

Primjena dijatomeja u nanotehnologiji

Maričić, Barbara

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:226:248539>

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

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



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Marine Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
PREDDIPLOMSKI STUDIJ BIOLOGIJA I TEHNOLOGIJA MORA

Barbara Maričić

PRIMJENA DIJATOMEJA U NANOTEHNOLOGIJI

Završni rad

Split, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
PREDDIPLOMSKI STUDIJ BIOLOGIJA I TEHNOLOGIJA MORA

PRIMJENA DIJATOMEJA U NANOTEHNOLOGIJI

Završni rad

Predmet: Botanika mora

Mentor:

Doc. dr. sc. Zvezdana Popović Perković

Student:

Barbara Maričić

Split, rujan 2021.

Sveučilište u Splitu
Sveučilišni odjel za studije mora
Preddiplomski studij Biologija i tehnologija mora

Završni rad

PRIMJENA DIJATOMEJA U NANOTEHNOLOGIJI

Barbara Maričić

Sažetak

Alge kremenjašice ili dijatomeje (razred Bacillariophyceae) su jednostanični eukariotski organizmi koji najčešće obitavaju u hladnim vodama te imaju važnu ulogu u fiksaciji ugljika. S 12 000 opisanih vrsta danas su najbrojnija skupina algi s karakterističnom ljušturicom koja se još naziva i frustula. Jedinostvena 3D struktura, dostupnost te visoka morfološka varijabilnost dijatomeja ih čini izuzetno privlačnim organizmima na mnogim znanstvenim poljima uključujući i nanotehnologiju. Iako je korištenje frustule u nanotehnologiji još uvijek u početnoj fazi primjene, postaje sve češće. Frustule se već široko primjenjuju kao filteri za uklanjanje metala, filteri za pića i uklanjanja nekih plinova. Istraživanja su pokazala da se mogu koristiti i u isporuci lijekova, zbog svojstava kao što su ne-citotoksičnost, specifična struktura i biorazgradivost. Nadalje, mogu se koristiti za lako otkrivanje opasnih kemikalija, a zbog velike površine koja može apsorbirati veliki broj molekula, mogu se koristiti u solarnim člancima, a predstavljaju i dobrog kandidata za skladištenje vodika.

(16 stranica, 7 slika, 27 literaturna navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: dijatomeje, frustula, nanotehnologija

Mentor: Doc. dr. sc. Zvezdana Popović Perković

Ocjenjivači: 1. Doc. dr. sc. Vedran Poljak
2. Izv. prof. dr. sc. Josipa Ferri
3. Doc. dr. sc. Zvezdana Popović Perković

University of Split
Department of Marine Studies
Undergraduate study Marine Biology and Tehnology

BSc Thesis

APPLICATIONS OF DIATOMS IN NANOTECHNOLOGY

Barbara Maričić

Abstract

Siliceous algae, or diatoms, are single-celled eukaryotic organisms that most commonly inhabit in cold water and play an important role in carbon fixation. With 12,000 described species, today they are the most numerous groups of algae, with characteristic shell that is also called frustule. Because of their unique 3D structure, availability, and high morphological variability, they become attractive in many scientific fields, including nanotechnology. Although the use of diatom frustula in nanotechnology is still in its infancy, their applications are becoming more common. Frustulas are already used as filters for metal removal, filters for drinks, and removal of some gases. Studies have shown that they can be used in drug delivery, due to their non-cytotoxicity, specific structure, and biodegradability. Furthermore, they can be used to easily detect hazardous chemicals, and because of large surface that can absorb lot of molecules, they can be used in solar cells, and as a good candidate for hydrogen storage.

(16 pages, 7 figures, 27 references, original in: Croatian)

Keywords: Diatoms, frustula, nanotechnology

Supervisor: Zvezdana Popović Perković, PhD / Assistant Professor

Reviewers:

1. Vedran Poljak, PhD / Assistant Professor
2. Josipa Ferri PhD / Associate Professor
3. Zvezdana Popović Perković, PhD / Assistant Professor

