

# Razvoj i primjena biomimetičkih materijala

---

**Naletilić, Domagoj**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:187256>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-16**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**Razvoj i primjena biomimetičkih materijala**

**Završni rad**

**Domagoj Naletilić**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 11.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Domagoj Naletilić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4911, 21.09.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	26750480979
<b>Mentor:</b>	doc. dr. sc. Goran Rozing
<b>Sumentor:</b>	Dalibor Buljić, dipl. ing.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Razvoj i primjena biomimetičkih materijala
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	11.09.2023.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	24.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 25.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Domagoj Naletilić

**Studij:**

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4911, 21.09.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Razvoj i primjena biomimetičkih materijala**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora Dalibor Buljić, dipl. ing.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Povijesni razvoj biomimetičkih materijala njihove osnove i ciljevi biomimetike .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Ciljevi Biomimetike.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Biomimetički materijali, njihove karakteristike i primjena .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. Aerogelovi .....</b>	<b>7</b>
3.1.1. Uporaba aerogelova.....	8
<b>3.2. Hidrogelovi u elektronicima.....</b>	<b>9</b>
3.2.1. Uporaba hidrogelova .....	10
<b>3.3. Biomimetički materijal u medicini .....</b>	<b>13</b>
3.3.1. Biomimetički materijali za mišićno-koštano tkivo.....	15
3.3.2. Prirodni polimeri u medicini.....	16
<b>4. Pravci razvoja i mogućnost recikliranja biomimetičkih materijala.....</b>	<b>19</b>
4.1.1. Kardiovaskularni uređaji .....	19
4.1.2. Cerebrovaskularni uređaj.....	20
4.1.3. Uređaji za pročišćavanje krvi .....	20
4.1.4. Ortopedski uređaji .....	21
4.1.5. Bio-beton .....	22
<b>4.2. Recikliranje biomimetičkih materijala .....</b>	<b>23</b>
<b>5. Zaključak .....</b>	<b>27</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>28</b>
<b>Sažetak.....</b>	<b>34</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>34</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>35</b>

## 1. Uvod

U suvremenom dobu inspiracija iz prirode postala je ključna komponenta za inovacije u različitim područjima znanosti i tehnologije. Biološki su organizmi tijekom milijuna godina evolucije razvili jedinstvene i sofisticirane materijale s izvanrednim svojstvima. Biomimikrija koncept je koji se temelji na imitaciji prirodnih procesa i struktura, omogućuje znanstvenicima proučavanje i primjenjivanje bioloških obrazaca i principa za stvaranje novih materijala.

Ključna karakteristika biomimikrije rješavanje je problema kroz pažljivo promatranje i razumijevanje bioloških sustava te prenošenje tih spoznaja na tehničke i inženjerske aplikacije. To uključuje razvoj materijala inspiriranih prirodom, primjenu bioloških procesa u industriji ili dizajn proizvoda koji oponašaju oblike i funkcije organizama. No, biomimikrija nije samo izvor inovacija već i alat za postizanje održivosti. Cilj je također razviti održive tehnologije koje smanjuju negativne utjecaje na okoliš, smanjuju potrošnju resursa i povećavaju energetske učinkovitost [1].

Biomimetika potječe od grčke riječi *biomimesis*. Riječ je izmislio polihistor *Otto Schmitt* 1957. godine, koji je u svom doktorskom istraživanju razvio uređaj koji oponaša električno djelovanje živca. Druge riječi koje se upotrebljavaju uključuju bioniku, biomimikriju i biognozu. Područje biomimetike vrlo je interdisciplinarno. Uključuje razumijevanje bioloških funkcija i struktura koje su u prirodi pronašli biolozi, fizičari, kemičari i znanstvenici o materijalima te dizajn i izradu raznih materijala i uređaja od komercijalnog interesa za inženjere, znanstvenike za materijale, kemičare i druge [2].

U drugom poglavlju rada, opisan je povijesni razvoj biomimetičkih materijala te kako su ljudi, inspirirani prirodom, različitim izumima i građevinama doprinijeli funkcionalnijem životu. Također su opisane osnove i ciljevi biomimetike kao znanosti. U trećem poglavlju rada su opisane karakteristike nekoliko biomimetičkih materijala koji se danas istražuju i njihova primjena u medicini i tehnologiji. Potom, u četvrtom poglavlju se prikazuju i pravci razvoja biomimetičkih materijala kao što su medicinski uređaji koji imaju bitnu primjenu u medicini i razvoj bio-betona koji se postupno primjenjuje i u građevini. Konačno, opisane su metode recikliranja biomimetičkih materijala te načini uštede energije.

## **1.1. Zadatak završnog rada**

Zadatak je završnog rada prikazati povijesni razvoj biomimetičkih materijala. Također, ukazati na njihove primjene kroz povijest. Opisati osnove i ciljeve biomimetike kao znanosti. Opisati pojedine biomimetičke materijale i njihovu uporabu u tehnologiji i proizvodima te navesti i objasniti mogućnost recikliranja biomimetičkih materijala.

## 2. Povijesni razvoj biomimetičkih materijala njihove osnove i ciljevi biomimetike

Inspiracija iz prirode uvijek je bila ključni pokretač napretka u ljudskoj civilizaciji. Od davnina su znanstvenici, inženjeri i dizajneri promatrali prirodne obrasce i procese kako bi pronašli inovativna rješenja za različite izazove. Jedan je od najuzbudljivijih aspekata ove inspiracije iz prirode biomimetika - znanstveno područje koje se temelji na imitaciji bioloških sustava kako bi se stvorili materijali i tehnologije s poboljšanim svojstvima i karakteristikama.

Milijuni godina evolucije oblikovali su svijet oko nas i stvorile mnoge nevjerojatne stvari. Biomimikrija podrazumijeva promatranje obilježja prirode i kopiranje nje ili njezinih dijelova za ljudsku tehnologiju i dizajn. Brojni su primjeri biomimikrije na djelu [3].

Mnoge vrste guštera mogu hodati po glatkim površinama poput kamenih zidova, pa čak i stakla. Znanstvenici su proučavali jastučice na prstima jedne vrste, Tokajskog macaklina, i otkrili da im sitne mikroskopske dlačice pomažu da se “prilijepe“ za površine. Oponašajući prste guštera, razvili smo ljepila, način za zatvaranje rana bez puno šavova i još mnogo toga [3].



*Slika 2.1. Tokajski macaklin [3].*

Povijest biomimetike seže duboko u prošlost kada su ljudi prvi put počeli prepoznavati snagu i sofisticiranost prirodnih materijala. Drevne civilizacije poput Egipćana, Rimljana i Kineza primijenile su principe biomimetike u gradnji svojih građevina i izradi alata. Međutim, pojam biomimetike i sistematično proučavanje prirodnih uzora u svrhu materijalnih inovacija dobilo je posebno značenje u suvremenom dobu.

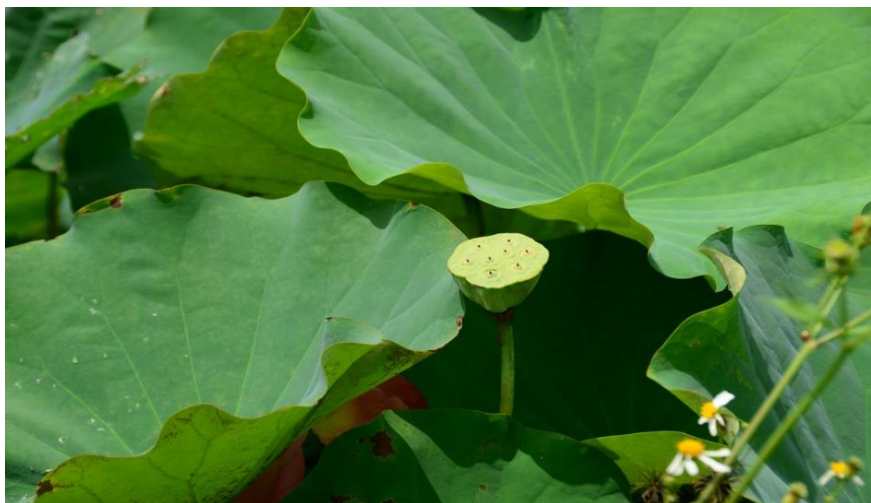


Svila je jedan od prvih primjera korištenja biomimetičkih materijala. Korištenje svile bilježi se još 4000 godina prije Krista. Kinezi su bili prva civilizacija koja je iskoristila svilenu bubu da bi dobili svilu. „Put Svile“ koji je spajao Aziju i Europu dobio je ime upravo po tom izumu. Svilom se moglo trgovati za njezinu težinu u zlatu u vrijeme kada su Kinezi jedini svladali vještinu njezinog tkanja [4].



*Slika 2.2. Svilena buba [4].*

Još su jedan primjer iz kineske povijesti kišobrani. Prvi kišobrani u Kini izumljeni su čak prije 1 700 godina, kada je *Lu Ban*, cijenjeni kineski izumitelj, arhitekt i inženjer koji je živio za vrijeme Zhou dinastije [5], gledao djecu kako se sklanjaju od kiše ispod Lotosovog lišća. Fleksibilnost i učinkovitost lista koje ima Lotus uspio je dobiti pomoću svile [6].



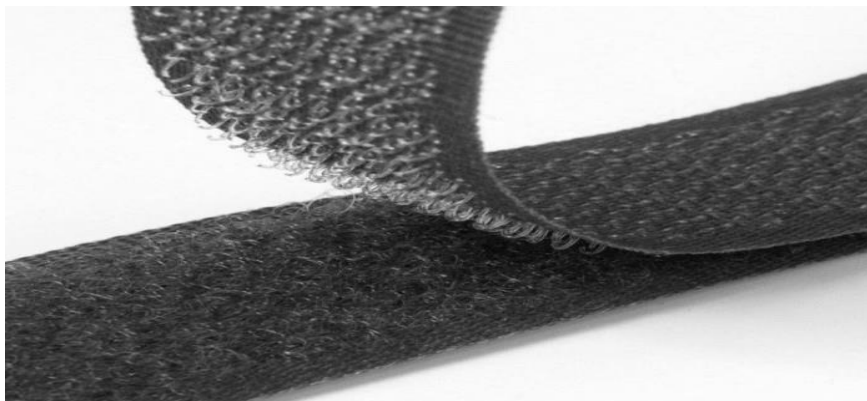
*Slika 2.3. Lotosov list [6].*

Kazališna fasada inspirirana voćem Durian, koju je dizajnirala grupa Design Partnership i arhitekt Michael Wilford, centar je izvedbenih umjetnosti površine oko 60 000 četvornih metara koji se nalazi u zaljevu Marina. Sastoji se od trgovačkog centra, kazališta, knjižnice i koncertne dvorane. Ta fasadna konstrukcija element je koji reagira na okoliš koji pruža sjenu i prilagođava se kutu sunčeve svjetlosti. Sustav koji se upotrebljava za reakciju sadrži malu aluminijsku zaštitu od sunca koja prekriva staklenu konstrukciju iznad kina. Fasada sustava za zaštitu od sunca pruža sjenu od jake svjetlosti [7].



