

Biomimetički materijali i primjena

Črep, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:194:418821>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Physics - PHYRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
FAKULTET ZA FIZIKU

Studijski program Fizika

Lucija Črep

BIOMIMETIČKI MATERIJALI I PRIMJENA

Završna prijediplomska radnja

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivana Jelovica Badovinac

Rijeka, rujan 2023.

SADRŽAJ

1	UVOD	4
2	PRETRAŽNI ELEKTRONSKI MIKROSKOP	5
2.1	Dijelovi pretražnog elektronskog mikroskopa	5
2.2	Način rada i dobivanje slike	7
3	RAZVOJ BIOMIMETIČKIH MATERIJALA	11
3.1	Biomimetika u prošlosti	11
3.2	Biomimetički materijali od 20. stoljeća do danas	13
4	BIOMIMETIČKI MATERIJALI	14
4.1	Mehanička svojstva	15
4.1.1	Sedef	15
4.1.2	Svila	16
4.1.3	Drvo	17
4.2	Optička svojstva	18
4.2.1	Strukturna boja	19
4.3	Superhidrofobnost i svojstva samočišćenja	20
4.3.1	Samočišćenje	20
4.4	Antibiokolonizacija	21
4.5	Adhezivna svojstva	22

5	PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA	23
5.1	Medicina	23
5.1.1	Antibakterijska oprema	24
5.1.2	Umjetna koštana tkiva	25
5.2	Dentalna medicina	25
5.2.1	Stakleno-ionomerni cement	25
5.2.2	Biodentin	26
5.3	Tekstilna industrija	26
5.3.1	Samoljepljiva vrpca	26
5.3.2	Kupaći kostim	27
5.4	Analiza površine biomimetičkih materijala pretražnim elektronskim mikroskopom	28
5.4.1	Priprema uzoraka za pretražni elektronski mikroskop	28
5.4.2	Rezultati SEM analize	28
6	ZAKLJUČAK	31
	LITERATURA	32

SAŽETAK

Oponašanje prirode te njenih struktura postoji od samih početaka ljudske vrste, a implementacija njenih komponenti u suvremenu tehnologiju prisutna je i danas. Razvoj biomimetičkih materijala svoju je uzlaznu putanju gradio preko ramena brojnih znanstvenika kao što su Leonardo da Vinci te braća Wright sve do suvremenih kupaćih kostima i samoljepljive vrpce. Priroda se malo po malo prilagođavala različitim uvjetima te pri tome evoluirala segmente koji se nastoje danas koristiti u tehnologiji i inženjerstvu kao što su vlaknaste strukture, toplinska izolacija, različite vrste površina i samozacjeljivanje. Razvoj i proučavanje biomimetičkih materijala također omogućuje i bolje shvaćanje bioloških stanica i tkiva te njihova svojstva. Zbog svoje složene strukture biomimetički materijali zahtijevaju istraživanja na mikro- i nanometarskoj razini. Jedna od metoda koja se koristi za analizu struktura ovih materijala je pretražna elektronska mikroskopija. Široka primjena biomimetičkih materijala vidljiva je u svakodnevnom životu pa je tako samoljepljiva vrpca nastala po uzoru na plod čička, dok su peraje koje se koriste u ronjenju osmišljene promatranjem kitovih peraja te načinom na koji ih koristi za kretanje. Budući da u prirodi postoje brojna rješenja tehničkih i bioloških problema, mogućnosti stvaranja novih materijala su neiscrpna. Objedinjene informacije dobivene proučavanjem bioloških struktura te njihove primjene u fizici, kemiji ili inženjerstvu omogućuju stvaranje raznih vrsta biomimetičkih materijala.

Ključne riječi: biomimetički materijali, biomimetika, pretražni elektronski mikroskop

1 UVOD

Grčkim izrazima "bio" - život i "mimesis" - oponašanje, osmišljen je naziv biomimetički, koji je pridodan materijalima i sustavima koji oponašaju prirodu [1]. Istraživanje biomimetičkih materijala interdisciplinarno je područje koje ujedinjuje znanja i vještine fizike, kemije, biologije i inženjerstva, a svoju je uzlaznu putanju u razvoju doživjelo 70-ih godina prošlog stoljeća. Biomimetika se temelji na proučavanju prirode i prirodnih fenomena te na oponašanju ideja iz prirode kako bi se riješili brojni problemi s kojima se moderno društvo susreće[2].

Iako je područje biomimetike još u razvoju, njena je zastupljenost u svakodnevnom životu velika. Prirodni sustavi i strukture omogućuju širok spektar primjene sve od stomatologije i medicine, preko inženjerstva do arhitekture. Biomimetički materijali mogu se pronaći u obliku vatrogasnog odijela, čička za odjeću, krila aviona ili umjetnog koštanog tkiva. Također, priroda služi i kao inspiracija za razvoj novih načina za poboljšanje tehnoloških ili estetskih prepreka. Tako su nastala krila aviona inspirirana pticama, rilo komarca poslužilo je za razvoj tanke medicinske igle, a koža zmije bila je uzor za stvaranje cipela s boljim prijanjanjem i trenjem [3].

Razvoj novih biomimetičkih materijala ovisan je o istraživanjima i analizama postojećih materijala raznim tehnikama karakterizacije, a među njima posebno mjesto zauzima pretražna elektronska mikroskopija. Pretražni elektronski mikroskop (*engl. SEM-Scanning Electron Microscope*) umjesto svjetlosnog snopa na promatrani objekt usmjerava snop elektrona te tako omogućuje promatranje na nanometarskoj i mikrometarskoj skali. U posljednjem poglavlju ove radnje nalaze se SEM slike slojeva ronilačkog i vatrogasnog odijela snimljene pri različitim povećanjima pretražnim elektronskim mikroskopom u zajedničkom laboratoriju Fakulteta za fiziku i Centra za mikro- i nanoznanosti i tehnologije Sveučilišta u Rijeci.

2 PRETRAŽNI ELEKTRONSKI MIKROSKOP

Zanimanje ljudi za istraživanje svijeta koji nas okružuje prisutno je gotovo koliko i sama ljudska vrsta. Tijekom vremena, promatranja prirode postajala su sve češća i opsežnija. Budući da je jedini instrument za to bilo ljudsko oko, koje ima svoja ograničenja, došlo je do potrebe za instrumentima koji će dati detaljniju sliku promatranih predmeta i struktura. Tijekom druge polovine 16. stoljeća osmišljen je prvi mikroskop koji je služio za uvećavanje slike predmeta. Time je omogućeno da se dijelovi predmeta koji nisu vidljivi golim okom uvećaju i поближе istraže. Prvi mikroskopi bili su optički mikroskopi koji koriste vidljivu svjetlost i sustav leća kako bi stvorili povećanu sliku uzorka. Svjetlosnim mikroskopom moguće je postići povećanja u rasponu od 1000 do 1500 puta. Potreba za sve boljom rezolucijom dovela je do razvoja novih vrsta mikroskopa. Elektronski mikroskopi koriste snop elektrona i sustav elektromagnetskih leća te povećavaju sliku uzorka i do 1000 puta više od optičkih.

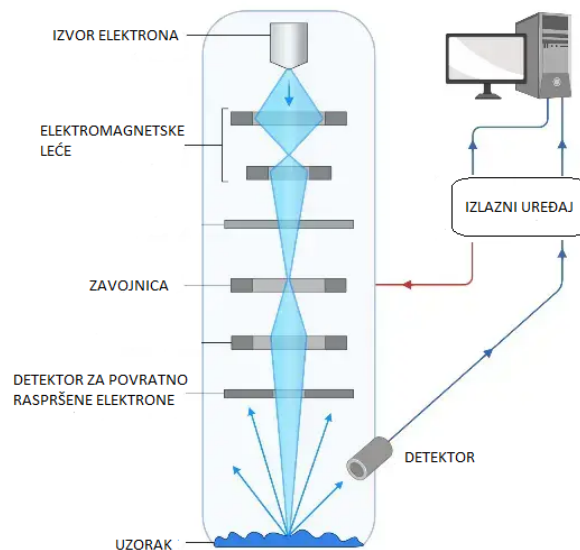
2.1 Dijelovi pretražnog elektronskog mikroskopa

Glavna karakteristika elektronskih mikroskopa općenito, pa tako i pretražnog elektronskog mikroskopa, je usmjereni snop elektrona koji interagira s uzorkom. Prema tome, osnovni element svakog SEM-a je elektronski top. U Laboratoriju za pretražnu elektronsku mikroskopiju nalazi se mikroskop japanskog proizvođača JEOL (model FE-SEM 7800F), pri čemu kratica FE podrazumijeva da se radi o mikroskopu s emisijom polja elektrona (*eng. FE -field emission*). Njegov elektronski top koristi tzv. Schottkyev emiter, odnosno katodu od kristala volframa čiji je vrh veličine oko 10 nm, koja je presvučena tankim slojem cinkova oksida. Upravo on služi za smanjenje rada potrebnog da elektroni napuste materijal. Do ove pojave dolazi kod niskih temperatura od oko 1800 K. Elektroda na koju se primjenjuje nizak napon naziva se supresor, a razlika napona između elektroda služi za ubrzavanje elektrona. Prednost ove vrste izvora elektrona je struja elektronskog snopa koja je stabilan emiter u ultravisokom vakuumu koji sprječava apsorpciju plina. Na taj se način stvara elektronska zraka koja je usmjerena prema željenom uzorku.

