehnologija. Investicije u istraživanje i razvoj biomaterijala mogu dovesti do novih proizvoda i rješenja koja mogu imati globalni utjecaj. Važno je osigurati da svi pacijenti imaju jednak pristup naprednim biomaterijalima, bez obzira na socioekonomski status. To zahtijeva razvoj politika i programa koji će osigurati pristupačnost i pravednost u distribuciji medicinskih resursa.

Etika i regulacija biomaterijala ključni su za osiguranje sigurnosti, učinkovitosti i pravednosti u njihovoj primjeni. Etika upotrebe biomaterijala zahtijeva sigurnost pacijenata, transparentnost istraživanja, informirani pristanak i pravednost u pristupu liječenju. Pravni okvir i regulative osiguravaju da biomaterijali zadovoljavaju stroge standarde prije nego što se odobre za upotrebu. Sigurnosni standardi i postupci odobravanja osiguravaju da biomaterijali budu sigurni i učinkoviti. Društveni i ekonomski utjecaj biomaterijala je značajan, s potencijalom za poboljšanje kvalitete života, smanjenje zdravstvenih troškova i poticanje gospodarskog rasta. Kontinuirana istraživanja i inovacije u ovom području ključni su za daljnji napredak i osiguranje dobrobiti pacijenata diljem svijeta.

## 8. ZAKLJUČAK

Primjena biomaterijala u medicini predstavlja revolucionarno područje koje neprestano napreduje, pružajući nove mogućnosti za liječenje i poboljšanje kvalitete života pacijenata diljem svijeta. Biomaterijali, bilo prirodnog ili sintetičkog podrijetla, dizajnirani su za interakciju s biološkim sustavima s ciljem dijagnostičkih, terapijskih ili rekonstruktivnih svrha. Ovi materijali moraju ispunjavati stroge kriterije biokompatibilnosti, mehaničkih svojstava i kemijske stabilnosti kako bi bili učinkoviti i sigurni za medicinsku upotrebu.

Jedno od ključnih područja primjene biomaterijala je ortopedija, gdje se koriste za izradu implantata za kosti i zglobove. Ovi implantati moraju biti dovoljno čvrsti da podnesu fizičke sile, ali i dovoljno elastični da omogućuju prirodne pokrete i smanjuju naprezanja na okolne kosti. Napredak u materijalima kao što su legure titanija i keramički materijali značajno je poboljšao dugotrajnost i funkcionalnost ortopedskih implantata, što rezultira boljim ishodima za pacijente. U stomatologiji, biomaterijali su ključni za zubne implantate, krunice, mostove i ispunjene šupljine. Materijali kao što su stakleni ionomer i kompozitni materijali sa staklenim vlaknima pružaju estetske i funkcionalne prednosti, uključujući otpornost na trošenje i oslobađanje fluorida za prevenciju karijesa. Razvoj novih dentalnih materijala također je omogućio minimalno invazivne zahvate i poboljšanu dugotrajnost dentalnih restauracija.

Kardiovaskularna medicina također koristi biomaterijale u obliku stentova, pacemakera i umjetnih srčanih zalistaka. Biokompatibilnost i otpornost na trombozu ključni su za uspjeh ovih uređaja, a napredak u polimernim i metalnim materijalima omogućio je značajno smanjenje komplikacija i poboljšanje funkcionalnosti. Regenerativna medicina i tkivno inženjerstvo predstavljaju područje s ogromnim potencijalom za budućnost. Korištenje biomaterijala za stvaranje skafolda koji podržavaju rast novih stanica i tkiva može dovesti do razvoja funkcionalnih zamjena za oštećena tkiva i organe. Ovo bi moglo revolucionirati liječenje brojnih bolesti i ozljeda, smanjujući potrebu za transplantacijama i dugoročnim medicinskim tretmanima.

Unatoč impresivnom napretku, postoje izazovi koje treba prevladati, uključujući kontrolu brzine razgradnje biomaterijala, osiguranje biokompatibilnosti proizvoda razgradnje, te prilagodbu individualnim varijabilnostima pacijenata. Regulacija i standardizacija biomaterijala također su ključne za osiguranje njihove sigurnosti i učinkovitosti.