*Slika 2.4. Singapursko umjetničko središte koje se sada naziva Esplanade [7].*

Od izumitelja Leonarda Da Vincija i braće Wright koji su proučavali let ptica te skicirali njihove kretnje, čime su uspostavili temelje za moderne avione i letjelice, pa do Georgea de Mestrala koji je proučavanjem čičaka zalijepljenih na tijelo njegovog psa dobio inspiraciju i izumio traku za pričvršćivanje *Velcro*, biomimetički materijali krenuli su se razvijati u područje koje bi znatno moglo pomoći tehnološkom razvoju svih ostalih polja znanosti.



*Slika 2.5. Velcro traka izumitelja George de Mestrala [8].*

## 2.1. Ciljevi Biomimetike

- **Održiva inovacija:** Jedan je od primarnih ciljeva biomimetike promicanje održive inovacije. Oponašanjem dizajna prirode, koji su se razvijali milijunima godina, biomimetici je u cilju razviti ekološki prihvatljive tehnologije i materijale koji smanjuju potrošnju resursa, smanjuju otpad i imaju minimalan negativan utjecaj na planet.
- **Poboljšana funkcionalnost i učinkovitost:** Priroda je kroz evolucijske procese usavršila bezbrojna rješenja za složene probleme. Biomimetika nastoji identificirati i replicirati te učinkovite mehanizme za poboljšanje funkcionalnosti i učinkovitosti sustava koje je napravio čovjek. Oponašajući dizajn prirode, znanstvenici i inženjeri imaju za cilj razviti proizvode i tehnologije koje imaju bolje performanse, troše manje energije i postižu izvrsne rezultate [9].
- **Dizajn inspiriran prirodom:** Biomimetika potiče promjenu načina razmišljanja o dizajnu prihvaćanjem prirode kao mentora. Proučavajući kako su organizmi prilagođeni svom okolišu i kako rješavaju različite izazove, biomimetika ima za cilj potaknuti nove pristupe dizajnu. Ovaj pristup može dovesti do razvoja inovativnih i održivih rješenja u arhitekturi, inženjerstvu, dizajnu proizvoda i raznim drugim područjima.
- **Prilagodba na promjenjive uvjete:** Priroda posjeduje izvanrednu sposobnost prilagodbe i preživljavanja u raznolikim okruženjima. Biomimetika nastoji razumjeti strategije i mehanizme koji stoje iza takve prilagodljivosti i fleksibilnosti prirode, biomimetika ima za cilj razviti tehnologije i materijale koji mogu podnijeti promjenjive uvjete i ublažiti učinke klimatskih promjena.
- **Interdisciplinarna suradnja:** Biomimetika okuplja stručnjake iz različitih područja, uključujući biologiju, inženjerstvo, znanost o materijalima, robotiku i dizajn. Cilj je poticanje interdisciplinarne suradnje i razmjene znanja omogućavajući znanstvenicima, inženjerima i dizajnerima učenje iz rješenja prirode i primjenjivanje toga na inovativne načine. Povezujući različite discipline, biomimetika ima za cilj olakšati razvoj revolucionarnih tehnologija i potaknuti dublje razumijevanje prirodnog svijeta [9].

S obzirom na sve navedeno, biomimetika teži stvaranju održivih, učinkovitih i inovativnih rješenja putem iskorištavanja ogromnog znanja i inspiracije koje pruža prirodni svijet. Oponašanjem principa prirode, biomimetika ima potencijal revolucionarizirati brojne industrije i pridonijeti održivom i skladnom odnosu između ljudi i okoliša [10].

### 3. Biomimetički materijali, njihove karakteristike i primjena

Proces prirodne selekcije doveo je do evolucije brojnih materijala, struktura, modela, sustava koji su optimizirani za širok raspon funkcija. Biomimikrija ili bioinspiracija uključuje učenje načela dizajna prirode u izgradnji visoko složenih i sofisticiranih inženjerskih modela na različitim skalama i korištenje znanja za rješavanje kritičnih izazova s kojima se suočava čovječanstvo [11-13].

S obzirom na to da su se prirodni materijali i sustavi razvili za obavljanje širokog spektra funkcija uključujući strukturnu potporu, transdukciju signala, osjetljivost na gibanje, katalizu, promet, molekularno prepoznavanje, samosastavljanje, samoreplikacija kombinacija dviju ili više ovakvih funkcija, prirodni "priručnik rješenja" poprilično je iscrpan. Učenje iz ovog iscrpnog priručnika i dobivanje inspiracije ili čak izravna primjena načela može biti vrlo učinkovita u pristupu rješavanja raznih kritično globalnih izazova kao što su hrana, voda, domovinska sigurnost, zdravlje stanovništva i čista energija.

#### 3.1. Aerogelovi

Aerogel ultralaki je materijal, sintetski proizveden od gela u kojem je tekuća komponenta zamijenjena plinom. Prozirni je materijal među najlakšim čvrstim tvarima poznatom čovjeku ( $3 \text{ mg/cm}^2$ ) [14]. Nedavno ga je nadmašio još lakši aerografit ( $0,18 \text{ mg/cm}^2$ ) [15] koji pokazuje izvanrednu nisku gustoću i toplinsku vodljivost te nevjerojatnu čvrstoću, s obzirom na njegovu težinu. Pojam *aerogel* prvi je 1932. godine uveo američki znanstvenik i kemijski inženjer Samuel Steven Kistler [16]. Komercijalizacija aerogelova započela je 1942. godine u suradnji s tvrtkom *Monsanto* koja je proizvodila Santocel. *Monsanto* je opisao ovaj proizvod kao lagani, lomljivi, blago opalescentni kruti materijal koji sadrži do 95% zračnog volumena i vrlo je učinkovit toplinski izolacijski materijal.

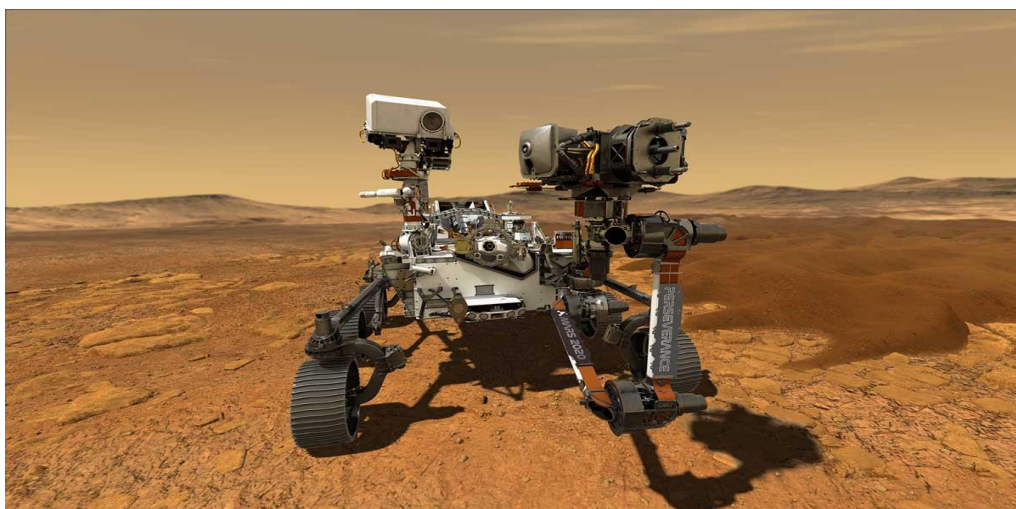


*Slika 3.1. Aerogel [17].*

Unatoč izuzetnoj maloj masi, koja iznosi između 50% i 99% volumena izvornog materijala, aerogel izrazito je strukturno snažan zbog svoje dendritične mikrostrukture. U toj strukturi, koja lomi kraće valne duljine vidljive svjetlosti i daje gelu dimno plavu boju, sferične čestice povezuju se u skupine koje tvore trodimenzionalne, izuzetno porozne fraktalne lance. Budući da su pore, koje su u nanometarskom rasponu, preuske za prolaz zraka, materijal je vrlo učinkovit izolator. Iako se veličina i gustoća pora mogu kontrolirati u procesu proizvodnje, određeni strukturni raspored čini aerogele vrlo krhkima i sklonima lomu.

### **3.1.1. Uporaba aerogelova**

Aerogelovi na bazi silicijevog dioksida korišteni su u raznim praktičnim primjenama u više NASA-inih misija, poput izolacije na vozilu *Mars Rover* ili sakupljača prašine za svemirsko plovilo *Stardust* do komercijalnih proizvoda poput izolacije za zamrzivače.



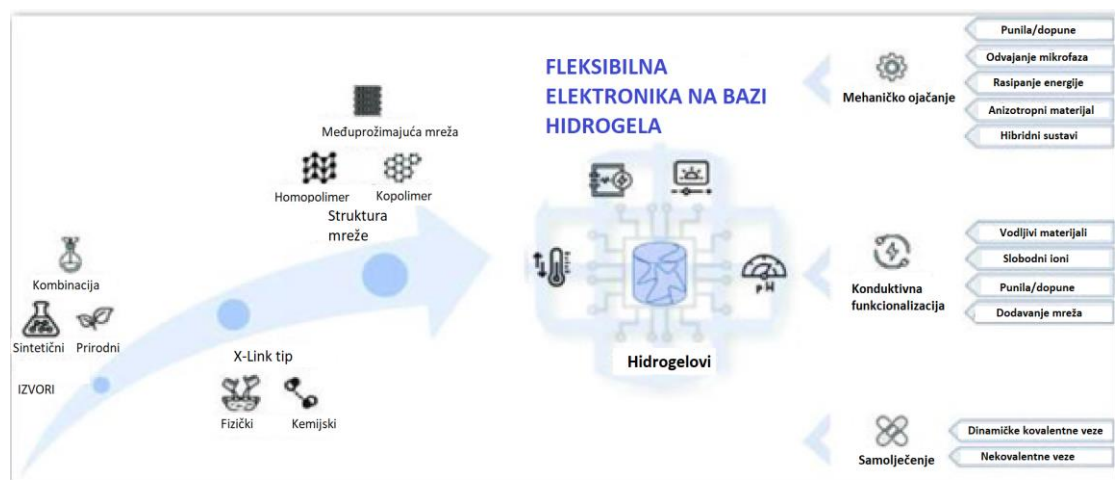
*Slika 3.2. Mars rover na kojem su dijelovi izrađeni od aerogela [18].*

Najčešći tipovi aerogela temelje se na siliciju, ugljiku i metalnim oksidima, pri čemu je silicijev aerogel najviše proučavan i primijenjen. Silikatni aerogelovi izgledaju poput stakla i često se koriste kao izolacija zbog izuzetno niske toplinske vodljivosti [19]. Oni na bazi ugljika crni su i imaju električno provodne sposobnosti zajedno s izuzetno velikom površinom, što ih čini korisnima za superkondenzatore ili gorivne ćelije. Metalno-oksadni aerogelovi mogu biti magnetski, ovisno o dopantima, pokazuju blago različite svijetle boje. Koriste se kao katalizatori u kemijskim reakcijama, proizvodnji eksploziva ili ugljikovih nanocijevi.