Ispod anode nalaze se elektromagnetske leće načinjene od vodljive bakrene žice namotane u zavojnicu oko magneta. Prilikom prolaska struje kroz zavojnicu, stvara se magnetsko polje, koje

djeluje na elektrone u snopu. Na taj se način može manipulirati putanjom elektrona kroz cijev mikroskopa jednostavno promjenom električne struje kroz zavojnicu. Općenito, u elektronskom mikroskopu postoje dva tipa elektromagnetskih leća: sabirna leća i leća objektiv. Ukoliko se podražaj sabirne leće poveća, snop elektrona je širok i mali broj elektrona prolazi kroz otvor do leće objektiv. Nadalje, ako je podražaj sabirne leće malen, snop elektrona je uzak pa veliki broj elektrona dolazi do leće objektiv. Za fokusiranje snopa na površinu uzorka služi leća objektiv.

Sustav leća pretražnog elektronskog mikroskopa sadrži i tzv. pretražnu leću koja pomiče snop elektrona po uzorku [4]. Cijev pretražnog elektronskog mikroskopa objedinjuje izvor elektrona, anodu i sustav elektromagnetskih leća te završava u glavnoj komori. Na slici 2.1, koja prikazuje dijelove pretražnog elektronskog mikroskopa, prikazane su spomenute komponente.



Slika 2.1: Dijelovi pretražnog elektronskog mikroskopa [5]

Unutrašnjost elektronskog optičkog sustava i komora za uzorak moraju se održavati u visokom vakuumu od 10^{-3} do 10^{-4} Pa. Iz svih je dijelova mikroskopa potrebno ispumpati zrak pomoću difuzijske pumpe. Uzorak se najprije umeće u pretkomoru koja se nalazi na višem tlaku od glavne komore, a potom se umeće u glavnu komoru.

U glavnoj se komori nalazi postolje na koje se učvršćuje uzorak na metalnom nosaču. Prema potrebi, nosač se može pomicati horizontalno u x i y smjeru. Također, moguće je okomito pomicanje u z smjeru, naginjanje uzorka te rotacija.

Unutar mikroskopa nalaze se i razni detektori za signale od interesa. Neki od njih su gornji i

donji detektor za sekundarne elektrone koji izlaze iz uzorka nakon interakcije s elektronima iz emitiranog snopa. Nadalje, postoji i detektor za povratno raspršene elektrone koji dolaze iz samog elektronskog snopa. Može se analizirati i karakteristično rendgensko zračenje koje je emitirano iz uzorka ukoliko je mikroskop opremljen odgovarajućim detektorom. Uz to, neki pretražni elektronski mikroskopi mogu imati i detektor za opažanje transmitiranih elektrona.

Uz sam mikroskop potrebno je imati i izlazni uređaj koji dobivene signale pretvara u sliku. Izlazni signali iz sekundarnog detektora elektrona se pojačavaju i zatim prenose na jedinicu za prikaz. Najčešće je taj uređaj računalo povezano s mikroskopom. Za upravljanjem mjesta na uzorku u koji je usmjeren elektronski snop potreban je kontrolni uređaj. On služi za pomicanje snopa elektrona u svim smjerovima na uzorku, reguliranje povećanja i izoštravanje dobivene slike.

2.2 Način rada i dobivanje slike

Kao što je već ranije spomenuto, glavni princip rada pretražnog elektronskog mikroskopa temelji se na usmjerenom snopu elektrona. Dobiveni snop elektrona ubrzan je prema anodi budući da je anoda pozitivno nabijena, dok su elektroni negativnog naboja. Većina pretražnih elektronskih mikroskopa koristi dvije elektromagnetske leće. Kroz njih prolazi električna struja, a budući da su leće u mikroskopu kružne petlje, stvara se magnetsko polje. Ubrzani elektroni dolaze do elektromagnetskih leća i nalaze se u magnetskom polju, a na njih djeluje Lorentzova sila. Elektroni se usmjeravaju na željenu točku na uzorku zbog Lorentzove sile koja im mijenja smjer kretanja.

Usmjereni snop elektrona nakon prolaska sustavom leća nailazi na zavojnicu koja služi za zakretanje snopa. Zavojnicom protječe električna energija te se stvara magnetsko polje. Na kraju, snop elektrona dolazi do uzorka, interagira s uzorkom te se kao posljedica interakcije stvaraju različiti signali koji pomoću odgovarajućih detektora daju informacije o površini uzorka.



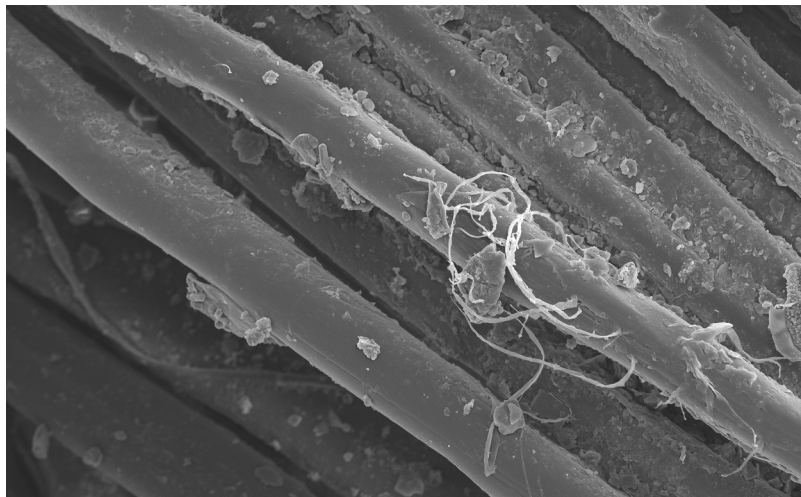
Slika 2.2: Pretražni elektronski mikroskop [6]

Kako bi elektronski snop bio dobro usmjeren na željeni dio uzorka u glavnoj je cijevi kao i komorama potrebno postići visoki vakuum. Naime, da vakuum ne postoji elektroni bi se na putu od izvora do uzorka sudarali s atomima u zraku i drugim česticama u cijevi. Posljedica interakcije elektrona s atomima bila bi vidljiva kao nejasna i nefokusirana slika. Da bi se održao potreban visoki vakuum koriste se različite vrste vakuumskih pumpi.

Pretražni elektronski mikroskop može posjedovati različite vrste detektora za opažanje željenih signala. Jedan od njih je detektor za sekundarne elektrone. Usmjereni snop elektrona dolazi do uzorka gdje interagira s elektronima niske energije blizu površine uzorka. Elektronski snop tada predaje dio energije elektronima na površini. Zbog dovedene energije, elektroni iz uzorka imaju dovoljnu energiju za napuštanje atoma te njih nazivamo sekundarnim elektronima. Budući da su kinetičke energije koju posjeduju izbačeni sekundarni elektroni reda veličine 5 eV, oni izlaze iz prvih nekoliko nanometara površine uzorka. Nakon izlaska sekundarnog elektrona iz ljuske atoma, nastaje prazno mjesto u ljusci niže energije. Na to mjesto dolazi elektron iz više energetske ljuske i popunjava prazno mjesto. Ovaj prijelaz uzrokuje razliku energije između ljuski koja je emitirana u obliku Augerovog elektrona koji izlazi iz atoma. Budući da Augerovi elektroni imaju karakteristične vrijednosti energija za svaki element iz kojeg su emitirani moguće je otkriti sastav uzorka. Da bi se dobile informacije o sastavu promatranog uzorka, Augerovi se elektroni skupljaju i sortiraju prema energijama. Uz Augerov elektron, iz uzorka se zbog razlike energije među ljuskama, emitiraju i karakteristične rendgenske zrake. Njihova je energija također karakteristična za pojedine elemente i odgovara razlici energije vanjske i unutarnje ljuske. Za analizu karakterističnih x-zraka koristi se spektrometar x-zraka s disperzijom energije (*engl. Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)*) čiji se rad zasniva na analizi energija dobivenih

zraka. Nakon izlaska iz uzorka, x-zrake dolaze do poluvodičkog detektora. Zatim se generiraju parovi elektron-šupljina čije vrijednosti odgovaraju energiji x-zraka. Mjerenjem spomenutih veličina, odnosno električne struje, dobiva se vrijednost signala x-zrake.

Zatim, sekundarni elektroni dolaze do detektora i bivaju ubrzani te imaju dovoljno veliku kinetičku energiju da bi scintilator unutar detektora proizveo bljeskove svjetlosti koji se usmjeravaju prema fotomultiplikatoru. Dobiveni se signal u fotomultiplikatoru pretvara u električni te pojačava i šalje u katodnu cijev kako bi se dobila konačna slika. Priroda samog uzorka, a samim time i broj sekundarnih elektrona koji dolaze do detektora, utječe na dobivenu sliku. Ako je površina uzorka uzdignuta, broj elektrona u detektoru je veći. Za površine koje su udubljene, broj sekundarnih elektrona koji dolaze do detektora je manji nego kod uzdignutih površina. Stoga će dobivena slika s izdignutih površina biti svjetlija, a ona s udubljenih tamnija [5]. Slika 2.3 prikazuje strukturu jednog od slojeva vatrogasnog odijela povećanog 1000 puta te je dobivena pretražnim elektronskim mikroskopom koji se nalazi u Laboratoriju za pretražnu elektronsku mikroskopiju.