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. RAZRADA TEME.....	2
2.1. Dijatomeje.....	2
2.1.1. Građa dijatomeja.....	3
2.1.2. Podjela dijatomeja.....	4
2.1.2.1. Pennales	4
2.1.2.2. Centrales.....	5
2.1.3. Utjecaj ekoloških čimbenika na kretanje dijatomeja.....	6
2.1.4. Životni ciklus.....	7
2.2. Dijatomeje u nanotehnologiji.....	8
2.2.1. Dijatomeje u isporuci lijekova.....	9
2.2.2. Dijatomeje u isporuci gena.....	10
2.2.3. Frustula dijatomeja za detekciju plinova.....	11
2.2.4. Lab on chip primjena.....	12
2.2.5. Dijatomeje za skladištenje vodika.....	12
2.2.6. Dijatomeje za solarne članke.....	13
3. ZAKLJUČAK.....	14
4. LITERATURA.....	15

1. UVOD

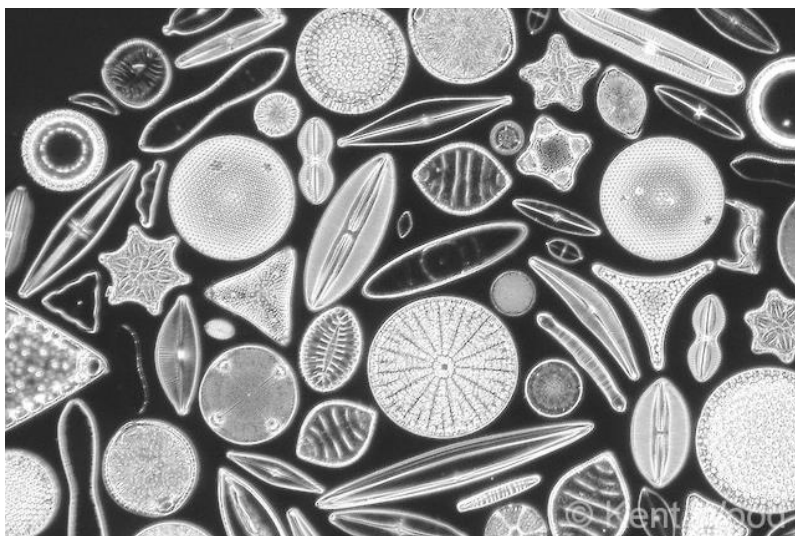
Dijatomeje od 18. stoljeća izgledom i karakterističnim oblicima fasciniraju znanstvenike diljem svijeta. One su jedna od najčešćih vrsta fitoplanktona, a mogu se naći u različitim staništima i ekološkim uvjetima (morska i slatkovodna staništa, na visokim i niskim temperaturama, pri različitim pH vrijednostima itd.). Također, imaju važnu ulogu u oceanima gdje fiksiraju veliku količinu ugljikova dioksida i sintetiziraju ugljikohidrate koji služe kao glavni izvor hrane zooplanktonu u morskim hranidbenim mrežama (Seckbach i Kocrolek, 2011). Njihova silicijeva ljuštura pruža koristan alat za istraživanje fosila. Fosilni dokazi sugeriraju da su dijatomeje nastale tijekom ili prije mezozoika. Najstariji fosilni nalazi dijatomeja su morske centrične dijatomeje, a prvi predstavnici penatnih dijatomeja su se pojavili tijekom mezozoika. Pretpostavlja se da su navedeni jednostanični organizmi nastali endocitobiozom crvene alge koja je ušla (ili je bila progutana) u jednostaničnu heterotrofnu eukariotsku stanicu domaćina (Seckbach i Kocrolek, 2011).

Danas mikroskopski fotosintetski organizmi postaju sve važniji predmet istraživanja prilikom razvoja ekonomski učinkovitih i istodobno ekološki višenamjenskih industrijskih tehnologija (Chepurnov i sur., 2011). Kao rezultat opsežnih interdisciplinarnih istraživanja jednostaničnih alga, dijatomeje su zbog svojih jedinstvenih nano i mikrostruktura i svojstava silicijeva dioksida privukle pažnju, te postale predmet tisuća publikacija u mnogim disciplinama, uključujući biologiju mora, genetiku, ekologiju, nanotehnologiju i medicinu. Dijatomeje nude otkrića i rasprave o obećavajućim novim putevima i istraživanjima razvoja koji otkrivaju golemi potencijal na polju nanotehnologije, a svojom strukturom i primjenom su zaintrigirale čovječanstvo. Potencijalno nude primjenu za razvoj novih tehnologija te rješenje za neke od najvažnijih svjetskih problema, poput energije, raka, čiste vode i proizvodnje hrane (Lošić, 2018).