### 3.2. Hidrogelovi u elektronici

Hidrogelovi su postali važni za razvoj bioelektronike, koja uključuje integraciju sintetičkih elektroničkih sustava s živim biološkim tkivima. Hidrogelovi blisko oponašaju mehanička, kemijska i optička svojstva bioloških tkiva, čineći ih idealnima za upotrebu u fleksibilnim elektroničkim uređajima. Kao rezultat toga, fleksibilna elektronika temeljena na hidrogelovima može se bolje prilagoditi i povezati s biološkim tkivima i organizmima od tradicionalnih elektroničkih komponenti, koje su često krute, suhe ili nespojive s ljudskim tkivima.

U proteklim godinama fleksibilna elektronika, koja može održati svoju funkcionalnost pod različitim uvjetima kao što su savijanje, preklapanje ili istežanje, doživjela je značajan napredak. Ova se elektronika proširila na širok spektar primjena, uključujući fleksibilne senzore za praćenje fizičkih i kemijskih promjena, uređaje za sakupljanje energije, za pretvaranje mehaničke ili toplinske energije u električnu energiju, fleksibilne uređaje za pohranu energije poput baterija i superkondenzatora, fleksibilne tranzistore i fleksibilne zaslone koji se koriste u pametnim telefonima i nosivim uređajima [20].



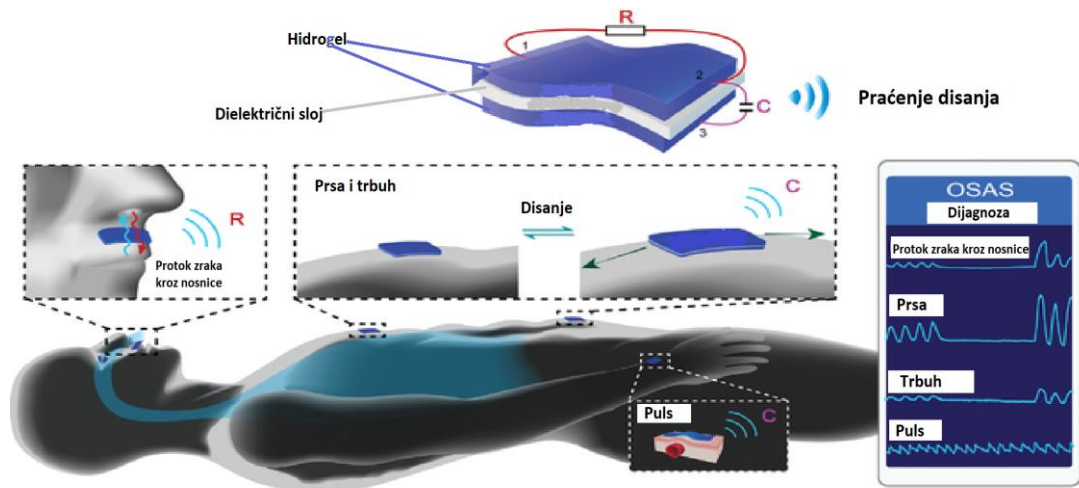
**Slika 3.3.** Pregled hidrogelova i pristupa za poboljšanje njihovih funkcija za fleksibilnu elektrotroniku na bazi hidrogela [21].

Samolijećenje ključni je parametar za elektroničke kože koje mogu imitirati osjećaj dodira i pratiti vitalne znakove. Za ostvarivanje samolijećenja u hidrogelovima istražene su različite metode koje se mogu podijeliti u dvije glavne kategorije. Prva je kategorija temeljena na dinamičkim kovalentnim vezama koje se mogu reverzibilno formirati i prekinuti, a druga kategorija temeljena je na nekovalentnim vezama, kao što su vodikove veze ili ionske interakcije [21].

Nedavna istraživanja u fleksibilnoj elektronici temeljena na hidrogelovima, usmjerena su na prevladavanje njihovih inherentnih ograničenja. Jedno od ograničenja njihova je slaba vodljivost koja otežava tiskanje krugova na hidrogelovima. Drugo ograničenje su njihova smanjena pojedina mehanička svojstva, koja ograničavaju trajnost i mogućnosti hidrogelova u fleksibilnoj elektronici [22]. Za poboljšanje vodljivosti istraživači su eksperimentirali s dodatkom punila ili dopanata, odabirom hidrogelova izrađenih od provodljivih polimera, primjenom dvostruke mreže koja kombinira provodljive i neprovodljive elemente unutar strukture hidrogela. Za poboljšanje mehaničkih svojstava, osim dodavanja punila i dopanata, upotrijebili su platforme za disipaciju energije za učinkovitiju raspodjelu naprezanja te anizotropne materijale koji pokazuju svojstva ovisno o usmjerenju, položaju ili o tome gdje se i kako sila primjenjuje na materijal te su koristili hibridne sustave koji kombiniraju više materijala kako bi postigli bolje rezultate.

### **3.2.1. Uporaba hidrogelova**

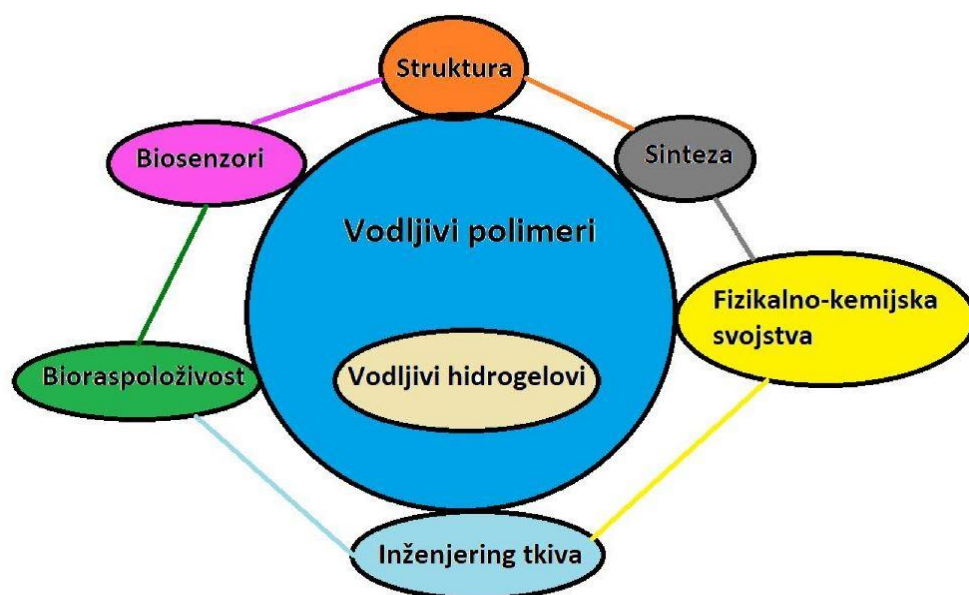
Hidrogelovi počeli su se upotrebljavati u sensorima za kontrolu vlažnosti. Tradicionalni senzori vlažnosti počeli su se suočavati s problemima deformabilnosti, osjetljivosti i prozirnosti, to jest nisu mogli učinkovito sadržavati sva tri svojstva. Stoga je bilo potrebno razviti visokoučinkovite, rastezljive i jeftine senzore vlažnosti. Tako su se počeli izrađivati ultraosjetljivi, prozirni i visoko deformabilni senzori vlažnosti temeljeni na ekonomičnim hidrogelovima s dvostrukom mrežom na bazi poliakrilamida. Zajedno s tim, uvedena je opća metoda za pripremu hidrogelnih filmova kontrolirane debljine kako bi se povećala osjetljivost senzora vlažnosti. Senzori na bazi hidrogelnog filma pokazuju odličnu sposobnost funkcionalnog rada čak i pri rastezanju. Kao dokaz tomu integriramo rastezljivi senzor s posebno dizajniranim bežičnim krugom i maskom kako bismo izradili bežični sustav za detekciju prekida disanja s *bluetooth* prijenosom, omogućujući stvarno vrijeme praćenja zdravstvenog stanja ljudi [23].



Slika 3.4. Bežični nadzor disanja [24].

Hidrogelovi također su postali odlična platforma materijala za tehnologije pohrane energije. Razvoj hidrogelova s poboljšanim fizičkim i kemijskim svojstvima pruža nove mogućnosti za baterije i superkondenzatore.

Proizvodnja električno vodljivih hidrogelova pokrenuta je prije nekoliko desetljeća kako bi se otvorile nove primjene za hidrogelove. Biopolimeri poput celuloze, hitina, alginata i hijaluronske kiseline (HA) inherentno djeluju kao izolatori. Stoga su vodljivi hidrogelovi uglavnom izrađivani kako bi se tijekom ili nakon formiranja hidrogela, u mrežu hidrogela ugradili električki vodljive tvari.



Slika 3.5. Polimeri, hidrogelovi i njihove aplikacije [25].

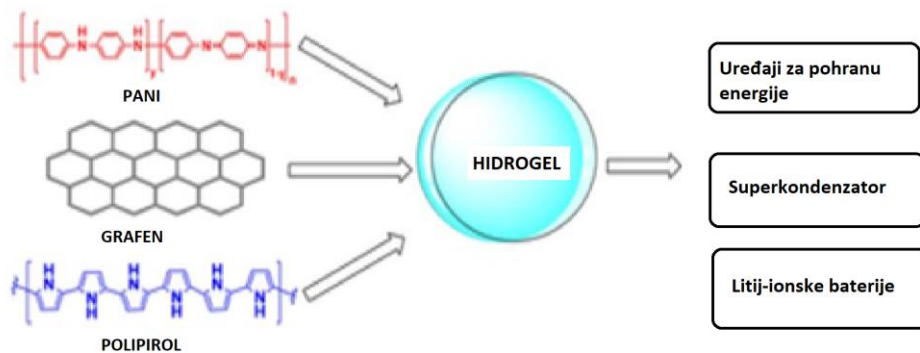


U hidrogelovima koji su samoliječivi, to jest mogu automatski vratiti svoju mehaničku čvrstoću nakon vanjskog oštećenja, i vodljivi su, sposobnost samoliječenja ne ograničava se samo na obnavljanje mehaničkih svojstava već i na obnavljanje električne vodljivosti. Nedavno je samoliječivi hidrogel upotrebljavan kao vezivo za anodu na bazi silicija u litij-ionskim baterijama. Takva je primjena hidrogelova pokazala velik potencijal za očuvanje mehaničke cjelovitosti silicijskih anoda tijekom čestih ciklusa punjenja i pražnjenja u usporedbi s uobičajenim vezivnim sredstvima [26].

Električki vodljive podloge proizvode se uključivanjem vodljivih punila poput metalnih čestica ugljičnih aditiva (crni ugljik, grafen, grafen oksid itd.) i vodljivih polimera. Metalne čestice i ugljični aditivi pokazali su izvanredna mehanička i elektronička svojstva. No, osim brige o troškovima tih punila, dodatne izmjene moraju se provesti na takvim punilima kako bi se poboljšalo ponašanje disperzije u polimernim podlogama. Zbog toga se vodljivi polimeri smatraju novom generacijom vodljivih podloga i pokazuju vrlo sličnu električku vodljivost kao i drugi vodljivi materijali.