Zaključno, primjena biomaterijala u medicini transformira način na koji se pristupa liječenju i rehabilitaciji, omogućujući nove terapijske opcije i poboljšavajući ishode za pacijente. Nastavak istraživanja i razvoja u ovom području obećava daljnje inovacije koje će dodatno unaprijediti medicinsku praksu i kvalitetu života pacijenata.



## LITERATURA

- [1] Schauerperl Z., Biomaterijali, <https://bme.unizg.hr/bme/istrazivanja/biomaterijali>, 2.6.2024.
- [2] Boni T., Obrada i zbrinjavanje materijala, [https://edu.asoo.hr/wp-content/uploads/2024/03/087\\_Obrada-i-zbrinjavanje-materijala\\_DORADA-2.pdf](https://edu.asoo.hr/wp-content/uploads/2024/03/087_Obrada-i-zbrinjavanje-materijala_DORADA-2.pdf), 2.6.2024.
- [3] S. Todros, M. Todesco, A. Bagnò, Biomaterials and Their Biomedical Applications: From Replacement to Regeneration, Processes 9 (2021.), 1949.
- [4] URL: <http://centar-zdravlja-fizioturk.hr/ugradnja-umjetnih-zglobova/>, 11.6.2024.
- [5] URL: <https://dentusperfectus.hr/zubni-implantati-cijena/>, 11.6.2024.
- [6] URL: <https://www.vhlab.umn.edu/atlas/device-tutorial/stents/index.shtml>, 13.6.2024.
- [7] URL: <https://jostsurgical.com/resorptivni/>, 6.6.2024.
- [8] URL: <https://4smile.hr/sto-je-oseointegracija-kljuc-uspjeha-ugradnje-zubnih-implantata/>, 21.6. 2024.
- [9] URL: <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>, 23.6.2024.
- [10] URL: <https://simptomi.rs/centar-za-zbrinjavanje-i-negu-rana/7048-skidanje-konaca-savova-nakon-operacije>, 30.6. 2024.
- [11] URL: <https://hr.ky-plastics.com/others-plastic-raw-material/biodegradable-material-poly-lactic-acid-pla.html>, 30.6.2024.
- [12] URL: <https://biosmart.hr/sterilizacija-u-autoklavu-pitanja-i-odgovori/>, 5.7.2024.
- [13] URL: <https://www.healthdirect.gov.au/surgery/inserting-a-pacemaker>, 6.7.2024.
- [14] URL: <https://aksis.hr/zahvat/umjetni-disk-kraljeznice/>, 7.7.2024.
- [15] URL: <https://www.bug.hr/istrazivanja/pametni-zubni-implantati-sprecavaju-razvoj-plaka-i-pomladjuju-tkivo-23147>, 7.7.2024.
- [16] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tissue\\_engineering](https://en.wikipedia.org/wiki/Tissue_engineering), 9.7.2024.
- [17] URL: <https://www.apolonija.hr/krunice-mostovi-proteze/nedostatak-svih-zubi/,ž>  
14.7.2024.
- [18] URL: <https://dentusperfectus.hr/zubni-most/>, 14.7.2024.