2. RAZRADA TEME

2.1. Dijatomeje

Dijatomeje (Slika 1) su fotosintetski, mikroskopski, jednostanični, eukariotski fitoplanktonski organizmi koje se nalaze u gornjim slojevima vodenoga okruženja, na dubinama bogatim hranjivim tvarima i svjetlosti (Rosengarten i Herringer, 2018). Danas je poznato preko 250 rodova živih dijatomeja, sa oko 100 000 vrsta. Dominiraju brojnošću i biomasom, te ih nalazimo u moru, slatkim vodama, vlažnim stijenama ili u tlu. Dijatomeje su najbrojnije tijekom proljeća kada je voda bogata nutrijentima (fosfati, nitrati, silikati), dok se drugi ali manji maksimum brojnosti dijatomeja primjećuje tijekom jeseni. Njihove stanice imaju jedinstvenu ljušturicu građenu od amornog silicija i ugljika, te imaju bitnu ulogu u biogeokemijskom ciklusu silicija i ugljika (Galović, 2017). Također, veliki opseg oceana olakšava nam da vidimo značajnu ulogu dijatomeja u fotosintetskoj proizvodnji organskog materijala. Procjena ukupne Zemaljske primarne proizvodnje je $1,4 \times 10^{14}$ kg suhe mase godišnje, od čega su 20-25% pridonijele morske planktonske dijatomeje. Navedene brojke prikazuju kvantitativni značaj dijatomeja u funkcioniranju zemljinog ekosustava (Popović-Perković, 2015). Osim planktonskih dijatomeja postoje i bentičke forme koje rastu na sedimentu ili su pričvršćene za stijene i druge organizme. Mnoge bentičke dijatomeje su fakultativni heterotrofni organizmi i mogu koristiti razne organske supstrate za rast prilikom niskog intenziteta svjetla (Viličić, 2002).



Slika 1. Dijatomeje (izvor: www.illinoisscience.org).

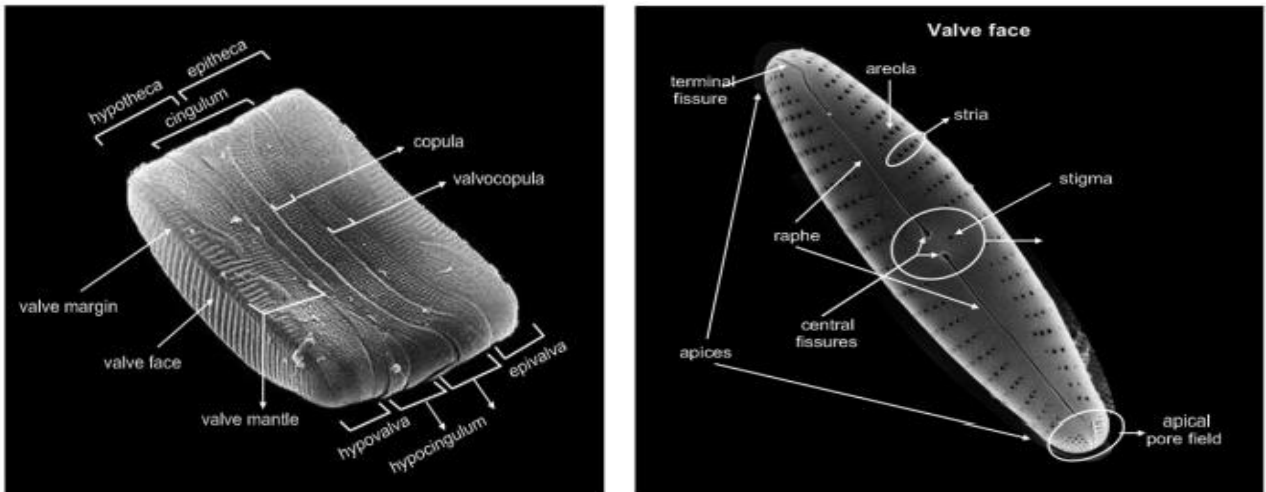
2.1.1. Građa dijatomeja

Stanice alga kremenjašica nemaju staničnu stijenku. Mlada stanica dijatomeje se nakon diobe ili spolnog razmnožavanja obavlja periplastom. Ispod plazmaleme periplasta nalaze se vezikule u kojima se sintetizira amorfni i netopljivi opal ($\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$) iz topljivog silicija koji je u moru prisutan u obliku ortosilicijeve kiseline (H_2SiO) i njezinih topljivih polimera. Naslaga kremen se u vezikulama povećava i izbija na vanjsku stranu stanice. Konačno kremen obavija čitavu stanicu u obliku kremene „kućice” s dvjema ljušturicama (Viličić, 2002).