Polianilin (PANI) se smatra intrinzički vodljivim polimerom koji se sintetizira kemijskom ili elektrokemijskom polimerizacijom anilina. Polianilin jedan je od najzanimljivijih vodljivih polimera zbog svoje jednostavne sinteze iz vrlo jeftinog monomera, raznovrsnih svojstava i stabilne električke vodljivosti u usporedbi s drugim polimerima. Anilin je poznat već desetljećima i dobiva se iz fosilnih sirovina te se koristi za bojanje pamučnih tkanina. Elektrokemijska polimerizacija anilina odvija se na elektrodi koja je izrađena od inertnog provodnog supstrata u vodenom rastvoru niske pH-vrijednosti. Iako kemijska polimerizacija koristi različite oksidanse, lanac polianilina električki je provodljiv samo kada je omjer reducirane fenilediaminske jedinice i oksidirane kinonske jedinice 1:1.

Polimerizacija pirola, kojom se dobije polipirol (Ppy), može se izvesti kemijskom oksidacijom ili elektrokemijski. Polipirol zahtijeva doping sredstvo kako bi se povećala električna vodljivost. Nedavno je otkrivena jednostavna pretvorba obnovljivog furfurala u pirol s prinosom od 75% pa se stoga polipirol također smatra potencijalnim obnovljivim polimerom [27].



*Slika 3.6. Primjene polianilina, polipirola i grafena [28].*

Superkondenzatori na bazi hidrogela uređaji su koji se koriste za pohranjivanje energije. Takvi kondenzatori kombiniraju svojstva hidrogelova sa svojstvima superkondenzatora. Ovakvi uređaji nude jedinstvene prednosti u pogledu fleksibilnosti, biokompatibilnosti i ekološke održivosti.

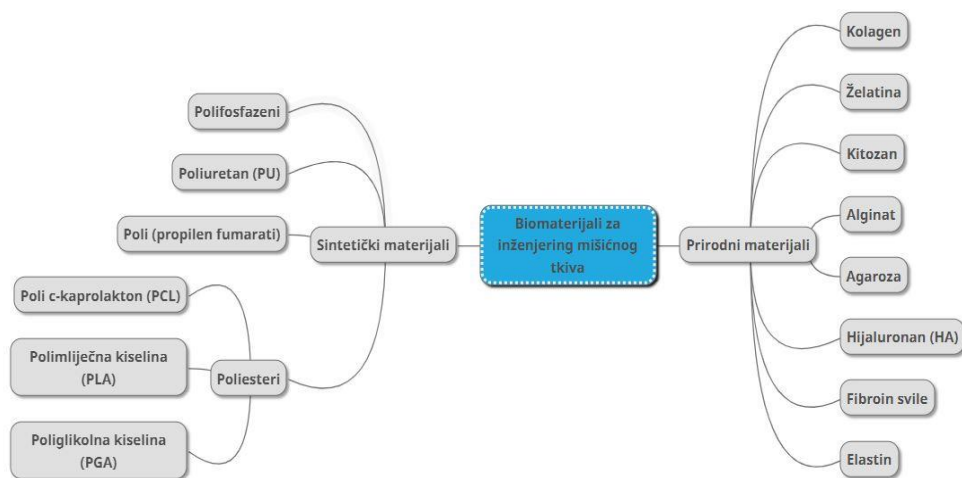
Superkondenzatori na bazi hidrogela uobičajeno imaju veći kapacitet pohrane energije u usporedbi s običnim kondenzatorima. Dok tradicionalni kondenzatori pohranjuju energiju odvajanjem naboja na metalnim pločama, superkondenzatori koriste elektrodu velike površine i elektrolit za pohranu energije. Ovi superkondenzatori na bazi hidrogela često imaju još veće površine, što im omogućuje pohranjivanje više energije po jedinici volumena. Osim toga, mogu vrlo brzo isporučiti veliku izlaznu snagu. Zbog toga se primjenjuju u situacijama koje zahtijevaju nagle poraste energije, poput kočenja u električnim vozilima ili osiguravanje energije tijekom iznenadnih prekida napajanja. Zbog njihove fleksibilnosti, koriste se u elektronici (pametni satovi, pametne naočale itd.) i ostalim uređajima koji se trebaju prilagoditi zakrivljenim ili nepravilnim površinama [29].

### **3.3. Biomimetički materijal u medicini**

Materijali koji imitiraju prirodu, poznati kao biomimetički biomaterijali, nalaze primjenu u području biomedicine, posebno u inženjeringu tkiva i bioraspoloživosti. Služe kao zaštitni implantati ili njihove komponente, koje pomažu u obnovi oštećenog tkiva ili potiču rast tkiva [30]. U prošlosti su medicinske primjene više preferirale inertne materijale poput metalnih tvari u ortopediji ili silikona za implantate dojki. Međutim, percepcija se idealnog biomaterijala

promijenila, s obzirom na to da ti materijali nemaju interakciju s okolinom tijela, uključujući tkiva i tekućine. Pojava razgradivih biomaterijala donijela je značajan napredak u istraživačkim područjima poput inženjeringa tkiva u ljudskom tijelu. Polimeri koji se razgrađuju, uobičajeno poznati kao biorazgradivi biomaterijali, poliesteri su koji su prvi korisni biorazgradivi biomaterijali. Kao rezultat razgradnje, oni se pretvaraju u manje dijelove (mliječnu kiselinu i glikolnu kiselinu) [31].

Prva je linija liječenja mišićno-koštanih defekata autograft (uzeto od pacijenta) i alograft (uzeto od drugih pacijenata). Iako ovaj terapijski pristup ima izvrsne prednosti, također postoje nedostaci poput ograničenog pristupa autotransplantatima i prijenos bolesti u slučaju alografta [32]. Mnogi pomaci napravljeni su u području biomaterijala i biomaterijalnih metoda za stvaranje inženjerskih presađaka za popravak oštećenih mišićno-koštanih tkiva i njihovu rekonstrukciju. S obzirom da tkiva mišićno-koštanih sustava imaju različite mehaničke karakteristike, kako bi se imitirala ta svojstva, razvijeni su razni biomaterijali s različitim mehaničkim i fizikalnim svojstvima. Na slici 3.7. su prikazani češći biomaterijali koji se koriste u inženjeringu mišićno-koštanih tkiva.



**Slika 3.7.** Biomedicinski materijali koji se koriste u inženjeringu mišićno-koštanog tkiva, uključujući prirodne i sintetičke materijale [33].

Jedan od značajnih izazova u terapiji mišićno-koštanog sustava popravak je problema s hrskavičnim tkivom, jer je sposobnost regeneracije oštećenog hrskavičnog tkiva ograničena. Jedan od glavnih načina rješavanja tog problema korištenje je biomaterijala. Hrskavično tkivo, poput ostalih tkiva u mišićno-koštanom sustavu, također zahtijeva korištenje biomaterijala s

određenim karakteristikama. Biokompatibilnost, biorazgradivost, podrška za staničnu proliferaciju i diferencijaciju, sposobnost prijenosa plinova, hranjivih tvari i otpadnih materijala te posjedovanje odgovarajućih mehaničkih svojstava među karakteristikama koje su potrebne da se biomaterijali koriste u inženjeringu hrskavičnog tkiva [34]. Istraživači u inženjeringu hrskavičnog tkiva koriste različite prirode materijale poput glikozaminoglikana (GAG), polisaharida, različitih proteina, kao i sintetičke materijale iz poli(laktičko-koglikolno)kiselina (PLGA) obitelji poliestera [35].

### **3.3.1. Biomimetički materijali za mišićno-koštano tkivo.**

Elastični biomaterijali, kada je riječ o mehaničkim svojstvima, meniskus, tetiva i ligament smatraju se elastičnim tkivima u mišićno-koštanom sustavu. Ta tkiva imaju slab vaskularni sustav pa su potrebe za kisikom i hranjivim tvarima za njihov oporavak i regeneraciju manje u usporedbi s drugim tkivima. Zbog niske sposobnosti oporavka, u slučaju ozljede potrebni su kirurški zahvati, uključujući autograftove i alograftove [36]. Stoga inženjering biomaterijala zbog ograničenja ovih metoda, poput neuspjeha presatka, za ta tkiva postaje obećavajuća metoda.

Tvrđi biomaterijali upotrebljavaju se za obnovu ili inženjering koštanog tkiva, koje je značajna komponenta mišićno-koštanog tkiva sustava. U različitim ortopedskim postupcima koriste se različiti materijali s njihovim specifičnim prednostima i nedostacima. Prvi tvrđi biomaterijali koji su se koristili u tvrdim tkivima bili su keramika i biostakla [37,38]. Različite kombinacije kalcija i fosfata proučavane su za ortopedске primjene, kao što je koštani cement [39]. Od različitih poznatih vrsta kalcijevog fosfata, hidroksiapatit bio je posebno istaknut.

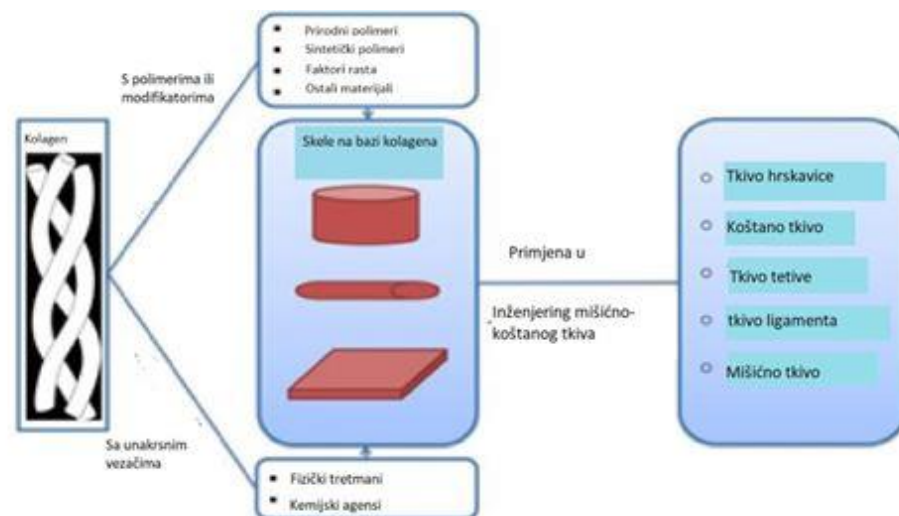
Mekani biomaterijali koji sadrže neke prirodne i sintetičke biomaterijale korišteni su za izgradnju struktura namijenjenih mekim tkivima mišićno-koštanog sustava, poput mišića i hrskavice. Uobičajeni prirodni materijali koji se koriste za meka tkiva mišićno-koštanog sustava uključuju kolagen, želatin, hijaluronsku kiselinu, kitozan i matrice bez stanica [40]. Konkretno, hidrogelne i spužne strukture napravljene od alginata, agaroze, kolagena, hijalurona, fibrinskog gela, poliglikolne kiseline i polimljične kiseline koriste se u inženjeringu hrskavičnog tkiva [41].