- [19] URL: <https://novaetteam.com/product/core-it-kompozitna-smola/>, 14.7.2024.
- [20] URL: <https://www.pharmaexcipients.com/news/nanomaterials-veterinary/>, 15.7.2024.
- [21] Ratner, B. D. i dr., *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*, Academic Press, 2013.
- [22] Williams, D. F., *Definitions in biomaterials*, Elsevier, Amsterdam, 1987.
- [23] Park, J. B., & Bronzino, J. D. (2003). *Biomaterials: Principles and Applications*, CRC Press, Boca Raton, 2002.
- [24] Bronzino, J. D., Peterson, D. R., *The Biomedical Engineering Handbook*. CRC Press, Boca Raton, 2000.
- [25] D. Raković, M. Pavlović, *Metalni biomaterijali*, u. D. Raković, D. Uskoković (ur.), *Biomaterijali*, Institut tehničkih nauka srpske akademije nauka i umetnosti, Beograd, 2010.
- [26] Hench, L. L., Wilson, J., *An Introduction to Bioceramics*, World Scientific, Florida, 1993.
- [27] Craig, R. G., Powers, J. M., *Restorative Dental Materials*, Mosby, St. Louis, 2002.
- [28] Ćorić, D: *Posebni metalni materijali*, FSB Zavod za materijale, 2018.
- [29] Cooke, F. W., Lemons, J. E., & Ratner, B. D. (1996). Chapter 1 - Properties of Materials. In B. D. Ratner, A. S. Hoffman, F. J. Schoen, & J. E. Lemons (Eds.), *Biomaterials Science* (pp. 11–35): Academic Press.
- [30] He, W., & Benson, R. (2017). Chapter 8 — Polymeric Biomaterials. In M. Kutz (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)* (pp. 145-164): William Andrew Publishing.
- [31] Zindani, D., Kumar, K., & Paulo Davim, J. (2019). Chapter 4 - Metallic biomaterials - A review. In J. P. Davim (Ed.), *Mechanical Behaviour of Biomaterials* (pp. 83–99): Woodhead Publishing.
- [32] Tessarolo, F., Nollo, G., *Sterilization of biomedical materials*, Taylor & Francis Group,

New York, 2008.

[33] Mandal, A.: What is a Pacemaker?, News Medical & Life Sciences, 2021., <https://www.news-medical.net/health/What-is-a-Pacemaker.aspx>

[34] Lanza, R., Langer, R., Vacanti, J. P., Principles of Tissue Engineering, Academic Press, 2013.

[35] Craig, R.G., Powers, J.M., Restorative dental materials, Mosby, St. Louis, 2002.

[36] Haramina, T: Polimeri i kompoziti, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.

[37] Ebert, M., Wolf, M.: Biomaterials for pacemakers, defibrillators and neurostimulators, Biomaterials for Arteficial Organs, 2011., <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/implantable-automaticdefibrillator>, 12.7.2024.

[38] Pacemaker, <http://www.madehow.com/Volume-3/Pacemaker.html>, 12.7.2024.

[39] biosenzor. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024., <https://www.enciklopedija.hr/clanak/biosenzor>, 14.7.2024.

[40] Anusavice, K. J., Shen, C., Rawls, H. R., "Phillips' Science of Dental Materials", 2012.

[41] Peham, C., Sensors for Biomechanics Application, [https://www.mdpi.com/journal/sensors/special\\_issues/S\\_B\\_A](https://www.mdpi.com/journal/sensors/special_issues/S_B_A), 15.7.2024.

[42] Vollath, D., Nanomaterials: An Introduction to Synthesis, Properties and Applications, Wiley, 2008.

[43] Ramsden, J., Nanotechnology: An Introduction, Elsevier, New York, 2011.

[44] Frank J. Rybicki (Editor), Gerald T. Grant (Editor) 3D Printing in Medicine: A Practical Guide for Medical Professionals, Springer, 2017.

[45] Vallero, D. A., Biomedical Ethics for Engineers: Ethics and Decision Making in Biomedical and Biosystem Engineering, Academic Press, 2007.

[46] Jakovljević, S., Grilec, K.. Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.

[47] Juraga, I., Alar, V., Šimunović, V., Stojanović, I.: Korozija i metode zaštite od korozije, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.