Slika 2.3: Slika vatrogasnog odijela dobivena pretražnim elektronskim mikroskopom

Uz sekundarne elektrone, iz uzorka mogu izlaziti i povratno raspršeni elektroni. Oni nastaju kada elektronski snop pogodi uzorak, a neki od elektrona se rasprše. Taj je sudar elastičan te ne dolazi do gubitka energije elektrona, a elastično raspršeni primarni elektroni koji se odbijaju od uzorka nazivaju se povratno raspršenim elektronima. Budući da imaju veću energiju od sekundarnih, povratno raspršeni elektroni izlaze iz dubljih područja unutar uzorka. Također, broj nastalih povratno raspršenih elektrona ovisi o atomskom broju uzorka. Naime, ako je atomski broj atoma u uzorku veći, tada je i broj nastalih elektrona veći, što stvara jači signal. Ova se vrsta signala koristi za razlikovanje dijelova uzorka koji imaju različit atomski broj. Dio uzorka s težim atomima

na izlaznom je uređaju vidljiv kao svjetliji od onog s lakšim atomima. Ukoliko je površina promatranog uzorka neravna, intenzitet povratno raspršenih elektrona postaje veći u smjeru zrcalne refleksije. Detekcija signala kojeg stvaraju povratno raspršeni elektroni provodi se detektorima koji su načinjeni od poluvodičkog materijala postavljenog neposredno iznad uzorka. Budući da su poluvodički detektori osjetljivi samo na elektrone visoke energije, koriste se za analizu povratno raspršenih elektrona. Elektroni udaraju u poluvodički materijal i u njemu pobuđuju elektrone. Stvara se par elektron-šupljina. Slobodni elektroni zajedno s nastalim parovima generiranim iz povratno raspršenih elektrona mogu se odvojiti prije njihove rekombinacije čime se stvara električna struja. Zatim se ona mjeri elektroničkim sklopom koji se pretvara u sliku visoke rezolucije sa sadržanim informacijama o sastavu uzorka.

Osim samih elektrona koji izlaze iz uzorka, važan pojam je i volumen interakcije elektronskog snopa s uzorkom. Tijekom analize, snop elektrona djeluje samo na dio volumena uzorka i taj se dio naziva volumenom interakcije. On je ovisan o naponu ubrzanja, stoga viši naponi prodiru dublje u uzorak stvarajući veće volumene interakcije od nižih napona. Također, volumen interakcije ovisi i o atomskom broju uzorka. Naime, materijali s većim atomskim brojem apsorbiraju više elektrona pa je volumen interakcije manji. Upadni kut za snop elektrona također određuje volumen interakcije, što je on veći, volumen interakcije je manji.

3 RAZVOJ BIOMIMETIČKIH MATERIJALA

Oponašanje prirode i njenih svojstava oduvijek je bilo zastupljeno u razvoju znanosti. Ljudi su od davnina nastojali po uzoru na svijet oko sebe tražiti načine za rješavanje raznih problema. Iako je sama biomimetika kao pojam nastala relativno nedavno, ona je prisutna odavno. Razvoj biomimetike, pa tako i biomimetičkih materijala svoj je procvat doživio krajem prošlog stoljeća. Spoj biološkog svijeta i njegovih struktura ukomponiran je u svijet tehnologije, a 1957. godine američki inženjer i biofizičar Otto Schmitt taj je spoj nazvao biomimetičkim.

3.1 Biomimetika u prošlosti

Prve pojave imitacije prirode sežu daleko u povijest, sve do početka ljudske vrste. Promatrajući životinje, prvi su ljudi naučili graditi nastambe, izrađivati primitivne odjevne predmete i skloništa. U potrazi za hranom, ideje o tehnikama lova preuzeli su od životinja koje su ih okruživale [7]. Budući da oni, za razliku od životinja poput medvjeda ili vuka, nisu imali kandže i veliku brzinu kretanja, poboljšavali su svoj lov po uzoru upravo na njih. Zajedno s evolucijom prirode, nastambe i ostali predmeti iz prirode, nastavili su se razvijati sve do danas.

Konkretan prvi primjer implementacije komponenata iz prirode bila je svila. Prije više od tri tisuće godina prije Krista, Kinezi su od kukuljice dudovog svilca stvorili prvi tekstilni materijal, odnosno vlakno sličano prirodnom. Poznato je da su ga koristili u trgovanju i tijekom vremena usavršavali. Također, Kinezima se pripisuje i izum kišobrana. Prije otprilike 5500 godina kineski arhitekt i izumitelj, Lu Ban, uočio je djecu koja se štite listovima lotosa od kiše. Nedugo zatim konstruirao je prvi kišobran koji je bio izrađen od svile [8].

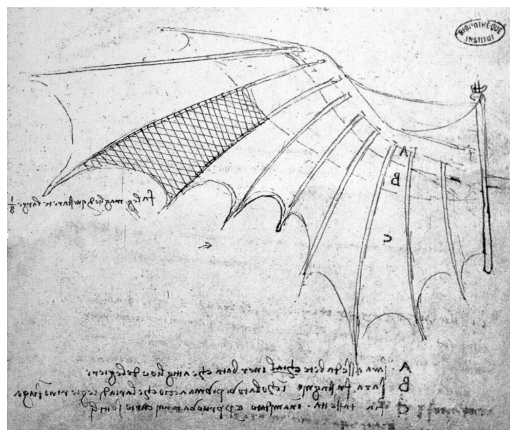
Stari su Egipćani gradili impresivne piramide za koje se vjeruje da su također nastale po uzoru na prirodu. Naime, svojim oblikom podsjećaju na vrhove planina što je vidljivo na slici 3.4.

Pronađeni ostaci koji potječu iz prvog i drugog stoljeća ukazuju da su Rimljani prirodnim materijalima stvarali grube zubne implantate. Nešto nalik tome je pronađeno i na području Južne Amerike iz otprilike istog vremena što ukazuje na rasprostranjenost ideje o oponašanju prirodnih sustava.



Slika 3.4: Vrh planine [8]

Krajem 15. stojeća u Italiji radio je i stvarao Leonardo da Vinci koji se također veže uz pojam biomimetike. Budući da je tijekom svog života mnogo vremena proveo promatrajući ptice, jedan je dio svojih istraživanja posvetio ideji letenja. Po uzoru na krila ptica i šišmiša radio je na skicama i izračunima kojima je želio omogućiti ljudima da lete. Budući da ljudski mišići ruku nisu dovoljno snažni da savladaju gravitacijsku silu, osmislio je krila kojima bi upravljao čovjek tijekom leta. Upravo kao i ptice, krila bi se pomicala gore-dolje te bi se na taj način stvorila dovoljno velika sila za savladavanje gravitacijske sile. U posljednjem je desetljeću 15. stoljeća izradio i osmislio tri stroja za letenje kojima bi u potpunosti upravljali ljudi. Iako tijekom svog života Leonardo da Vinci nije ugledao čovjeka koji leti, njegove ideje unaprijedila su braća Wright i ostvarila njegovu zamisao.



Slika 3.5: Da Vincijeva skica krila [9]

3.2 Biomimetički materijali od 20. stoljeća do danas

Braća Wright, u prvim su godinama 20. stoljeća proučavala ptice u letu te skice Leonarda da Vincija što je dovelo do prvih pokušaja ljudskog letenja. Za razliku od da Vincija, oni su razvijali mehanizam koji bi letio zajedno s čovjekom te je tako osmišljen zrakoplov. Preokret u njihovim pokušajima letenja bio je trenutak shvaćanja da ptice zapravo ne mašu krilima neprestano u letu kao što je prvotno mislio da Vinci. Braća su konstruirala zrakoplov koji je uspješno poletio pomoću motora i krila koja su statična. Baš kao i ostali materijali i mehanizmi koji su nastali imitiranjem prirode, zrakoplov se tijekom vremena razvijao te postao brži i stabilniji.

Biomimetički su materijali tijekom druge polovine 20. stoljeća privlačili sve veću pažnju istraživača i znanstvenika. Naime, nakon industrijskih revolucija istraživanja su ponovo bila okrenuta prema prirodnom svijetu i njegovim strukturama. Priroda nudi brojne strukture i procese koje su se počeli temeljitije istraživati i pronalaziti svoju svrhu u tehnološkom svijetu. Neka svojstva od interesa su samozacjeljivanje, toplinska izolacija, vlaknasta struktura i struktura boja, a njihova je zastupljenost u modernom svijetu sveprisutna. Iako priroda i tehnologija ne evoluiraju istom brzinom, priroda je oduvijek bila inspiracija za tehnološke probleme tijekom povijesti.

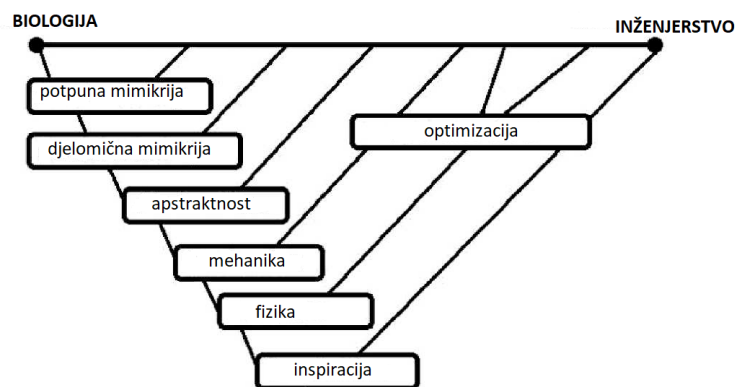
Svoj procvat biomimetički materijali, kao i sam pojam biomimetike općenito, doživjeli su 60.-ih godina prošlog stoljeća. Biofizičar Otto Schmitt prvi je 1957. godine upotrijebio izraz biomimetika za oponašanje prirode, njenih procesa i struktura [10]. Na to ga je potaknulo promatranje živčanog sustava lignje koje je pokušao iskoristiti za konstruiranje uređaja koji bi prenosio živčane podražaje. Desetak godina kasnije, Schmitt prvi koristi naziv biomimetika u naslovu znanstvenog rada, a sredinom 70.-ih godina prošlog je stoljeća ona uvrštena u Websterov rječnik. Tamo je pojam opisan kao proučavanje funkcija ili struktura biološki dobivenih materijala i tvari te mehanizama [11]. Glavna je svrha biomimetike sinteza umjetnih materijala koji oponašaju prirodne.