Prirodni polimeri za inženjering mišićno-koštanog i hrskavičnog tkiva intenzivno se koriste u inženjeringu tkiva zbog biokompatibilnosti, enzimske razgradnje i sposobnosti konjugiranja s različitim čimbenicima, poput čimbenika rasta [42]. Naravno, prednost je ako se stupanj enzimske razgradnje polimera kontrolira; inače, dolazi do nedostatka prirodnih polimera [43]. Širok raspon prirodnih polimera (bioloških polimera), uključujući kolagen, želatinu, kitozan, alginat, agarozu, hijaluronska kiselina (HA), fibroin svile, elastin, matrigel, acelularni matriks i neki drugi biološki

materijali koriste se u inženjeru mišićno-koštanog tkiva, uključujući kost, tetivu, meniskus, mišić i hrskavicu.

### 3.3.2. Prirodni polimeri u medicini

Kolagen zbog svojih mnogih RGD ostataka (arginina, asparaginske kiseline i glicina), može povećati prianjanje stanica i također pomoći u diferencijaciji stanica prekursora u stanice koje tvore kost [44]. Budući da kolagenski okviri imaju izvrsna svojstva kao što su biokompatibilnost, biodegradabilnost, niska imugenost, porozna struktura i dobra propusnost, široko se koriste u inženjeru mišićno-koštanog tkiva.



*Slika 3.8. Skele na bazi kolagena u inženjeru mišićno-koštanog tkiva [33].*

Želatina kao biokompatibilni i biorazgradivi polimer na bazi proteina nastaje razgradnjom kolagena. Želatina je, zbog bioaktivnih motiva (peptida L-arginina, glicina i L-asparaginske kiseline (RGD)), koristan polimer za poboljšanje prianjanja na površinu stanica. Topljiva priroda želatine u vodenom okruženju ljudskog tijela (oko 37°C) jedno je od ograničenja korištenja želatine u tkivnom inženjerstvu. Kovalentno umrežavanje u kemijski umreženim vlaknima može poboljšati mehanička svojstva i stabilnost želatine. Hidrogelovi okviri, koji su temeljeni na kolagenu i želatini privukli su veliku pažnju u regenerativnoj medicini [45].

Kitozan kao antimikrobni polimer koji potječe od hitina linearni je polisaharid. Komponente su kitozana glikozamin i N-acetilflukozamin. Ovaj prirodni polimer zbog svojih izvrsnih svojstava kao što su biokompatibilnost i biorazgradivost smatra se također korisnim biomaterijalom u inženjeru tkiva. Kitozan je privukao velik interes zbog svoje sličnosti s

glavnim dijelom prirodne ekstracelularne matrice (ECM) hrskavice i kosti (glikozaminoglikanom) [46].

Alginat je još jedan prirodni polisaharid koji se ekstraktira iz smeđih morskih algi i sastoji se od povezanih  $\beta$ -D-manuronata (M) i  $\alpha$ -L-guluronata (G) [47]. U posljednjim godinama razvijena je nova tehnika za izradu homogenih hidrogelova na bazi alginata. Hidrogelovi na bazi alginata široko se koriste u inženjeringu hrskavice [48].

Agaroz je prirodni, proziran i neutralno nabijen polisaharid koji se koristi široko u inženjeringu hrskavičnog tkiva. Također, ovaj se polimer primjenjuje kao skelet za autolognu implantaciju hondrocita. U više istraživanje je pokazano da agarozni hidrogel može biti mehanički pogodan za dugotrajno uzgajanje hondrocita [49]. Zbog slabe adhezije ćelija, niske proliferacije ćelija i male integracije transplantata s tkivom domaćina, kombinacija agaroze s drugim polimerima poput želatine i kitozana mogla biti bolji izbor.

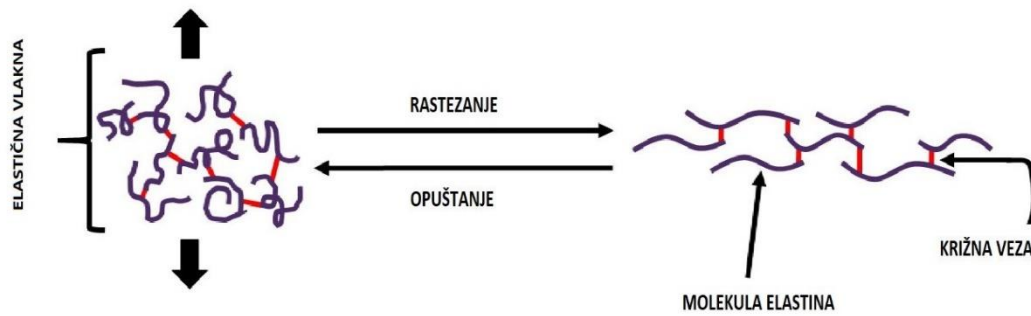
Hijaluronan (HA) je poznat kao anionski polisaharid koji je obilno proučavan radi poboljšanja obnove hrskavice. Zbog loših mehaničkih svojstava, čak i nakon umrežavanja, ne može se koristiti samostalno za izradu nosivih struktura. Za ispis 3D struktura, HA se obično funkcionalizira pomoću UV-otvrdljivih metakrilata [50].

Fibroin svile kao prirodni vlaknasti protein posjeduje neka svojstva. Na primjer, biokompatibilnost, biorazgradivost, prilagodljive mehaničke karakteristike i mogućnost oblikovanja u različite formate (hidrogel, film, vlakna, porozni skelet, itd.), što je čini pogodnom za inženjeringom tkiva. Također, sličnost svilenog hidrogela s ECM-om dovodi do obećavajućih rezultata u području inženjeringa tkiva. Fibroin se svile koristi kao skelet za inženjering hrskavice, kostiju i ligamenata [51].



*Slika 3.9. Shematski prikaz različitih aplikacija fibroina svile [52].*

Elastin je drugi dio ekstracelularne matrice (ECM) koji je odgovoran za elastičnost u mnogim živim tkivima. Elastin je obilat u nekim tkivima mišićno-koštanog sustava i elastične hrskavice. Budući da je 50% elastičnih ligamenata i 4% tetiva sačinjeno od elastina, ovaj se protein koristi u istraživanjima koja se odnose na ligamente i tetivna tkiva [53].



*Slika 3.10. Struktura elastina [54].*

## 4. Pravci razvoja i mogućnost recikliranja biomimetičkih materijala.

Posljednjih je godina područje biomimetike svjedočilo značajnom porastu interesa i inovacija te novih načina pristupa prema znanosti o materijalima i inženjerstvu. Od samoizlječivih polimera nadahnutim regenerativnim svojstvima živih bića do vrlo laganih kompozita oblikovanih prema strukturnoj učinkovitosti biljaka i životinja, biomimetički materijali imaju potencijal za poboljšanje života i stanja na zemlji.

I dalje traju istraživanja za poboljšanje kompatibilnosti krvi i tkiva različitih medicinskih uređaja koristeći biomimetičke materijale. Neki su od ovih uređaja odobreni od strane organizacije i koriste se klinički kako bi se poboljšala kvaliteta života pacijenata. Također, tu teži i njihov daljnji razvoj.

### 4.1.1. Kardiovaskularni uređaji

Većina kardiovaskularnih medicinskih uređaja koristi se u okruženju u kojem su u dugotrajnom kontaktu s krvlju. Stoga je vrlo važno spriječiti zgrušavanje krvi, a to se postiže kombiniranom primjenom antikoagulantne terapije. Koronarni stent medicinski je uređaj koji koristi metalne niti kako bi se održala prohodnost stanjenog dijela žile [55]. Njime se obavlja endovaskularni tretman. Koronarni se stent postavlja na unaprijed određeno mjesto putem katetera pričvršćenog za vodilicu iz krvne žile bedra. Kada se razvio, prvi stent bio je obložen metalnom presvlakom. Međutim, s napretkom tehnologije površina se prekrila polimerima (stent s polimerskom presvlakom), a sada se uključuje sloj polimera s lijekovima. Sloj polimera s lijekovima djeluje kao spremnik za lijekove koji sprječavaju stvaranje tromba odmah nakon postavljanja i zadebljanje krvnih žila.



*Slika 4.1. Kardiovaskularni implantabilni uređaj [56].*

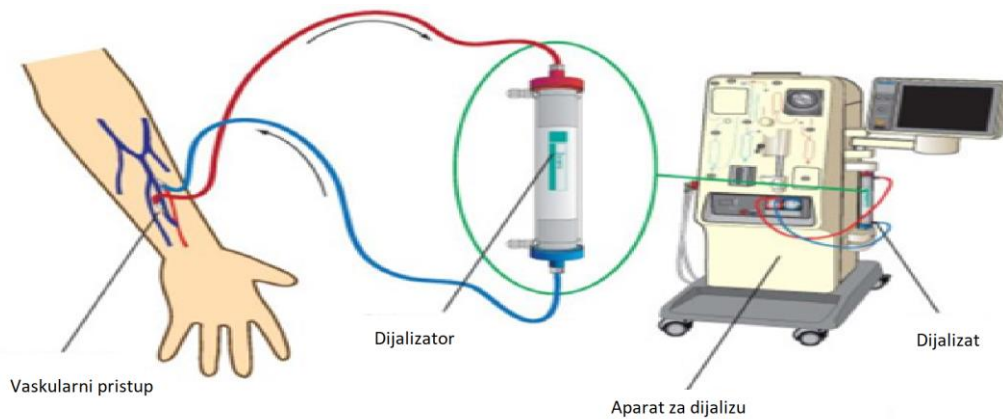


#### **4.1.2. Cerebrovaskularni uređaj**

Cerebralni aneurizmi mogu dovesti do subarahnoidnog krvarenja, što je stanje opasno po život. Ovisno o veličini aneurizme, metode liječenja uključuju pričvršćivanje aneurizme izravno putem kraniotomije ili umetanje metalne spirale kroz kateter kako bi se formirao tromb unutar aneurizme, čime se smanjuje arterijski tlak i sprječava puknuće. Međutim, pričvršćivanjem putem kraniotomije visoko je invazivan postupak, a liječenje sa spiralnom embolizacijom ima nuspojave, kao što je niska stopa zacjeljivanja kod otprilike 20% slučajeva [57]. Stoga je razvijen novi uređaj za liječenje, sustav za usmjeravanje protoka koji primjenjuje tehnologiju stenta. To uključuje umetanje i implantaciju metalnog stenta na zahvaćeno područje. Značajno smanjuje protok krvi u cerebralni aneurizam, istovremeno održavajući protok krvi u arteriji i potičući formiranje tromba od nakupljene krvi unutar aneurizme kako bi se aneurizma zatvorila [58].