- [48] Titanium Alloys in Medical Applications,  
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1794>, 16.7.2024.
- [49] Bioceramics: What Are They & What Properties Should They Possess,  
<https://www.wundermold.com/what-properties-characteristics-bioceramics/>, 16.7.2024.
- [50] Kassinger, K.: Ceramics: From Magic Pots to Man-Made Bones, Brookfield, CT: Twenty-First Century Books, 2003.
- [51] Thamaraiselvi, T., Rajeswari, S.: Biological evaluation of bioceramic materials – a review, Carbon 24.31, 2004., 172.
- [52] Salernitano, E., Migliaresi, C.: Composite materials for biomedical applications: a review, Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics, 2003., 1: 3-18,  
<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/228080000300100102>, 16.7.2024.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Raznolika primjena biomaterijala u medicini [2] .....	3
Slika 2.2. Povijesni razvoj biomaterijala [3] .....	4
Slika 3.1. Umjetni metalni zglob prije i poslije postavljanja metalnog implantata [4] .....	12
Slika 3.2. Metalni zubni implantat [5] .....	12
Slika 3.3. Postavljanje stenta unutar arterije [6] .....	13
Slika 3.4. Resorptivni konac za šivanje [7] .....	15
Slika 3.5. Osteointegracija [8] .....	16
Slika 3.6. a) Kompozitni materijal ojačan česticama, b) Kompozitni materijal ojačan vlaknima [9] .....	18
Slika 4.1. Biorazgradivi šavovi [10] .....	26
Slika 4.2. Poliaktična kiselina (PLA) [11] .....	27
Slika 4.3.. Uređaj za autoklaviranje [12] .....	29
Slika 5.1. Ugradnja pacemakera [13] .....	33
Slika 5.2. Ugrađeni spinalni implantat [14] .....	37
Slika 5.3. Pametni zubni implantat s ugrađenim sensorima [15] .....	38
Slika 5.4. Sveobuhvatan grafički prikaz tkivnog inženjerstva [16] .....	40
Slika 5.5. Zubna proteza [17] .....	41
Slika 5.6. Zubni most [18] .....	42
Slika 5.7. Dentalne kompozitne smole [19] .....	43
Slika 5.8. Grafički prikaz različitih nanomaterijala [20] .....	47

## SAŽETAK

Ovaj rad istražuje značajnu ulogu biomaterijala u modernoj medicini, s posebnim naglaskom na njihovu primjenu u područjima kao što su ortopedija, stomatologija, kardiovaskularna medicina i regenerativna medicina. Biomaterijali su od ključne važnosti za unapređenje medicinskih tretmana, omogućujući razvoj naprednih implantata, proteza, te drugih medicinskih uređaja koji značajno poboljšavaju kvalitetu života pacijenata.

Metodologija rada uključuje detaljnu analizu stručne literature, kao i pregled specifičnih primjera primjene biomaterijala u medicinskoj praksi. Kroz ovu analizu, rad istražuje kako se različiti materijali, poput polimera, metala, keramike i kompozita, koriste za specifične medicinske svrhe, te kako njihova svojstva, kao što su biokompatibilnost, mehanička čvrstoća i otpornost na habanje, doprinose uspjehu medicinskih intervencija.

Zaključci rada ističu da su biomaterijali neizostavan dio suvremene medicine, s velikim potencijalom za daljnji razvoj i inovacije. Iako su postignuti značajni uspjesi u njihovoj primjeni, rad također ukazuje na postojeće izazove, uključujući potrebu za dodatnim istraživanjima kako bi se osigurala potpuna biokompatibilnost i dugoročna sigurnost biomaterijala. Dodatno, rad naglašava važnost usklađenosti s regulatornim zahtjevima i etičkim standardima kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost ovih materijala u medicinskoj praksi.

Ključne riječi: Biomaterijali, biokompatibilnost, medicinski uređaji, implantati, regenerativna medicina

## **SUMMARY**

This final paper explores the significant role of biomaterials in modern medicine, with a particular focus on their applications in areas such as orthopedics, dentistry, cardiovascular medicine, and regenerative medicine. Biomaterials are crucial for advancing medical treatments, enabling the development of advanced implants, prostheses, and other medical devices that significantly improve patients' quality of life.

The methodology of the final paper includes a detailed analysis of specialized literature and a review of specific examples of biomaterial applications in medical practice. Through this analysis, the paper examines how various materials, such as polymers, metals, ceramics, and composites, are used for specific medical purposes and how their properties, such as biocompatibility, mechanical strength, and wear resistance, contribute to the success of medical interventions.

The paper concludes that biomaterials are an indispensable part of modern medicine, with great potential for further development and innovation. While significant successes have been achieved in their application, the paper also highlights existing challenges, including the need for further research to ensure complete biocompatibility and long-term safety of biomaterials. Additionally, the paper emphasizes the importance of compliance with regulatory requirements and ethical standards to ensure the safety and efficacy of these materials in medical practice.

Keywords: Biomaterials, biocompatibility, medical devices, implants, regenerative medicine