Na samom kraju prošlog tisućljeća, pojam biomimetičkih materijala doživljava veću popularnost objavljujući knjige *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* američke znanstvenice Janine Benyus. U svojoj knjizi, biomimetiku smatra novom znanosti za proučavanje prirode te korištenja dobivenih ideja u rješavanju brojnih problema s kojima se ljudi susreću. Također, prirodu navodi kao mjeru i mentora na putu razvoja novih vrsta materijala.

4 BIOMIMETIČKI MATERIJALI

Kao što je već ranije spomenuto, biomimetika je interdisciplinarna znanost koja spaja znanja iz područja fizike, kemije, biologije i inženjerstva. Ovi novonastali materijali stvoreni su po uzoru na prirodu i njene procese, strukture ili oblike. Budući da su ti materijali prisutni u velikom broju različitih područja, općenita svojstva i karakteristike pojedinih materijala nije moguće pobliže opisati. Od medicine sve do arhitekture, biomimetički su materijali doživjeli nagli razvoj tijekom posljednjih desetljeća. Napretkom tehnologije i prirodom kao neiscrpnim izvorom ideja, biomimetika postaje sve zastupljenija u širokom spektru znanosti. Najzanimljivija svojstva prirode pri dizajniranju i osmišljavanju novih materijala su optička svojstva, samoodržavanje i samočišćenje.

U samom procesu nastanka biomimetičkih materijala postoji nekoliko karakterističnih koraka za većinu materijala. Najprije se pomoću ideje dobivene iz biološkog svijeta promatraju željena fizikalna i mehanička svojstva. Zatim se stvara materijal koji prvotno samo djelomično oponaša prirodu, a naposljetku onaj koji nastaje potpunom mimikrijom. Sam transfer bioloških svojstava i struktura u svijet tehnologije složen je proces koji se odvija u više faza, a neke od njih su prikazane na slici 4.6.



Slika 4.6: Razvoj biomimetičkog materijala od biologije do inženjerstva [2]

Fundamentalniji pristup biomimetike zasniva se na promatranju prirode i njenih struktura te bioloških organizama. Pomoću njih se tada razvijaju nove ideje i traže rješenja za slične probleme prisutne u tehnologiji. Ruski inženjer i izumitelj Genrih Altshuller osmislio je način pristupanja i samom rješavanju problema. Smatrajući da za sve probleme rješenje već postoji u prirodi, stvorio je sistem prema kojem se problemi organiziraju i generiraju traženo rješenje [2].

Taj je sustav nazvan TRIZ (teorija rješavanja inventivnih zadataka).

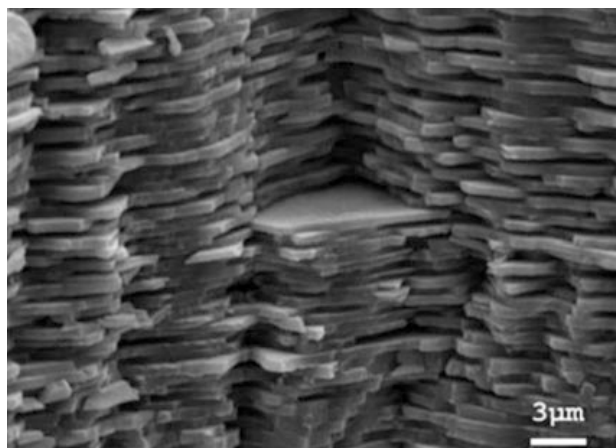
4.1 Mehanička svojstva

Umjetno proizvedeni materijali kao što su staklo i keramika visoko su mineralizirani te se često koriste u građevinarstvu i srodnim djelatnostima. Iako su široko zastupljeni, njihovo je korištenje ograničeno krutosti koju imaju. Kako bi se ovaj problem otklonio, rješenje je potraženo u prirodnim strukturama. Mali dio struktura ima ujedno i robusnu i fleksibilnu strukturu što organizmima omogućuje prilagodbu različitim uvjetima. Arhitektura često imitira upravo takve sustave koji su prilagodljivi i imaju željena svojstva u nano- i mikrohijerarhijama [12]. U ovoj vrsti materijala proteini i polisaharidi su visoko zastupljeni te služe za poboljšanje robusnosti i čvrstoće. Naime, ovakve su strukture tvrde, no lako lomljive.

Kombinacijom različitih hijerarhija unutar materijala te polisaharida ili proteina nastaju novi materijali sa željenim svojstvima. Dobivene su strukture snažnije i žilavije. Primjeri sličnih prirodnih kompozita s navedenim svojstvima su sedef, kosti, oklopna koža kornjača, krokodila i slično. Željena svojstva koja se sve više nastoje uključiti u tehnologiju imaju i prirodni biopolimeri, kao što je svila, te stanične matrice u drvima i bambusu. Njihova je glavna karakteristika čvrstoća što uvelike utječe na izdržavanje mehaničkih opterećenja kojima su podvrgnuti. Općenito, u građevinarstvu i arhitekturi te stvaranju novih materijala u tim područjima, veliku ulogu imaju istraživanja koja se vrše nad sličnim strukturama.

4.1.1 Sedef

Mekušci kao što su puževi i školjke tijekom evolucije stvorili su čvrsti unutarnji sloj ljušture koji se naziva sedef. Ovaj je sloj nastao kako bi se mekušci zaštitili od različitih grabežljivaca i otpada koji je prisutan u vodi. Sedef grade u većinskom postotku aragonit, koji je jedan od oblika kalcijevog karbonata te proteini, koji su manje zastupljeni. Navedeni se spojevi slažu jedan na drugog poput cigle što je prikazano na slici 4.7. Upravo ovakva struktura na način slaganja uvelike doprinose čvrstoći sedefa te je otporniji na savijanje i različite vrste naprezanja od čistog aragonita. Pri tom se naporu sedef rasteže i raspoređuje silu koja na njega djeluje po svojoj površini te na taj način izdržava naprezanje [12].



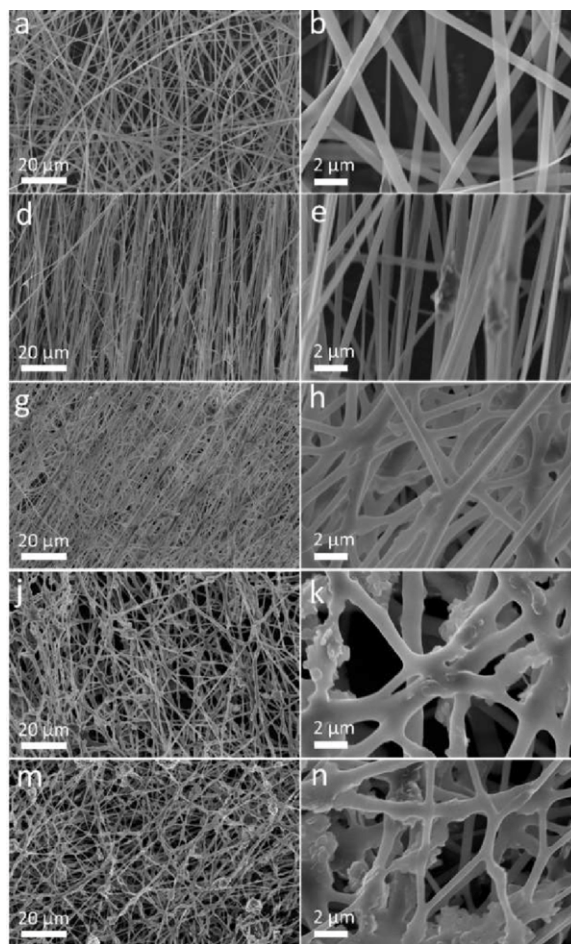
Slika 4.7: Unutarnja građa sedefa [12]

Tijekom povijesti postojali su mnogi pokušaji stvaranja umjetnog sedefa. Naime, on je zbog navedenih svojstava, ali i izrade raznih predmeta i nakita, imao visoku cijenu. Većina materijala koji su nastajali po uzoru na prirodni sedef bilo je neuspješno, ali relativno nedavno znanstvenici u Velikoj Britaniji uspjeli su proizvesti umjetani sedef sa željenim svojstvima [12]. Građen je od kalcijevog karbonata s izmjeničnim rasporedom organskih i anorganskih spojeva. Umjetni sedef upotrebljava se kao premaz raznih struktura kako bi im se poboljšala čvrstoća.

4.1.2 Svila

Ideja o stvaranju umjetne svile potječe još od Kineza koji su prije nekoliko tisuća godina prvi stvorili umjetnu svilu. Mnoštvo amidnih veza gradi svilu koja se može opisati kao tanko proteinsko vlakno. Danas postoji nekoliko desetaka vrsta materijala koji su nastali po uzoru na svilu dobivenu od dudova svilca.