Kremen ili frustula se sastoje od dva dijela, gornjeg (*epitheca*) i donjeg (*hypotheca*) (Slika 2) koje se preklapaju poput kutije i poklopca. Svaka ljušturica (*theca*) sastoji se od dvije valve, epivalve i hypovalve (Slika 2), koje su povezane pojasom (*mantellum*), a pojas čine copulae i pleurae (Šušnjara, 2016). Unutar valve nalaze se izdužene šupljine (alveoli) koje se pružaju od središta prema rubu valve. Dodatne naslage silicija na ljušturici stvaraju zadebljanja koja se nazivaju rebra (*costae*). Između rebara, unutrašnja i vanjska pregrada alveole je perforirana, a šupljine (*areolae*) čine sačastu strukturu valve. Areole se nižu u nizovima između rebara valve i čine strije (*striae*). Areole mogu biti jednostavnije građeni otvori (poroidne areole) ili složenije građene lokularne areole koje imaju s jedne strane reducirani otvor (*foram areolae*), a s druge ornamentiranu silicijevu sitastu strukturu (*cribrum areolae*). U stanicama nekih vrsta može se pronaći najčešće na polovima valva, kružno područje s nakupinom malih otvorenih areola (*ocelus*). Rebra u nekih dijatomeja mogu ići radijalno od kružne formacije (*anulus*) ili se mogu širiti od jednog zadebljalog rebra (*sternum*). Uz sternum se nalazi prorez (*rapha*). Rapa ima središnju poru (*porus centralis*) u ojačanom središnjem dijelu valve tkz. središnjem čvoru, te apikalnu poru (*porus apicalis*) na vanjskom dijelu valve. Rapa najčešće završava sa strukturom nazvanom helictoglossum. Ona može biti s unutrašnje strane premošćena silicijevim mostovima, pa se tako stvara rafa s kanalom (npr. kod roda *Nitzschia*). Na površini valve česti su izdanci, porulae. Portule se dijele na fultoportulae koje dolaze kod centrica, a sastoje se od produžene cijevi s rubnim prorezima. Drugi tip izdanaka rimoportulae, koje su prisutne kod svih dijatomeja, su jednostavniji niži cjevasti otvori koji nemaju satelitske proreze, a s vanjske strane teke često se otvaraju jednostavnim otvorom (Viličić, 2002).

Karakterističan pigment za dijatomeje je smeđi fukoksantin. Osim fukokstantina dijatomeje sadrže ksantofile kao što su neofukoksantin, diadinoksantin i diatoksantin. Od

klorofila dijatomeje sadrže klorofil a i c₂ a može se naći i klorofil c₁ ili c₃ dok klorofil b nije nikad nađen. Svi pigmenti su smješteni u kloroplastima, dok im je najvažnija rezervna tvar krizolaminarin, β- 1,3 povezani glukan, koji se čuva u obliku otopine u posebnim vakuolama. Diyatomeje također često akumuliraju lipide (Popović-Perković, 2015).



Slika 2. Struktura frustule dijatomeja (izvor: Cristobal i sur., 2020).

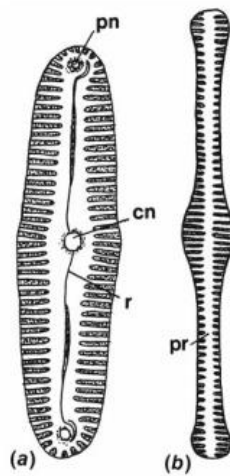
2.1.2. Podjela dijatomeja

Razred Bacillariophyceae s obzirom na strukturu njihove ljušturice može se podijeliti u dva reda; Centrales koje obuhvaćaju vrste s radijalno simetričnim stanicama te Pennales koje obuhvaćaju vrste s bilateralno simetričnim stanicama.