#### **4.1.3. Uređaji za pročišćavanje krvi**

Polimerni biomaterijali ključni su u tehnologiji koja se koristi za razdvajanje krvi koja izdvaja korisne komponente. Hemodijaliza tretman je koji produljuje život pacijentima s bubrežnim zatajenjem. Nedavno je uvedena terapija pročišćavanja krvi visoke kvalitete koja kombinira postupke razdvajanja dijalize i filtracije [59]. U 1970-ima glavni materijali koji su se koristili bili su celulozni materijali kao što su prirodni polimeri. Kasnije se smatralo važnim uklanjanje proteina niske molekularne mase, kao što je  $\beta$ 2-mikroglobulin i niskomolekularnih tvari, poput kreatinina, iz krvi kako bi se smanjila stopa smrtnosti sindroma karpalnog tunela uzrokovanih dugotrajnim tretmanom hemodijalize. Došlo je do promjene u materijalima za separaciju, počeli su se koristiti materijali na bazi polisulfona koji lako mogu proizvesti permeabilne porozne membrane [60]. Budući da je polisulfon hidrofobni polimer, miješa se s hidrofilnim polimerom pri proizvodnji šupljih vlakana koji se koriste u hemodijalizi. Time se poboljšava hidrofilnost površine šupljih vlakana. Poli(N-vinilpirolidon) (PVPy) često se koristi kao hidrofilni polimer [61,62].



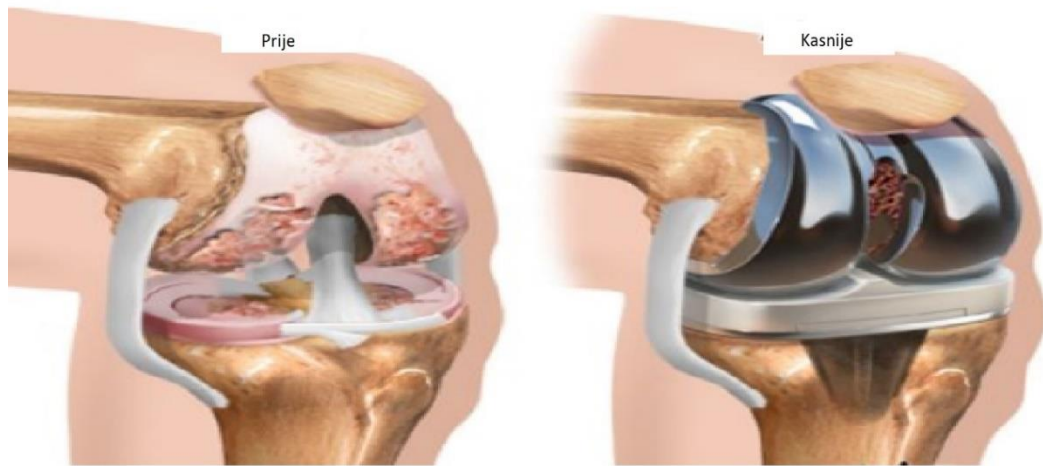
*Slika 4.2. Uređaj za pročišćavanje krvi [63].*

Kako bi se dalje razvili nosivi uređaji za pročišćavanje krvi, istraživanja su provedena na biohibridnim umjetnim bubrezima, na kojima su slojevi stanica bubrega i slojevi vaskularnih endotelijalnih stanica konstruirani na površini membrane [64]. Međutim, primjena novih membranskih materijala u medicinskim uređajima koji se koriste za terapiju pročišćavanja krvi trenutno su na čekanju zbog medicinsko-ekonomske perspektive i visokih troškova kontrole kvalitete tijekom proizvodnje.

#### **4.1.4. Ortopedski uređaji**

Ortopedska kirurgija više je puta koristila umjetne materijale kako bi zamijenila biološka tkiva čije su funkcije narušene. Metalni medicinski uređaji, kao što su pločice za popravljavanje kostiju i vijci, korišteni su za imobilizaciju zahvaćenog dijela i pomoć u funkcionalnoj obnovi kosti nakon prijeloma [65]. Umjetni zglobovi također su važni medicinski uređaji koji mogu dramatično poboljšati pokretne funkcije pacijenata i već se koriste za poboljšanje funkcija umjetnih zglobova koljena, ramena, kuka i prstiju. Sastoje se od metalnih dijelova za pričvršćivanje kosti i polimernih dijelova za stvaranje klizećih površina, koristeći prednosti njihovih materijalnih svojstava. Kako zamjena zgloba kirurškim zahvatom trenutno poboljšava mobilnost pacijenta, svake se godine izvede tisuće ovakvih operacija. Legure kobalt-kroma i nehrđajućeg čelika, koje imaju veliki afinitet prema prirodnim kostima, korištene su za metalne dijelove. U posljednje su se vrijeme također počele koristiti legure titanija i materijali poprskanim hidroksapatitom, komponentom kosti, kako bi se povećao afinitet s kostima [66]. Iako je napravljen bitan napredak u materijalima za imobilizaciju kostiju, učinkovito razdoblje liječenja umjetne zamjene zgloba procjenjuje se na približno 10 godina. Resorpcija i osteoliza oko koštanog

tkiva mogu imobilizirati zglobnu protezu, što dovodi do gubitka mehaničkih fiksacija ili popuštanja [67].



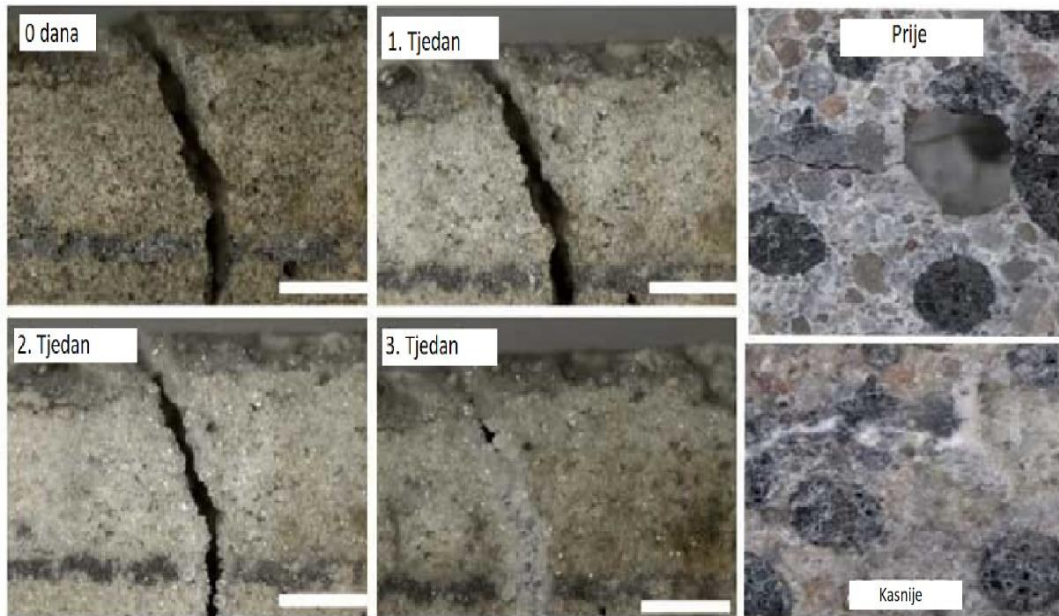
*Slika 4.3. Zamjena zgloba koljena [68].*

#### **4.1.5. Bio-beton**

Beton jedan je od najvažnijih materijala u građevini. Nakon vode, to je najkorišteniji materijal na planeti Zemlji. Beton je uglavnom mješavina vode, cementa i agregata (krupnog ili sitnog). Lako ga je lijevati u željene oblike i veličine što ga čini najboljim izborom materijala u mnogim primjenama. Usprkos tome, također omogućuje prodor agresivnih kemikalija u strukturu i to dovodi do pucanja i smanjenja trajnosti.

Bio-beton samoregenerirajući je beton koji se proizvodi ispuštanjem kemijskih signala (poruke koje se prenose kemosenzornim modalitetima) u pukotine betona, što potom poboljšava autonomno zacjeljivanje. Bio-beton razvijen je kao rezultat pukotina u betonu koje su otvorile put za štetne tvari poput ugljikovog dioksida, klorida te vode i kisika da dođu do čeličnih ojačanja, uzrokujući koroziju, što na kraju dovodi do propadanja betona [69].

U procesu zacjeljivanja pukotina stvaraju se bakterije. To su posebne bakterije koje imaju sposobnost proizvodnje vapnenca i smole. Mogu se primijeniti za formiranje pukotina ili za popunjavanje pukotina i praznina kako bi se stvorio vapnenac i zatvorio pukotinu. Beton je obično izložen vrlo "neprijateljskom" okolišu. Stoga, bakterije koje se koriste mogu preživjeti u teškim uvjetima okoliša s visokim alkalnim pH, istovremeno proizvodeći vapnenac [70].

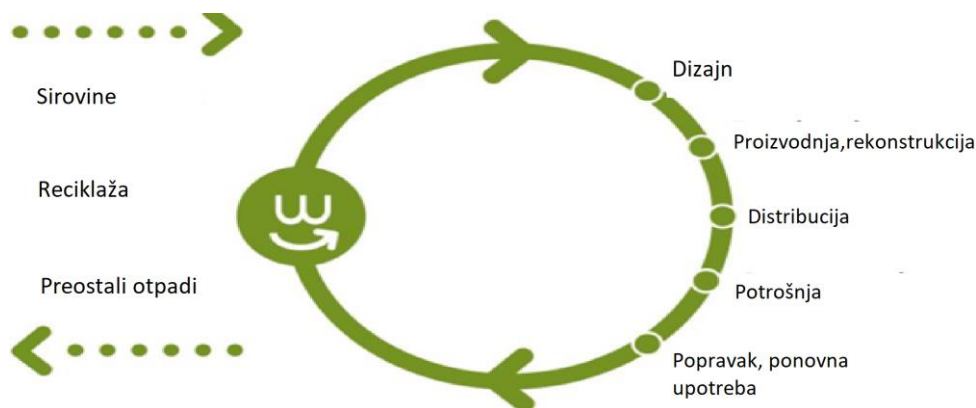


*Slika 4.4. Zacjeljivanje betona [71].*

## 4.2. Recikliranje biomimetičkih materijala

Što se tiče mogućnosti recikliranja biomimetičkih materijala, ideja je promicati smanjenje otpada s optimalnim iskorištavanjem resursa. Tu nam dolazi biomimetika čiji se pristup temelji na inspiraciji iz prirode za razvijanje inovativnih rješenja i održivih materijala. Nije dovoljno samo razvijati biomimetičke materijale, nego je također potrebno razmisliti i o tome kako ih možemo reciklirati ili ponovno upotrijebiti.

Poveznica između biomimikrije i kružnog gospodarstva spoznaja je da u prirodi nema otpada. Biomimikrija nudi rješenje za ovaj kružni prijelaz jer nas izaziva da preispitamo način na koji proizvodimo, konzumiramo i pravimo proizvode. Oponašanjem zatvorenih sustava u prirodi, industrija se može koristiti kao snaga za dobrobit, ona koja donosi ekonomsku, ekološku i okolišnu vrijednost te eliminira koncept otpada kako bi postao regenerativan sam po sebi. Kako bi se to postiglo, potrebno je razmišljanje o sustavima s različitim sudionicima kružnog gospodarstva. Biomimikrija također zahtijeva važne sudionike iz različitih multidisciplinarnih sektora kako bi surađivali i zajedno inovirali rješenja.