Mineralizacija je jedan od važnijih procesa u prirodi koji doprinosi tvrdoći materijala. Uz to, svila je jedan od materijala koji se smatraju veoma čvrstim. Promatranjem njene strukture, znanstvenici su uočili isprepletenu vlaknastu strukturu polimera. Nadalje, osim čvrstoće, bitno svojstvo svile je izdržljivost. Svila ima sposobnost zadržati nekoliko tisuća puta veću masu od svoje ako se nalazi u vodi. To je jedan od razloga zbog kojeg se svila, između ostalog, koristi i kod proizvodnje zaštitne odjeće. Takva je tkanina lagana, ali čvrsta, što je uvelike doprinijelo njenoj širokoj primjeni.



Slika 4.8: Struktura svile [13]

Na slici 4.8 prikazane su SEM slike vlakna čiste svile. Uzorak čiste svile prikazan je na slikama a i b. Borov nitrid od 5% u čistom uzorku svile prikazan je na slikama d i e. Isti je spoj u svili, ali s udjelom od 10% prikazan na slikama g i h, dok je svila s 30% borovog nitrída prikazana na slikama j i k. Na slikama m i n nalazi se borov nitrid s udjelom od 40% u čistoj svili [13].

4.1.3 Drvo

Drvo je u upotrebi od samog početka korištenja prirode kao izvora raznih materijala. Oduvijek je bilo lako dostupno, a svoju je primjenu našlo od izrade prvih primitivnih alata sve do gradnje modernih građevina. Zahvaljujući svojoj velikoj čvrstoći koja je usporediva s čelikom, drvo je oduvijek bilo dobar materijal za upotrebu za brojne namjene.



Slika 4.9: Građa drveta [14]

Unutarnja struktura drva prikazana je na SEM slici 4.9. Drvo je građeno uglavnom od celuloze, hemiceluloze i polimera lignina organiziranih u šuplje cjevaste strukture koje su međusobno paralelne.

Ukoliko je broj slojeva bioloških polimera optimiziran, određenim vrstama pospješuje se čvrstoća i izdržljivost. Također, veoma je važna i orijentacija cjevčica od kojih je drvo građeno jer je ona zaslužna za čvrstoću. Jedan od primjera optimiziranog broja slojeva je bambus koji se ističe svojom izdržljivošću. Ovakve se strukture koriste kao potpore u konstrukcijama zgrada ili u proizvodnji različitih vrsta polimera [10].

4.2 Optička svojstva

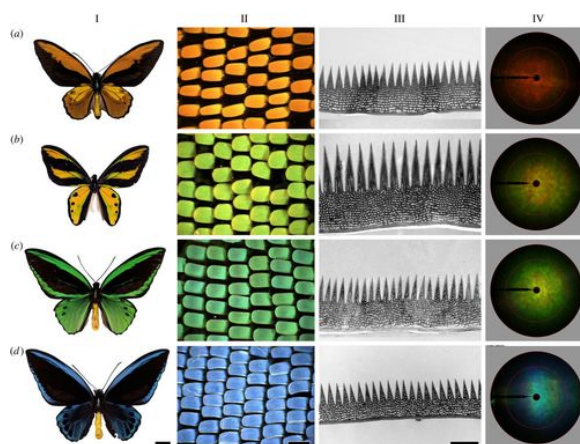
Za biološke organizme prepoznavanje ultraljubičaste, infracrvene ili vidljive svjetlosti od velikog je značaja. Životinje se često koriste vizualnim podražajima kako bi međusobno komunicirale, ali i prepoznale neprijatelje ukoliko je primljeni signal nepoznat.

Prepoznavanje svjetlosti raznih valnih duljina može imati razne primjene. Pravilno razumijevanje i korištenje infracrvenog, vidljivog ili ultraljubičastog zračenja može biološkim organizmima služiti kao pomoć kod orijentacije. Također, neki ga organizmi koriste kako bi pospješili i optimizirali termoregulaciju ili fotosintezu [12]. Optički podražaji i svojstva svoju su primjenu našli u razvoju materijala korištenih za izradu fasada na raznim objektima i druge slične estetske poduhvate.

4.2.1 Strukturna boja

Svijet oko nas prožet je bojama. Cvijeće, leptiri i ostali živi organizmi prikazuju svu raskoš koju priroda može stvoriti pomoću boja. Boje su sveprisutne i neiscrpna su inspiracija. Mnogi umjetnici upravo ovo svojstvo prirode koriste kao glavni način izražavanja.

Istraživanja provedena na različitim vrstama mikrostruktura od kojih su građeni živi organizmi, kao što su perje ptica ili opne voća, otkrile su da su svijetle boje zapravo imaju strukturnu komponentu. Primjeri takve strukturne boje prikazani su na slici 4.10. Ova je pojava rezultat međudjelovanja nano- te mikrostruktura organizma s upadnom svjetlošću.



Slika 4.10: Ovisnost boje krila leptira o strukturi [15]

Ovaj se način dobivanja boja zasniva na višestrukoj interferenciji ili difrakciji fizičkih značajki, koje su usporedive s valnom duljinom upadne svjetlosti. Strukturna boja može precizno kontrolirati način rada kojim se svjetlost reflektira ili širi s površine organizma. Ova je karakteristika veoma značajna za živi svijet jer pomoću nje moguće je kontrolirati kamuflažu, signalizaciju na velikim udaljenostima ili termoregulaciju [12].

Strukturna boja intenzivnija je i sjajnija od boje dobivene pigmentom. Također, može biti i vidljiva pod raznim kutovima kao i slabije blijedjeti. Ovo svojstvo, pokraj same ideje o bojama općenito, potaknulo je znanstvenike da pomnije istražuju načine na koji se formiraju boje. Svoja zapažanja o strukturnim bojama nastoje iskoristiti u tehnologiji. Krila leptira i paunovo perje su primjeri koji su potaknuli osmišljavanje materijala koji mijenjaju boju te raznih tkanina. Razvijaju se i razne tehnologije za otkrivanje krivotvorina koje se temelje na bojama, solarni kolektori i slično.

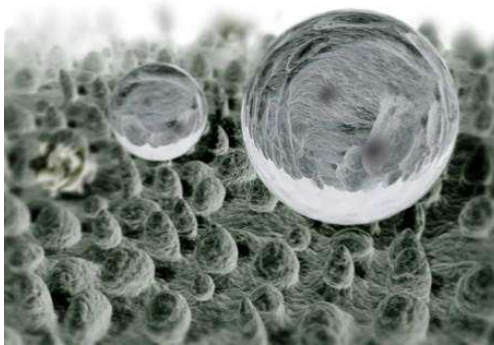
4.3 Superhidrofobnost i svojstva samočišćenja

Budući da je voda svugdje oko nas, uz sve pozitivne učinke koje ima postoje i negativni utjecaji i štete koje uzrokuje. Tako su primjerice vanjske površine zgrada i drugih objekata izložene velikim količinama kiše. Unutarnje površine kao što su keramičke pločice također su izložene utjecaju vode. S obzirom na sve navedeno, došlo je do potrebe za stvaranjem materijala koji će biti otporni na negativan utjecaj vode. Takvi bi materijali trebali biti otporni na različite deformacije uzrokovane vodom. Također, poboljšani materijali, osim otpornosti, trebali bi imati široku primjenu. Pločice za kupaoonicu, različite vrste podova i krovovi neprestano se istražuju s ciljem poboljšanja njihovih svojstava. Priroda je i dalje izvor inspiracije za promatranje sustava i organizama kako bi se poboljšala svojstva vezana za upravljanje vodom te kontrolu vlažnosti. Upravo zbog mogućnosti kontrole vlažnosti, neki organizmi imaju sposobnosti samočišćenja, boljeg prijanjanja, kontrole vode te kondenzacije koje ljudi nastoje ugraditi u svijet umjetnih materijala [10].

4.3.1 Samočišćenje

Kod živih organizama, pogotovo biljaka, nakupljanje vode može imati štetne utjecaje. Na taj su način neki vitalni procesi prigušeni i opstanak živog organizma doveden je pitanje. Može doći do teškoća u izmjeni plinova, otežanog disanja i kontrole termoregulacije. Nakupljene kapljice vode mogu dovesti do blokiranja sunčeve svjetlosti koja je za biljke veoma važna za proces fotosinteze. To je glavni razlog zbog kojeg su neke vrste biljaka razvile hidrofobne površine. Energija potrebna za širenje tekućine na hidrofobnim površinama je veća od kohezijske energije između molekula tekućine. Kut između površine i tekućine je velik što omogućuje stvaranje kapljica umjesto filma pa onečišćenja klize s površine materijala [10]. Ako je spomenuti kut veći od 150° radi se o superhidrofobnim materijalima.

Dosadašnja istraživanja rezultirala su razvojem mnogih vrsta voskova kojima se premazuju površine i tako sprječavaju sakupljanje vode. Zbog istog su se razloga razvili i materijali s gusto raspoređenim dlakama te hijerarhijske topografije. Dobar primjer utjecaja hijerarhijske topografije na hidrofobnost je list biljke lotos [12]. Svoju nisku vlažnost površine, lotos postiže kombiniranjem pravilnog rasporeda mikropapila i superponiranim kristalima voska. Slika 4.11. prikazuje lotos efekt koji sprječava prolazak vode u list biljke lotos.