2.1.2.1. Pennales

Karakteristika ove skupine je postojanje središnje brazde koja se pruža duž čitave stanice i naziva se pukotina ili rafa koji je podijeljen na dva dijela pomoću središnjeg čvora (Slika 3). Kroz rafu prilikom kretanja se ispušta sluzavi polisaharid koji pomaže u njihovom kretanju odnosno klizanju po površini. Ornamentacija kod ove skupine je perasto raspoređena oko središnje pukotine. Postoje oblici koji nemaju sistem rafe, već strukturu koju nazivamo pseudofora (Slika 3). Rafa nije pukotina u stanici već umjesto toga ima oblik slova S koja se širi na vanjskom i unutrašnjem tkivu. Kod penatnih dijatomeja mogu se provući tri osi i tri

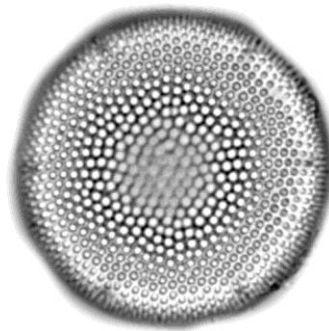
ravnine simetrije, a stanice nekih vrsta mogu biti simetrične samo s obzirom na jednu ravninu simetrije (Galović, 2017).



Slika 3. a) struktura stanice s rafom, centralni nodul (cn), polarni nodul (pn)
b) struktura stanice sa pseudoforom (izvor: Lee, 2008).

2.1.2.2. Centrales

Red Centrales (Slika 4) je morska planktonska skupina s radijalnom simetrijom kroz koju se može povući bezbroj ravnina simetrije koje prolaze kroz perivalvalnu os. Strukture na valvama su poredane radijalno ili koncentrično. S valvalne strane su okruglastoga oblika, a s pleuralne su pravokutnoga oblika. Spolni način razmnožavanja je ogamija, a nespolni vegetativni (Galović, 2017).



Slika 4. Red Centrales (izvor: <https://diatoms.org/genera/cyclostephanos>)

2.1.3. Utjecaj ekoloških čimbenika na kretanje dijatomeja

Prilagođavanje pokretljivosti dijatomeja jedinstveni je mehanizam koji se razlikuje od većine mikroorganizama. Za razliku od ostalih protista koji imaju bičeve za plivanje ili ameboidno kretanje, stanice dijatomeja su okružene silicijevim dioksidom koji ograničava njihovo kretanje. Smatra se da dijatomeje tijekom svog kretanja po površini izlučuju polisaharidna vlakna kroz rafu, koja su zapravo glavni mehanizam njihove pokretljivosti, također pokazuju mehanizam kretanja naprijed – nazad (Wolske, 2015). Reakcije pokreta mogu se vidjeti kada dijatomeje reagiraju na vanjske podražaje. Svjetlost ima važnu ulogu u pokretljivosti dijatomeja. Smatra se da imaju foto detekciju na vrhu stanice, tako će neke vrste biti dominantnije na visokoj razini svjetla ili tijekom ranih jutarnjih sati. Svakako kretat će se kada im je potrebno svjetlo za obavljanje fotosinteze ili će se držati podalje kako bi izbjegli štetne učinke radijacije. Hranjive tvari jedni su od vanjskih podražaja koji mogu utjecati na kretanje dijatomeja. Dominacija se može uočiti u anoksičnim slojevima, jer je taj sloj bogat anorganskim oblicima dušika. Nadalje, stanice u različitim fazama stanične diobe mogu se naći u područjima s hranjivim tvarima, što je zapravo pogodno za njihov rast. Također, za kratko vrijeme u hipertoničnim otopinama može doći do promjene kretanja, dok u ekstremnim hipertoničnim otopinama dolazi do prestanka pokretljivosti i to unutar 5 sekundi (Greeshma, 2011).

2.1.4. Životni ciklus

Kao i drugi jednostanični organizmi dijatomeje imaju dva načina razmnožavanja: spolno i nespolno. Nespolni ili vegetativni oblik, je glavni oblik razmnožavanja kod ovih organizama. Svaka valva roditeljske stanice izgradi sebi novu hipoteku, te dolazi do podjele gdje svaka polovica sadrži epiteku ili hipoteku. U svakoj se podijeljenoj polovici stanici formira nova hipoteka, dok se u drugoj smanjuje (Slika 5) (Brajković, 2019).