*Slika 4.5. Osnovna ilustracija modela kružnog gospodarstva [72].*

Na primjer, kako bi se stvorile solarne ćelije koje oponašaju lišće kako bi se povećala energetska učinkovitost i potrošnja, stručnjaci poput inženjera, dizajnera proizvoda i fizičara surađivali su s ekolozima i botaničarima, stručnjacima za morfologiju lišća. Takva se suradnja pokazala ključnom u izradi solarnih ćelija koje oponašaju lišće koje proizvode 47% više električne energije [73].

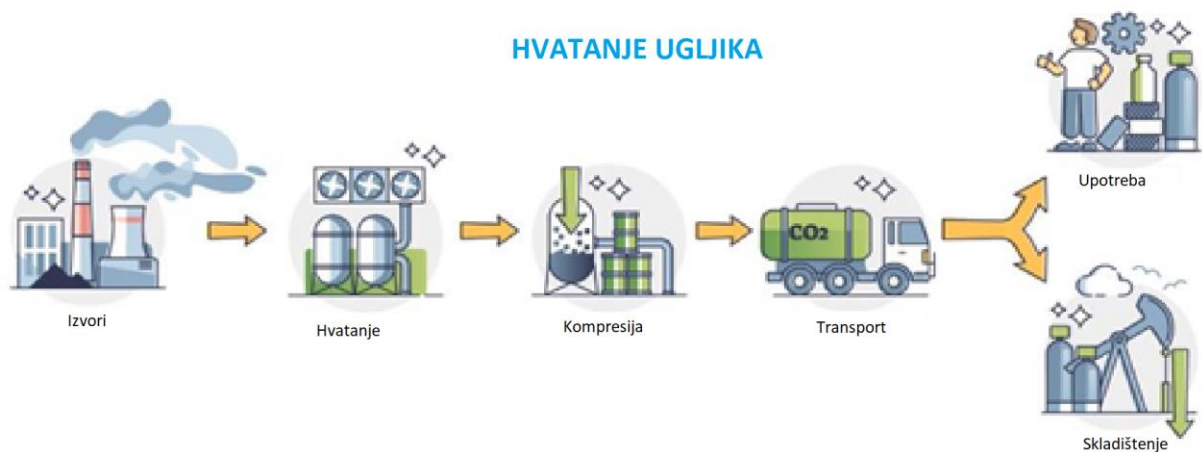
Biomimikrija ne znači samo dizajn koji izgleda poput prirode, već ima i funkcionalnost koje posjeduju organizmi, procesi i sustavi koji im pomažu napredovati.

Kao što vidimo u prirodi, ptice u jatima često lete u obliku slova V. Razlog tomu je to što kada mašu krilima stvaraju uzlazni tok energije za sljedeću pticu u jatu, što pomaže toj ptici smanjiti količinu energije koju troši na letenje. Na isti su način istraživači otkrili da ako bi naši zrakoplovi slijedili takav oblik inspiriran prirodom, smanjio bi se otpor zraka tijekom leta, a s time i potrošnja goriva za 15% [74], pružajući način kako bismo smanjili štetne emisije.



*Slika 4.6. Struktura leta jata ptica [75].*

U prirodi nema otpada. Sve je hranjiva tvar ili resurs koji se beskonačno reciklira ili ponovno koristi. Na primjer, koralji oslobađaju ugljikov dioksid kao dio svog metaboličkog procesa. Umjesto da troši ovaj ugljikov dioksid, koralj ponovno apsorbira ovaj ugljik u zatvorenom prostoru točno iznad svog postojećeg kostura i koristi ga kao građevinski materijal za svoj egzoskelet. Nadahnuti ovim procesom, graditelji i inženjeri sada razmatraju mogućnost apsorpcije ugljikovog dioksida iz naše atmosfere kako bi zatim razvili građevinske materijale koji se mogu koristiti u konstrukciji i infrastrukturi industrije [76].



*Slika 4.7. Ilustracija hvatanja ugljika [77].*

Jedan od najboljih primjera korištenja nadahnuća prirode za ponovno stvaranje prirodnih sustava uz istodobno poticanje rasta, turizma i razvoja jesu „Vrtovi uz Zaljev“ u Singapuru. Ovi vrtovi oživljavaju viziju Singapura kako bi postao globalni grad koji je lider u upravljanju okolišem i očuvanju prirode. Ovi se objekti sastoje od 18 “Superstabala“ koji sami izgledaju kao drveće, ali istovremeno pomažu drveću u rastu. Ova se stabla sastoje od preko 226 000 različitih biljaka, uključujući egzotične vrste koje stvaraju i obnavljaju stanište divljim životinjama kako bi preživjeli usred grada. Osim svojih koristi za očuvanje, stabla također imaju druge značajke poput fotonaponskih ćelija koje apsorbiraju sunčevu energiju i prikupljaju kišnicu što smanjuje potrebu za redovitim zalijevanjem [78].



*Slika 4.8. Vrtovi uz zaljev, Singapur [79].*

Biomimikrija nije samo nova tehnologija ili vrsta proizvoda. To je pristup rješavanju problema koji gleda na prirodu kao na nešto što može pružiti rješenje usredotočujući se na sustave za koje je dokazano da napreduju i imaju potencijal promijeniti način na koje naše društvo funkcionira. To je skup starih i novih metoda koje mogu voditi ljude prema uravnoteženijoj potrošnji i proizvodnji kroz stalno istraživanje i inovacije.

## 5. Zaključak

Biomimetika se, gledana kao znanost koja iz prirode uzima inspiraciju za razvoj novih materijala i naprednih tehnologija, pokazala vrlo perspektivnom i važnom disciplinom. Osnove i ciljevi biomimetike prikazuju temelj za razumijevanje potreba i težnji da se stvore i razviju materijali s najboljim mogućim svojstvima i karakteristikama, većim stupnjem kompatibilnosti s okolišem i većom održivosti.

Kroz povijest, prikazane su različite primjene biomimetičkih materijala u različitim područjima i znanostima te kako su ljudi adaptirali te materijale za vlastite potrebe i iskoristili ih za dobrobit čovječanstva.

Kroz analizu razvoja biomimetičkih materijala, njihove primjene, osnove i ciljeva te recikliranja saznali smo da postoji duboka povezanost između tehnologije i prirode. Biomimetički materijali karakteriziraju poveznicu između inovativnih tehničkih rješenja i bioloških uzora, pružajući priliku za nastavak stvaranja bolje budućnosti i očuvanje planeta Zemlje.

Osim bogatstva funkcija i prirodnih oblika koji se stvaraju ovom disciplinom, također postoje beskrajne mogućnosti razvoja te nas ova disciplina uči i inspirira da se koristimo najboljim iz prirode kako bismo stvorili napredak i inovacije u razvoju suvremenih materijala.



## Literatura

- [1] <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/> (Kolovoz 2023.)
- [2] Bharat Bhusan, Biomimetics - Journals, Phil. Trans. R. Soc. A (2009) 367, 1443–1444.
- [3] <https://carnegiemnh.org/biomimicry-is-real-world-inspiration/> (Kolovoz 2023.)
- [4] <https://ehistory.osu.edu/exhibitions/biomimicry-a-history> (Kolovoz 2023.)
- [5] <https://mythopedia.com/topics/lu-ban> (Kolovoz 2023.)
- [6] <https://ehistory.osu.edu/exhibitions/biomimicry-a-history> (Kolovoz 2023.)
- [7] <https://parametric-architecture.com/nature-inspired-design-biomimicry-in-architecture/> (Kolovoz 2023.)
- [8] <https://www.everything47.com/design/velcro/> (Kolovoz 2023.)
- [9] Reinhard Lipowsky, MPI of Colloids and Interfaces, Biomimetic Materials and Transport Systems, <https://www.mpikg.mpg.de/rl/P/archive/186.pdf> (Kolovoz 2023.)
- [10] T. Filetin , I. Žmak, H. Ivanković: Biomimetički materijali i proizvodi, s. 141-166.
- [11] Bhushan, B. Biomimetics: lessons from nature - an overview. Philos. Trans. R. Soc., A 2009, 367, 1445–1486.
- [12] Lepora, N. F.; Verschure, P.; Prescott, T. J. The state of the art in biomimetics. Bioinspiration Biomimetics 2013, 8, 013001.
- [13] Wegst, U. G. K.; Bai, H.; Saiz, E.; Tomsia, A. P.; Ritchie, R. O. Bioinspired structural materials. Nat. Mater. 2015, 14, 23–36.
- [14] M. Mecklenburg, A. Schuchardt, Y. K. Mishra, S. Kaps, R. Adelung, A. Lotnyk, L. Kienle, K. Schulte, “Aerographite: Ultra Lightweight, Flexible Nanowall, Carbon Microtube Material with Outstanding Mechanical Performance”. In: Advanced Materials 24 (26), pp- 3486 – 3490, 2012.
- [15] Michael A. Aegerter, Nicholas Leventis, Matthias M. Koebel (Eds.), „Aerogels Handbook“ (London: Springer, 2011), p. 3.

- [16] Klassen Filiz, „Material Innovations: transparent, lightweight, malleable & responsive“. In: Klassen Filiz and Robert Kronenburg (Eds.), „Transportable Environments 3“ (London: Spon Press, 2006), pp. 122 – 125.
- [17] <https://materiability.com/portfolio/aerogels/> (Kolovoz 2023.)
- [18] <https://mars.nasa.gov/mars2020/> (Kolovoz 2023.)
- [19] Silvia Leydecker, „Nano Materials“ (Basel: Birkäuser, 2006), p. 130.
- [20] Zhongguo Wang, Xiong-Fei Zhang, Lian Shu, Jianfeng Yao, Construction of MXene functionalized wood-based hydrogels using ZnCl<sub>2</sub> aqueous solution for flexible electronics, Journal of Materials Chemistry A, 10.1039/D3TA01370G, 11, 19, (10337-10345), (2023).
- [21] <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=62782.php> (Kolovoz 2023.)
- [22] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22681979/> (Kolovoz 2023.)
- [23] <https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-022-00934-1> (Kolovoz 2023.)
- [24] [https://www.researchgate.net/publication/362166425\\_Multimodal\\_Hydrogel-Based\\_Respiratory\\_Monitoring\\_System\\_for\\_Diagnosing\\_Obstructive\\_Sleep\\_Apnea\\_Syndrome/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/362166425_Multimodal_Hydrogel-Based_Respiratory_Monitoring_System_for_Diagnosing_Obstructive_Sleep_Apnea_Syndrome/figures?lo=1) (Koloboz 2023.)
- [25] <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/2/350> (Kolovoz 2023.)
- [26] Xuguan Cao, Chengming Jiang, Nan Sun, Dongchen Tan, Qikun Li, Sheng Bi, Jinhiu Song, Recent progress in multifunctional hydrogel-based supercapacitors, Available online 11 June 2021.
- [27] Ahmed Ali Nada, Anita Eckstein Andicsova, Jaroslav Mosnaček, Irreversible and Self-healing Electrically Conductive Hydrogels Made of Bio-Based Polymers, Published online 2022 Jan 13.
- [28] <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/slct.201702515> (Kolovoz 2023.)
- [29] <https://encyclopedia.pub/entry/43567> (Kolovoz 2023.)
- [30] Basu B, Katti DS, Kumar A. Advanced biomaterials: fundamentals, processing, and applications: John Wiley & Sons; 2010.