Slika 4.11: Lotos efekt [16]

Na vlažnost površine utječu i druge nanostrukture i mikrostrukture koje su uočene na leptirovim krilima, različitim vrstama korova, lišću riže te laticama. Cassie-Baxterovim načelom objašnjava se niska stopa vlažnosti površine, koja je posljedica stvaranja kapljica na površini [17]. Oni nastaju između mikrostrukture te na taj način sprječavaju daljnje širenje tekućine. Uz superhidrofobnost, hijerarhijske strukture smanjuju dodirnu površinu između same površine organizma i svih nataloženih čestica. Biljkama je ovo svojstvo od izrazite važnosti jer se uz višak tekućine otklanjanju i nečistoće. Stoga određene vrste biljaka imaju sposobnost samočišćenja.

Svojstva samočišćenja i superhidrofobnosti nastoje se ukomponirati u stvaranje novih materijala sličnih osobina. U građevinarstvu i arhitekturi ova su svojstva uspješno implementirana. Danas se tako koriste boje koje se same čiste, različite vrste crjepova, krovova i fasada. Kopiranjem mikrostrukture lista lotosa nastali materijali imaju visoku stopu odbijanja vode, a samim time i raznih nakupljenih prljavština. Slična su se svojstva počela koristiti i u tekstilnoj industriji, kod tkanina koje su nepropusne.

4.4 Antibiotikolonizacija

Biološka kolonizacija pojava je nakupljanja različitih vrsta organizama. Najčešća mjesta za njihovo okupljanje su zidovi, pločice, podovi i slično. Nakupljanje bakterija, algi i gljivica na materijalima može uzrokovati oštećenja. Osim negativnih učinaka, nakupljanje primjerice lišaja, može poboljšati izgled i konstrukciju zgrada, spomenika i sličnog. Biološke i mikrobiološke kolonije organizama uvelike ovise o bioraspoloživosti te okolišu oko materijala na kojem se stvaraju kolonije. Veličina nakupina biokolonija ovisi o temperaturi, vlažnosti i izloženosti suncu

[12].

Nakupljanje mikroorganizama predstavlja velik problem u kontroli javnog zdravlja. Najčešći izvori nakupina kolonija bakterija u bolnicama i javnim ustanovama su stepeništa, kvake i slično. Tijekom pandemijskih godina taj problem pokazao se velikim. U bolnicama su česta pojava kolonije raznih patogenih organizama otpornih na lijekove. Također, nastaju i nakupine zaraznih sojeva koji se lako šire. Promatranjem organizama sa svojstvom antibiokolonizacije razvijaju se materijali i premazi koji bi spriječili nakupljanje bakterija i virusa na raznim površinama i materijalima.

4.5 Adhezivna svojstva

Materijali koji imaju sposobnost međusobnog spajanja široko su rasprostranjeni u građevinarstvu, tekstilnoj industriji i drugdje. Većina korištenih načina lijepljena temelji se na bazi organskih tvari otapala i polimera smole poput poliestera ili akrila. Zbog važnosti očuvanja okoliša, ljepila na bazi nafte mijenjaju se s onima na bazi vode [10]. Priroda je puna raznih primjera načina spajanja i lijepljenja više vrsta materijala, a jedan od najpoznatijih primjera je lijepljiva vrpca za odjeću.

5 PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA

Razvoj tehnologije, u posljednjim desetljećima, potaknuo je traženje odgovora na razne neodgovorene probleme u prirodi. Oponašanjem prirodnih sustava, organizama i procesa osmišljeni su biomimetički materijali. Zbog mnoštva organizama i procesa u prirodi koji su nepresušni izvor ideja, biomimetički materijali pronašli su svoje mjesto u raznim granama znanosti. Danas se upotrebljavaju u medicini, građevinarstvu, arhitekturi, tekstilnoj industriji i drugdje. Također, budući da je ovo područje interdisciplinarno, svoju su namjenu biomimetički materijali pronašli i u fizici, kemiji i biologiji.

Biomimetički su materijali pronašli svoju primjenu u raznim veličinama i oblicima. Prisutni su od nanometarskih skala pa sve do onih kilometarskih. Znanstvenici razvoj i primjenu biomimetičkih materijala dijele u tri velike skupine. Prva se odnosi na razvoj novih tehnologija i materijala. Proces razvoja temelji se na ekološkoj učinkovitosti i očuvanju prirode. Druga su skupina održivi i ekološki prihvatljivi biomimetički materijali. Posljednja je skupina danas najmanje istražena, ali od velike važnosti. Odnosi se na biološke postupke koji će biti značajni za ljudsko psihičko dobro [12].

Biomimetički materijali sve su više orijentirani na nanotehnologije i njihovu primjenu u tehnološkom svijetu. Jedna od možda najzanimljivijih primjena je izgradnja robota. Biomimetički su roboti inspirirani prirodom i biologijom. Nastaju u laboratorijima diljem svijeta, a glavna nit vodilja je konstruirati robote koji bi bili sposobni izvoditi složene zadatke. Također, razvijeni su kako bi pomogli u istraživanjima, kako na Zemlji tako i u svemiru.

Zastupljenost biomimetičkih materijala u svakodnevnom životu vidljiva je obliku samoljepljive vrpce za odjeću, kupaćih kostima, raznih implantata u medicini, konstrukciji objekata u arhitekturi i slično.

5.1 Medicina

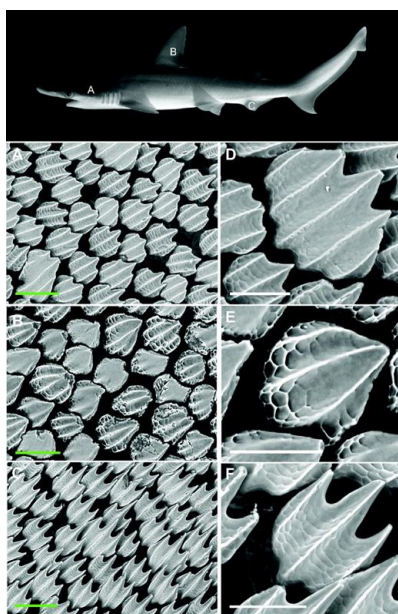
Oponašanjem prirode često se stvaraju novi materijali ili se kopiraju procesi i sustavi kako bi se upotrijebili za dobrobit ljudi. Moderna medicina koristi biomimetiku kao dobar primjer željenih komponenti. Tako razvijenim procesima i sustavima, danas se u medicini koriste za liječenje,

prevenciju i dijagnosticiranje bolesti. Također, biomimetički materijali i principi koriste se u proizvodnji medicinske opreme i lijekova. U medicini se biomimetički materijali koriste i kod raznih umjetnih implantata, stvaranje umjetne kože i slično [18].

5.1.1 Antibakterijska oprema

Po uzoru na kožu morskog psa osmišljen je materijal koji ima antibakterijska svojstva. Naime, proučavanjem površine morskog psa, znanstvenici su uočili da se na njoj ne zadržavaju bakterije i slične mikroskopske čestice.

Uočeno je da se koža morskog psa zapravo sastoji od mnoštva malih elemenata nalik na zube. Izlaze iz unutarnjeg sloja kože na površinu u dodiru s vodom. Upravo su oni glavni predmet promatranja i inspiracije kod stvaranja antibakterijskog materijala. Naime, zubci su čvrsti te se nalaze na površini kože koja je savitljiva.



Slika 5.12: Zubci na koži morskog psa [19]

Znanstvenici su najprije napravili uvećane modele zubaca kako bi mogli pobliže promatrati hrapavost površine i sile otpora koje se javljaju. Budući da se koža morskog psa savija tijekom gibanja, razvijeni su materijali koji imaju zupce na sebi te se nalaze na savitljivom materijalu [19]. Navedene strukture na površini kože nisu na svim mjestima morskog psa jednake, a razlika između njih je prikazana na slici 5.12.

Prikazane strukture na površini inspirirale su stvaranje hrapavih površina na kojim se ne zadržavaju bakterije, virusi i slični organizmi. Takvi se materijali ponajprije koriste u zdravstvenim ustanovama, kako bi se spriječile zaraze i širenje bolesti. Po uzoru na kožu morskog psa nastali su podovi u bolnicama, gumene rukavice i slično.

5.1.2 Umjetna koštana tkiva

U medicini za nadomještanje izgubljenog ili djelomično izgubljenog koštanog tkiva koriste se zdrava tkiva pacijenta ili tkiva donora. Razvoj biotehnologije omogućio je rekonstrukciju kostiju i koštanih tkiva s manjim oštećenjima ili onih koji ne nose veliko opterećenje.

Način stvaranja umjetnog koštanog tkiva temelji se na uzgoju koštanih stanica pacijenta *ex vivo* na zamjenskom tkivu. Kombiniranjem biotehnologije za razvoj bioloških stanica i znanosti o materijalima za proizvodnju trodimenzionalnih biološki razgradivih polimernih matrica nastaje umjetna kost. Glavni je cilj vratiti većinu mehaničkih svojstava izgubljenog tkiva. Također, dobivena koštana tkiva imaju slična biološka, kemijska i mehanička svojstva ljudskim koštanim tkivima [18].

Ovaj način zamjene prirodnog tkiva umjetnim omogućuje uklanjanje nedostataka u postojećem tkivu pacijenta, smanjuje rizik odbacivanja, pa čak i prijenos bolesti. Ovim se postupkom tanak sloj dobivenog tkiva može nanijeti na metalne materijale i time postići već navedena svojstva. Ovaj se postupak koristi kod rekonstrukcije kukova, koljena, zubnih implantanta i slično.