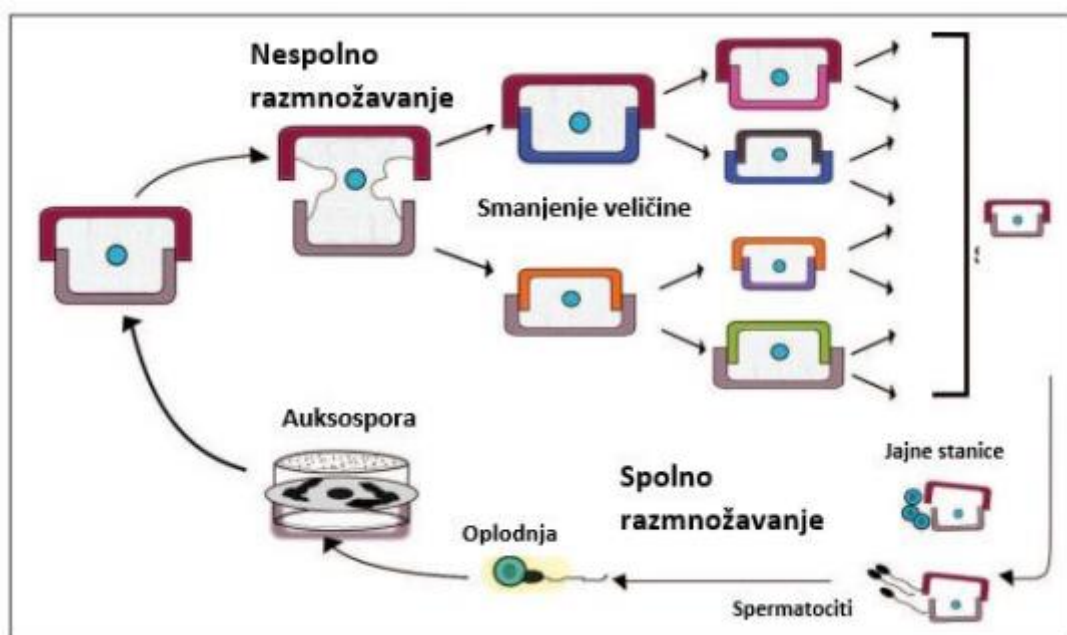
Spolno razmnožavanje ili stvaranja auxospora će se javiti u dva slučaja: ako se veličina stanice smanji na jednu trećinu najveće moguće veličine, ili tijekom utjecaja vanjskih faktora (temperature, svjetla, hranjivih tvari). Za razliku od ostalih algi, dijatomeje se spolno razmnožavaju kako bi povećale veličinu stanice (Slika 5) (Brajković, 2019). Iako se smatralo

da su auxospore rezultat spolnog razmnožavanja poznato je da nastaju autogamijom gdje se dvije haploidne jezgre unutar stanice spajaju, ili apogamijom gdje se ne odvija fuzija gameta (Lee, 2008). Ovisno o vrsti, auxospore prema Lee-u (2008) se razvijaju na sljedeća tri načina:

1) Izodijametrične auxospore – obično je spojena za roditeljske valve tijekom razvoja, te posjeduje staničnu stijenku s uklopljenim ljuskama unutar kojih se proizvode kupolaste valve zrelih vegetativnih stanice.

2) Properizonialne auxospore – najčešće ih nalazimo kod centrica čije su zrele auxospore ne sferične. Dijelovi i trake nezrele kuglaste auxospore nastaju iz asimetrične auxospore. Trake se nazivaju properzonium.

3) Perizonialne auxospore – nezrela kuglasta auxospora ima ljuske ugrađene u primarnu stijenku. Primarna stijenka auxospore se dijeli na dvije jednake polovice. Auxospora stvara trake koje ukalupljuju stanicu u tubularni perizonium.



Slika 5. Prikaz spolnog i nespolnog razmnožavanja dijatomeja (izvor: Matek, 2020).

2.2. Dijatomeje u nanotehnologiji

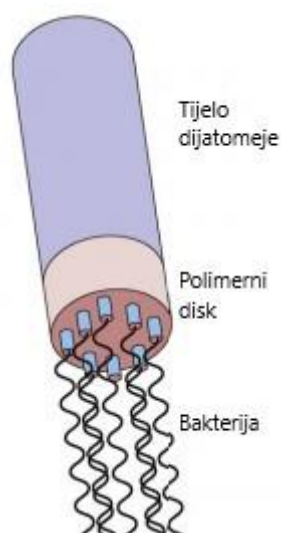
Dijatomeje su postale zanimljive za industrijski svijet tijekom posljednja dva desetljeća, zbog karakteristika koje omogućuju izradu mikro i nano tehnologije. Ponajprije, složenih 3D struktura s velikim omjerima površine i volumena, lake i jeftine dostupnosti zbog eksponencijalnog rasta u ambijentalnim uvjetima, potencijala prilagođenih 3D struktura za genetski inženjering i visokoj morfološkoj varijabilnosti među tisuće različitih vrsta dijatomeja (Pawolski, 2018).