- [31] Gilding D, Reed A. Biodegradable polymers for use in surgery—polyglycolic/poly (actic acid) homo-and copolymers: 1. *Polymer*. 1979;20(12):1459–64.
- [32] Delloye C, et al. Bone allografts: what they can offer and what they cannot. *The journal of bone and joint surgery. British volume*. 2007; 89(5):574–80.
- [33] Azizeh Rahmani Del Bakhshayesh, Nahideh Asadi, Alireza Alihemmati, Hamid Tayefi Nasrabadi, Azadeh Montaseri, Soodabeh Davaran, Sepideh Saghati, Abolfazl Akbarzadeh i Ali Abedelahi, An overview of advanced biocompatible and biomimetic materials for creation of replacement structures in the musculoskeletal systems: focusing on cartilage tissue engineering, Published online: 13 November 2019.
- [34] Manferdini C, et al. Specific inductive potential of a novel nanocomposite biomimetic biomaterial for osteochondral tissue regeneration. *J Tissue Eng Regen Med*. 2016;10(5):374–91.
- [35] Taghipour Y, et al. The application of hydrogels based on natural polymers for tissue engineering. *Curr Med Chem*. 2019.
- [36] Boys AJ, et al. Next generation tissue engineering of orthopedic soft tissue-to-bone interfaces. *MRS communications*. 2017;7(3):289–308.
- [37] Hench LL. Bioceramics: from concept to clinic. *J Am Ceram Soc*. 1991;74(7): 1487–510.
- [38] Hench LL. Opening paper 2015-some comments on bioglass: four eras of discovery and development. *Biomedical glasses*. 2015;1(1).
- [39] Schumacher M, et al. Calcium phosphate bone cement/mesoporous bioactive glass composites for controlled growth factor delivery.
- [40] James R, Mengsteab P, Laurencin CT. Regenerative engineering: studies of the rotator cuff and other musculoskeletal soft tissues. *MRS Advances*. 2016; 1(18):1255–63
- [41] Johnstone B, et al. Tissue engineering for articular cartilage repair—the state of the art. *Eur Cell Mater*. 2013;25(248):e67.
- [42] Rahmani Del Bakhshayesh A, et al. Fabrication of three-dimensional scaffolds based on Nano-biomimetic collagen hybrid constructs for skin tissue engineering. *ACS Omega*. 2018;3(8):8605–11.
- [43] Wool R, Sun XS. *Bio-based polymers and composites*. Elsevier; 2011.

- [44] Arakawa C, et al. Photopolymerizable chitosan–collagen hydrogels for bone tissue engineering. *J Tissue Eng Regen Med*. 2017;11(1):164–74.
- [45] Agheb M, et al. Novel electrospun nanofibers of modified gelatin-tyrosine in cartilage tissue engineering. *Mater Sci Eng C*. 2017;71:240–51.
- [46] Hu Y, et al. Biomimetic mineralized hierarchical hybrid scaffolds based on in situ synthesis of nano-hydroxyapatite/chitosan/chondroitin sulfate/ hyaluronic acid for bone tissue engineering. *Colloids Surf B: Biointerfaces*. 2017;157:93–100.
- [47] Hecht H, Srebnik S. Structural characterization of sodium alginate and calcium alginate. *Biomacromolecules*. 2016;17(6):2160–7.
- [48] Liao J, et al. Injectable alginate hydrogel cross-linked by calcium gluconate loaded porous microspheres for cartilage tissue engineering. *ACS omega*. 2017;2(2):443–54.
- [49] Cigan AD, et al. High seeding density of human chondrocytes in agarose produces tissue-engineered cartilage approaching native mechanical and biochemical properties. *J Biomech*. 2016;49(9):1909–17.
- [50] Ondeck MG, Engler AJ. Mechanical characterization of a dynamic and tunable methacrylated hyaluronic acid hydrogel. *J Biomech Eng*. 2016; 138(2):021003
- [51] Singh YP, Bhardwaj N, Mandal BB. Potential of agarose/silk fibroin blended hydrogel for in vitro cartilage tissue engineering. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2016;8(33):21236–49.
- [52] [https://www.researchgate.net/publication/350206532\\_How\\_to\\_Improve\\_Physico-Chemical\\_Properties\\_of\\_Silk\\_Fibroin\\_Materials\\_for\\_Biomedical\\_Applications-Blending\\_and\\_Cross-Linking\\_of\\_Silk\\_Fibroin-A\\_Review/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/350206532_How_to_Improve_Physico-Chemical_Properties_of_Silk_Fibroin_Materials_for_Biomedical_Applications-Blending_and_Cross-Linking_of_Silk_Fibroin-A_Review/figures?lo=1) (Kolovoz 2023.)
- [53] Anjana, J., et al., Nanoengineered biomaterials for tendon/ligament regeneration, in *Nanoengineered Biomaterials for Regenerative Medicine*. 2019, Elsevier. p. 73–93
- [54] <https://step1.medbullets.com/biochemistry/102079/elastin> (Kolovoz 2023.)
- [55] McKavanagh P, Zawadowski G, Ahmed N, et al. The evolution of coronary stents. *Expert Rev Cardiovasc Ther*. 2018;16(3):219–228.
- [56] <https://www.nsmaterialdevices.com/analysis/cardiovascular-implantable-devices> (Kolovoz 2023.)

- [57] Owen CM, Montemurro N, Lawton MT. Microsurgical management of residual and recurrent aneurysms after coiling and clipping: an experience with 97 patients. *Neurosurgery*. 2015;62(Suppl 1):92–102.
- [58] Briganti F, Leone G, Marseglia M, et al. Endovascular treatment of cerebral aneurysms using flow-diverter devices: a systematic review. *Neuroradiol J*. 2015;28(4):365–375.
- [59] Ronco C. Evolution of technology for continuous renal replacement therapy: forty years of improvement. *Contrib Nephrol*. 2018;194:1–14.
- [60] Roumelioti ME, Trietley G, Nolin TD, et al. Beta-2 microglobulin clearance in high-flux dialysis and convective dialysis modalities: a meta-analysis of published studies. *Nephrol Dial Transplant*. 2018;33(6):1025–1039.
- [61] Zawada AM, Melchior P, Erenkötter A, et al. Polyvinylpyrrolidone in hemodialysis membranes: impact on platelet loss during hemodialysis. *Hemodial Int*. 2021;25(4):498–506.
- [62] Sato Y, Horiuchi H, Fukasawa S, et al. Influences of the priming procedure and saline circulation conditions on polyvinylpyrrolidone in vitro elution from polysulfone membrane dialyzers. *Biochem Biophys Rep*. 2021;28:101140.
- [63] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0085253815557724> (Kolovoz 2023.)
- [64] Ueda H, Watanabe J, Konno T, et al. Asymmetrically functional surface properties on biocompatible phospholipid polymer membrane for bioartificial kidney. *J Biomed Mater Res A*. 2006;77(1):19–27.
- [65] Ding YF, Li RW, Nakai M, et al. Osteoanabolic implant materials for orthopedic treatment. *Adv Healthc Mater*. 2016;5(14):1740–1752.
- [66] Jaafar A, Hecker C, Árki P, et al. Sol-gel derived hydroxyapatite coatings for titanium implants: a review. *Bioengineering (Basel)*. 2020;7(4):127.
- [67] Holt G, Murnaghan C, Reilly J, et al. The biology of aseptic osteolysis. *Clin Orthop Relat Res*. 2007;460:240–252.
- [68] <https://medlineplus.gov/ency/article/002974.htm> (Kolovoz 2023.)
- [69] Youngblood Jeffrey P., Nancy R. Sottos. *Bioinspired Materials for Self-cleaning and Self-healing*. MRS Bulletin 2008, Volume 33, 1-10.

[70] Wang J. Y., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N. Application of Hydrogel encapsulated Carbonate Precipitating bacteria for a realistic self-healing in concrete. CBD 2014, pp. 110-119.

[71] <https://www.linkedin.com/pulse/everything-you-need-know-bio-concrete-subhra-bera-nandy> (Kolovoz 2023.)

[72] <https://cobsinsights.org/2021/09/07/the-circular-economy-and-biomimicry-for-sustainability/> (Kolovoz 2023.)

[73] <https://www.eurekalert.org/news-releases/483371> (Kolovoz 2023.)

[74] <http://www.birdseyebirding.com/2018/09/25/biomimicry-birds-emulate-nature/#:~:text=Scientists%20have%20discovered%20that%20birds,lifting%20the%20bird%20behind%20it.> (Kolovoz 2023.)

[75] <https://hr.legaltechnique.org/articles/zivotnie/neveroyatnij-tanec-skvorcov-v-izraile-bull-novosti-v-fotografijah.html> (Kolovoz 2023.)

[76] <https://asknature.org/innovation/scalable-carbon-sequestration-inspired-by-the-common-stony-coral/> (Kolovoz 2023.)

[77] <https://blog.labtag.com/carbon-capture-technology-converting-co2-into-something-useful/>  
(Kolovoz 2023.)

[78] <https://www.greenroofs.com/projects/gardens-by-the-bay-supertrees/> (Kolovoz 2023.)

[79] <http://pixelizam.com/vrtovi-pored-zaljeva-prelijepi-hi-tech-park-u-singapuru/> (Kolovoz 2023.)

## **Sažetak**

U radu je prikazana važnost biomimetike kao znanosti, kako se razvijala kroz povijest i kako su ljudi tisućama godinama pa sve do danas razvijali materijale i proizvode inspirirane prirodom. Također, objašnjeni su današnji ciljevi biomimetike kao znanosti te kako biomimetika zapravo pomaže u razvoju drugih znanosti. Opisani su biomimetički materijali koji se koriste za razvoj medicine, medicinske opreme, inženjeringa mišićno-koštanih tkiva te tehnologije. Na kraju rada, prikazani su načini reciklaže biomimetičkih materijala i mogućnost uštede energije.

Ključne riječi: biomimetika, biomimetički materijali, biomimikrija

## **Abstract**

### **Development and application of biomimetic materials**

The paper presents the importance of biomimetics as a science, how it has evolved throughout history, and how people have been developing materials and products inspired by nature for thousands of years up to the present day. Additionally, it explains the current goals of biomimetics as a science and how biomimetics actually aids in the development of other sciences. Biomimetic materials that have been described are used in the development of medicine, medical equipment, musculoskeletal engineering and technology. Finally, in the paper are discussed some methods for recycling biomimetic materials and the potential for energy savings.

Keywords: biomimicry, biomimetic materials, biomimetics

## **ŽIVOTOPIS**

Domagoj Naletilić rođen je 25. 2. 2001. u Vinkovcima. Pohađao je Osnovnu školu „August Cesarec“ u Ivankovu. Nakon toga upisuje Tehničku školu Rudera Boškovića u Vinkovcima, smjer Tehnička gimnazija. Nakon završetka školovanja s vrlo dobrim uspjehom, upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, Sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike.

---

Potpis autora