5.2 Dentalna medicina

5.2.1 Stakleno-ionomerni cement

Stakleno-ionomerni cement, odnosno *Glass Ionomer Cement* (GIC), biomimetički je materijal sličan dentinu te se koristi u dentalnoj medicini [1]. Posjeduje antikariogena svojstva, tj. štiti površinu zuba od kolonizacije bakterija i stvaranja karijesa zbog oslobađanja fluorida. GIC ima sposobnost ponovnog stvaranja izgubljenog dentina isto kao i poboljšanja svojstava postojećeg dentina.

Otpuštanje fluorida jedno je od glavnih i najvažnijih svojstava stakleno-ionomernog cementa. Ovaj se proces može odvijati tijekom dužeg vremenskog perioda, a samo otpuštanje ima stalnu brzinu. Kako su sustavi građeni na bazi vode, GIC služi i kao spremnik fluoridnih iona. Iz sline u ustima, paste za zube ili tekućine za ispiranje usta, pohranjuje se fluorid [1].

Zbog lošijih mehaničkih svojstava, stakleno-ionomerni cement koristi se samo kao završni restaurativni materijal na područjima niskog opterećenja. Na onim s većim opterećenjima, trebao bi se zaštititi slojem kompozita na bazi smole. Danas se GIC koristi kao nadomjestak prirodnog dentinu te služi kao baza za kompozitne smole. U minimalno invazivnoj dentalnoj medicini, stakleno-ionomerni cement služi kao glavni materijal za zamjenu izgubljenog prirodnog tkiva. Budući da ima mehanička svojstva slična dentinu te mogućnost prianjanja i otpuštanja fluorida, zastupljen je u brojnim restaurativnim zahvatima.

5.2.2 Biodentin

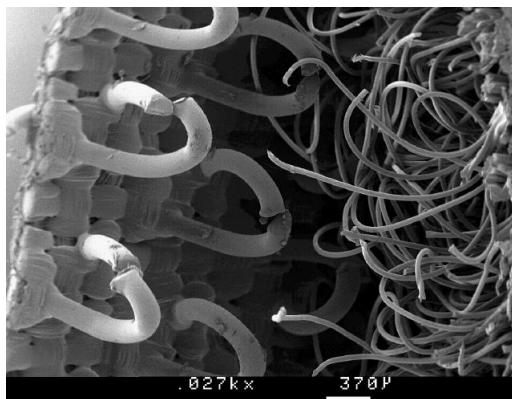
Materijal nastao na bazi kalcijeva silikata naziva se biodentin. Svoju je primjenu pronašao u perforacijama korijena zuba, raznim vrstama ispune te zamjeni dentina. U navedenim je postupcima biološki proizveden dentin u izravnom kontaktu s vezivnim tkivom. Također, ima svojstvo utjecaja na vitalnost periradikularnih stanica. Budući da je ovo još uvijek materijal u razvoju te se počeo koristiti prije desetak godina, moguća je pojava stanične smrti koja nastupa zbog nekroze ili apoptoze.

5.3 Tekstilna industrija

5.3.1 Samoljepljiva vrpca

Samoljepljiva vrpca za odjeću poznatija kao čičak nastala je sasvim slučajno. Naime, nakon šetnje šumom, Švicarac George de Mestral imao je nakupine biljke čičak na svojoj obući. Tijekom njihovog uklanjanja uočio je da se čičak lako odvaja od odjeće, ali se može i ponovo pričvrstiti za tkaninu. Tada je došao na ideju stvaranja sličnog materijala. Svoju je ideju iznio francuskom proizvođaču tkanine i zajedno su razvili samoljepljivu vrpcu, kakva se i danas koristi. Doista, taj

par vrpce, od koji se jedna sastoji od mnoštva savitljivih sićušnih kukica, a druga od odgovarajućih omči, oblikovan je prema obliku kukica na cvijetu (plodu) pravog čička [20].



Slika 5.13: Samoljepljiva vrpca [20]

Način rada samoljepljive vrpce prikazan je na slici 5.13. na kojoj su vidljive dvije trake samoljepljive vrpce, a dobivena je slika nastala pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa. Prvotna je ideja bila da se samoljepljiva traka koristi umjesto patent zatvarača.

5.3.2 Kupaći kostim

Britanski proizvođač sportske opreme *Speedo*, osmislio je novu vrstu kupaćih kostima koji su nazvani *Fastskin*. Glavna ideja razvoja novog materijala za kupaće kostime bila je replicirati strukturu kože morskog psa. Na površini kože, nalaze se okomiti vršci ili zupci, a na novoosmišljenom materijalu oni su napravljeni od smole. Kako su oni okrenuti u suprotnom smjeru od smjera plivanja, površina je u jednom smjeru glatka, dok je u drugom hrapava na dodir. Zupci na površini stvaraju okomite vrtloge što omogućuje bolje prianjanje vode uz tijelo plivača i samim time povećava njegovu brzinu plivanja. Također, ova pojava smanjuje hidrodinamički granični sloj i otpor vode [3].

Na Olimpijskim igrama 2008. godine u Pekingu 98% osvajača medalja u plivanju nosilo je upravo *Fastskin* kupaći kostim.

5.4 Analiza površine biomimetičkih materijala pretražnim elektronskim mikroskopom

Slično kao i prethodno navedeni primjeri, vatrogasno i ronilačko odijelo nastali su po uzoru na prirodu. Replicirajući željena svojstva i strukture nastala je zaštitna oprema i samo vatrogasno odijelo kakvo se i danas koristi. Ronilačko je odijelo nastalo sličnim postupkom kao i ranije opisan kupaći kostim uz dodatne zahtjeve. Oba se odijela sastoje od više slojeva, od kojih se neki slojevi sastoje od različitih površina.

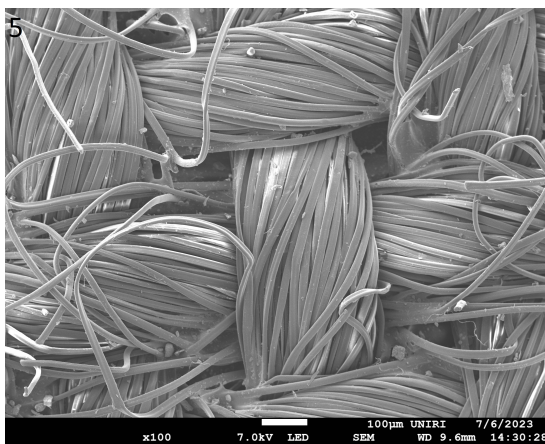
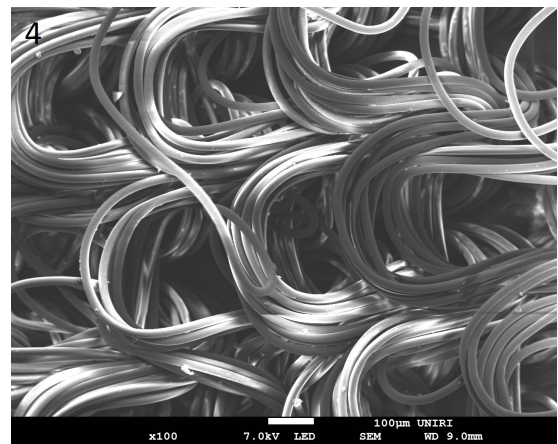
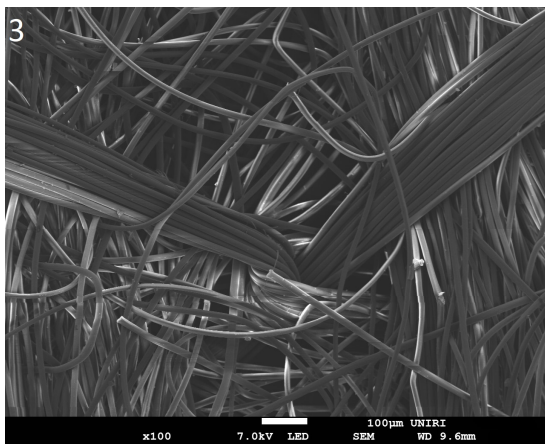
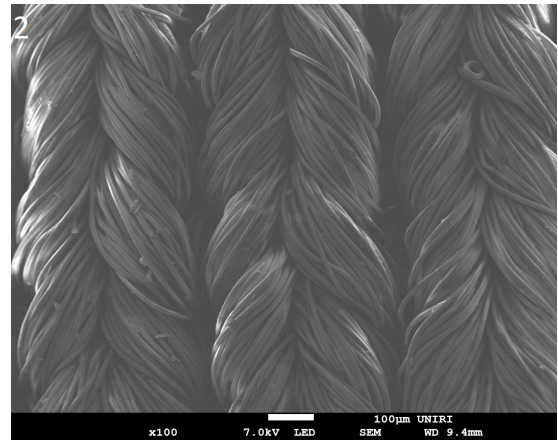
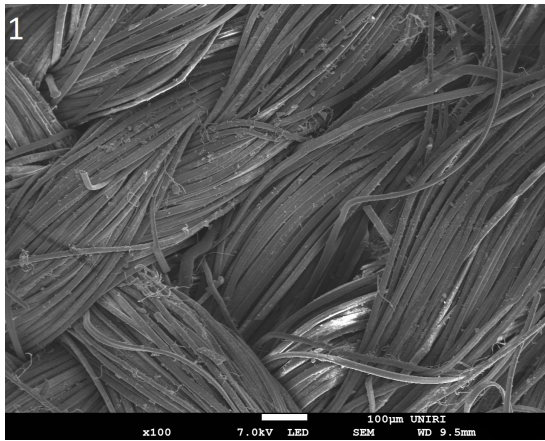
Promatranjem slojeva pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa u Laboratoriju za pretražnu elektronsku mikroskopiju, zajedničkom laboratoriju Fakulteta za fiziku i Centra za mikro- i nanoznanosti i tehnologije Sveučilišta u Rijeci, dobivene su slike struktura navedenih odijela s različitim povećanjima.