Dijatomeje nude mogućnost točne reprodukcije nanostrukturiranog silicijeva dioksida uz minimalne troškove (Terracciano i sur., 2018), te se mogu uzgajati zbog svojih unutar staničnih metabolita poput EPA, esencijalnih lipida i aminokiselina. Uzgoj dijatomeja može pružiti razne učinkovite primjene u nanotehnologiji, pa tako organski ekstrakti dijatomeje *Skeletonema costatum* i vodeni ekstrakt *Hasleaostrearia* sp. djeluju protiv tumora, raka pluća i HIV-a kod čovjeka. Osim toga dijatomeje poput *Thalassiosira pseudonana* i *Phaeodactylum tricornutum* su korištene u isporuci antibiotika (Mishra i sur., 2017).

Istraživanja su pokazala da dijatomeje svojom strukturom i sposobnošću stvaranja silicijeva dioksida čak i na Antartiku, gdje je temperatura vode ispod točke smrzavanja, mogu poslužiti kao najbolji kandidati za nanotehnologiju, jer preživljavaju u ekstremnim uvjetima poput niske temperature i saliniteta, te pri niskoj razini svjetla. Zbog toga uobičajene antarktičke vrste dijatomeja *Corethron criophilum* i *C. pennatum* mogu pridonijeti razvitku mnogih tehnologija (Gordon i sur., 2010).

2.2.1. Dijatomeje u isporuci lijekova

Jedinstvena struktura frustule dijatomeja i njegova ne-citotoksičnost izazvala je veliko zanimanje kao alat za isporuku lijekova u medicini. Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, različiti mezoporozni silikatni materijali intenzivno su se koristili u području isporuke lijekova. Njihova je sinteza zahtjevna, dugotrajna i energetski intenzivna, što čini cijeli postupak skupljim i neisplativim, no priroda je pružila vrlo zanimljive materijale odnosno dijatomejsku frustulu (Uthappa i sur., 2018). Frustule imaju kombinaciju fizikalno kemijskih svojstava, što ih čini potencijalnom zamjenom za sintetičke materijale u sustavu za isporuku lijekova. Također imaju specifičnu strukturu u obliku tablete sa šupljim i velikim unutarnjim prostorom koje karakteriziraju mikro i nano pore, velika propusnost, mala gustoća, biorazgradivost i ne toksičnost što ih čini perspektivnima za isporuku lijekova. Tijekom godina razvijene su razne metode za kemijsku funkcionalizaciju staničnih stijenki, omogućujući modifikaciju vezanja i oslobođenje lijeka i imobilizaciju funkcionalnih antitijela (Utahappa i sur., 2018). Dizajn učinkovitih nano nositelja za unošenje lijeka u stanicu pružio je mogućnost izravnog dosezanja željenog ciljanog mjesta (npr. tumora ili bolesnog tkiva) (Terracciano i sur., 2018). Sofisticiraniji sustavi za dostavu lijekova, poput samohodnih mikrorobota, također bi mogli imati koristi od jedinstvene frustule dijatomeja. Znanstvenici su razmatrali o mikrouređajima na bazi dijatomejske frustule koja bi mogla putovati unutar ljudskog tijela, te izvoditi niz složenih medicinskih postupaka poput dostave lijekova, popravka stanice itd. S obzirom na njihova fizička i strukturna svojstva, dijatomeje su idealne za projektiranje ovih budućih robotskih uređaja. Međutim ovdje nedostaje samohodna funkcija, a da bi smo uveli pokretljivost, na dijatomeje bi se mogle priključiti bakterije kao biomotori, koji bi radili pomoću prirodnog izvora energije glukoze (Slika 6) (Gordon i sur., 2009).



Slika 6. Model samohodnog nosača lijeka s dijatomejom i priključnim bakterijskim biomotorima (izvor: Gordon i sur., 2009).