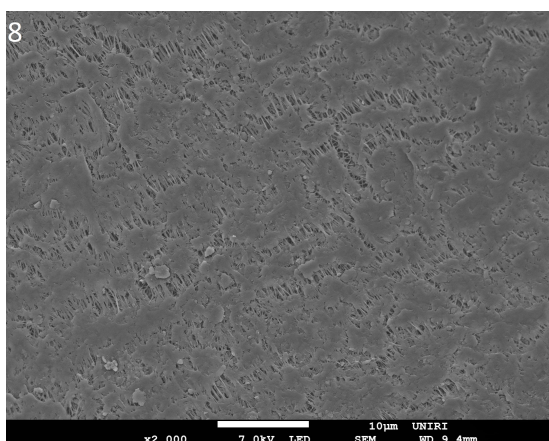
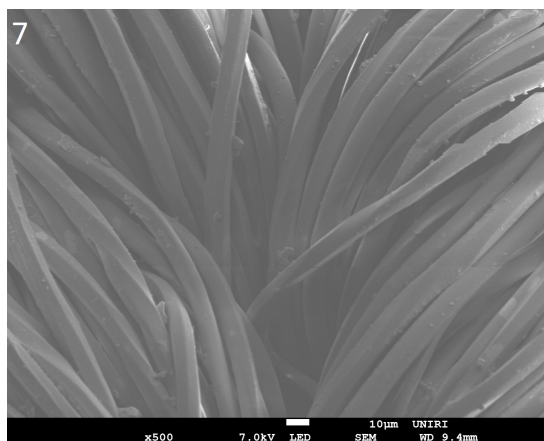
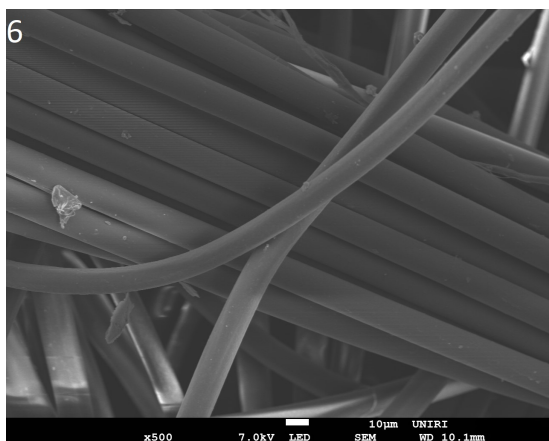
5.4.1 Priprema uzoraka za pretražni elektronski mikroskop

Prvi korak u pripremi uzoraka je pričvršćivanje uzoraka pomoću ugljikove ljepljive trake na metalni nosač. Uzorci trebaju biti očišćeni od prašine i drugih onečišćenja. Također, u cijelom je postupku potrebno upotrebljavati rukavice. Budući da uzorci vatrogasnog i ronilačkog odijela nisu vodljivi, potrebno je nanijeti sloj vodljivog materijala. Mi smo, pomoću uređaja PECS II, na površine uzoraka nanijeli 10 nm zlato-paladija.

5.4.2 Rezultati SEM analize

Metalne nosače s uzorcima vatrogasnog i ronilačkog odijela postavili smo u predkomoru mikroskopa, te nakon postignutog tlaka od 10^{-5} Pa, prebacili u glavnu komoru. Najprije smo optimizirali parametre, napon ubrzanja i struju snopa, pri čemu smo koristili detektor sekundarnih elektrona i radnu udaljenost od 10 mm. U nastavku su prikazane neke od snimljenih SEM slika pri naponu ubrzanja od 7 kV i povećanju od 100 do 2000 puta. Na slici 5.14 (1-8) je vidljivo da je za uzorke vatrogasnog odijela 10 nm vodljivog Au-Pd sloja bilo dovoljno, dok bi za uzorke ronilačkog odijela bilo potrebno nanijeti deblji sloj vodljivog materijala.





Slika 5.14: SEM slike površina materijala od kojih su izrađena vatrogasna (lijevo) i ronilačka odijela (desno). SEM slike 1 do 5 snimljene su pri povećanju od 100 puta, slike 6 i 7 pri povećanju 500 puta, dok je slika 8 snimljena pri povećanju od 2000 puta.

6 ZAKLJUČAK

Priroda je oduvijek čovjeku bila zanimljiva i inspirativna u načinima formiranja struktura i procesa. Razvojem tehnologije u drugoj polovici prošlog stoljeća, znanost sve više odgovora na neodgovorena pitanja i probleme traži u svijetu oko nas. Biomimetički materijali, tako su prisutni od najranijih početaka ljudske vrste i vidljivi su već u primitivnom oružju i oruđu. Tijekom povijesti, oponašanje prirode bilo je sve zastupljenije. Današnju popularnost, znanost o materijalima i sami biomimetički materijali, stvarali su od pokušaja letjelica Leonarda da Vincija sve do raznih medicinskih implantata i modernih kupaćih kostima. Biomimetika je interdisciplinarno područje koje uključuje znanja i procese fizike, kemije, biologije i inženjerstva. Samim time, primjena novonastalih materijala koji oponašaju prirodne je velika. Utjecaj prirode vidljiv je u materijalima koji se koriste u medicini, oblicima i građevnim konstrukcijama objekata, raznim tkaninama i tehnologiji. Budući da je priroda neiscrpan izvor inspiracije, biomimetički materijali svoje mjesto pronalaze u sve više različitih područja. Daljnjim istraživanjem ovih materijala doći će do poboljšanja trenutnih, ali i stvaranja novih.

LITERATURA

1. Goyal, S., Garg, N. & Makkar, S. Biomimetic materials: A comprehensive review. *International Journal of Research in Health and Allied Sciences* **7**, 74–78 (June 2021).
2. Vincenta, J. F. Biomimetic and Bio-enabled Materials Science and Engineering Special Section. *Journal of Materials Research*, 3140–3147 (Dec. 2008).
3. *The Best 50 Biomimicry Examples and Inventions of All Time* en. (7.8.2023.) <https://www.learnbiomimicry.com/blog/best-biomimicry-examples>.
4. (8.8.2023.) <https://www.phy.uniri.hr/hr/znanstveno-istrzivacki-rad/29-hr/ustroj/laboratoriji/800-pretrazni-elektronski-mikroskop.html>.
5. Mokobi, F. *Scanning Electron Microscope (SEM)- Definition, Principle, Parts, Images* (8.8.2023.) <https://microbenotes.com/scanning-electron-microscope-sem/>.
6. *Scanning Electron Microscope: Definition, Parts, Application, Principle, Advantages* (8.8.2023.) Aug. 2023. <https://microbiologynote.com/scanning-electron-microscope-definition/#parts-of-scanning-electron-microscopenbsp>.
7. Lamb, R. *How Biomimicry Works* (9.8.2023.) <https://science.howstuffworks.com/life/evolution/biomimicry.htm>.
8. Schreiner, W. *Biomimicry: A History* (9.8.2023.) <https://ehistory.osu.edu/exhibitions/biomimicry-a-history>.
9. Botham, C. J. *Leonardo da Vinci and Human Flight* (9.8.2023.) <https://www.onverticality.com/blog/leonardo-da-vinci-and-human-flight>.
10. Primrose, S. B. *Biomimetics Nature-Inspired Design and Innovation* 1st ed. (John Wiley & Sons Ltd, 2020).
11. (10.8.2023.) <https://www.merriam-webster.com/dictionary/biomimetics#word-history>.
12. Torgal, F. P., Labrincha, J., Diamanti, M., Yu, C.-P. & Lee, H. *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering* 1st ed. (Springer, London, 2015).

13. Xue, Y. & Hu, X. Electrospun Silk-Boron Nitride Nanofibers with Tunable Structure and Properties. *Polymers* **12**, 1093 (May 2020).
14. *Ash Wood Xylem (SEM)* (9.9.2023.) <https://pixels.com/featured/ash-wood-xylem-sem-science-photo-library.html>.
15. Wilts, B. D., Matsushita, A., Arikawa, K. & Stavenga, D. G. Spectrally tuned structural and pigmentary coloration of birdwing butterfly wing scales. *Journal of The Royal Society Interface* **12**. (10.8.2023.), 20150717. eprint: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsif.2015.0717>. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsif.2015.0717> (2015).
16. *Lotus leaf inspires scientists to create world's first self-cleaning metals* (12.8.2023.) June 2018. https://phys.org/news/2016-06-lotus-leaf-scientists-world-self-cleaning.html#google_vignette.
17. Zhang, K., Zhen, L. & Maxey, M. Self-cleaning of hydrophobic rough surfaces by coalescence-induced wetting transition. *arXiv* (2018).
18. Gruber, P., Bruckner, D. & Hellmich, C. *Biomimetics – Materials, Structures and Processes* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011).
19. Wen, L., Weaver, J. C. & Lauder, G. V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *Journal of Experimental Biology* **217**. (12.8.2023.), 1656–1666. eprint: <https://journals.biologists.com/jeb/article-pdf/217/10/1656/1879964/1656.pdf>. <https://doi.org/10.1242/jeb.097097> (May 2014).
20. Ekstrom, J. *How Velcro Was Invented* (13.8.2023.) <https://www.neatorama.com/2008/06/06/how-velcro-was-invented/>.