2.2.2. Dijatomeje u isporuci gena

Nanočestice silicijeva dioksida predstavljaju dobru podlogu za isporuku gena. Liječenje genetskih poremećaja izuzetno je napredovalo sposobnošću identificiranja specifičnih gena, čiji je nedostatak ili odsutnost odgovoran za specifično patološko stanje. U genetskoj utemeljenoj bolesti, korištenje posebno dizajniranih terapijskih gena dostavljenih u odgovarajuće stanice znatno će poboljšati terapiju. Dostava gena *in vivo* smatra se jednom od interesantnijih tamo gdje su genetski materijali (npr. DNA, RNA, i oligonukleotidi) sposobni za primjenu u inhibiciji neželjene ekspresije gena ili sinteza terapijskih proteina. Zbog toga je primjena nanotehnologije u napretku ne virusnih vektora transfekcije za gensku terapiju bitna (Dolatabani i Guardia, 2011).

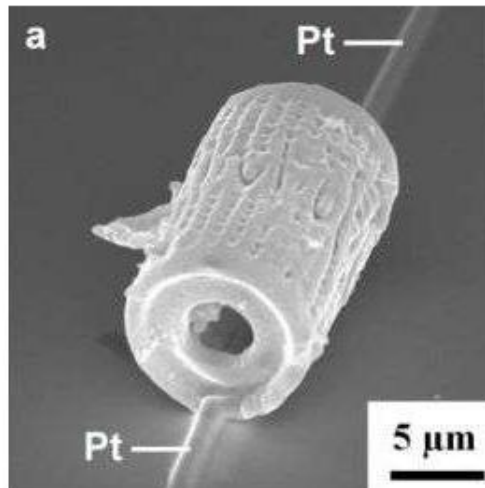
Silicijev dioksid je poznat kao perspektivni kandidat za nevirusni vektor isporuke gena, zasnovan na stvaranju DNA kompleksa s transfekcijskim reagensima prije učinkovite isporuke u stanicu. Kako bi se zgusnula plazmidna DNA, većina reagensa za transfekciju DNA koristi kationsku prirodu sintetičkih polimera, dendrimera i lipida, pa se čini da bez modifikacije na površini, nanočestice od čistog silicijeva dioksida nisu sposobni za DNA

kondenzaciju. Ipak, u uzgojenim stanicama, materijali mogu poboljšati druge kationske reagense za transfekciju za pojačanu dostavu gena, uglavnom zbog koncentracijskog mehanizma u kojem se javljaju kompleksi reagensa za transfekciju DNA koristeći guste silikatne sirovine na površini staničnih slojeva uslijed gravitacije. Ovi sustavi za isporuku DNA posredovani silicijevim dioksidom bili bi vrlo učinkoviti, a različite komponente (npr. fluorescentne boje) mogu olakšati unutarstanično praćenje (Dolatabani i Guardia, 2011).

Dodatne preinake površine značajno su proširile korist nanočestica silicijeva dioksida u isporuci DNA. Na primjer, silicijev dioksid modificiran kationim aminosilanima je sposoban za kondenzaciju i isporuku DNA. Gotovo su sve studije pokazale da bi silicijev dioksid mogao biti izvrstan, biokompatibilni kandidat za prijenos gena u različite stanice i tkiva, te da bi površinski modificirani silicijev dioksid mogao poboljšati neovisni prijenos plazmida DNA i RNA u stanici sisavaca. Uzimajući u obzir kemijsku inertnost i biokompatibilnost silicijeva dioksida, ova tehnologija može ponuditi novu platformu za ne virusnu dostavu gena. Nano materijali od silicijevog dioksida stoga pružaju mogućnosti za razvoj novih dijagnostičkih i terapijskih sredstava (Dolatabani i Guardia, 2011).

2.2.3. Frustula dijatomeja za detekciju plinova

Sandhage i sur. (2007) uspostavili su postupke za površinsko presvlačenje frustule silicijeva dioksida u SnO_2 i Zn_2SiO_4 , te su dokazali da stanične stijenke temeljene na siliciju ili stanične stijenke koje su presvučene u SnO_2 i Zn_2SiO_4 mogu se koristiti kao plinski senzori za dušikov ili vodikov oksid, a opet imaju primjenu drugih plinova poput kisika, ugljičnog monoksida i dušikovog dioksida (Slika 7). Ovi novo razmjerni senzori pokazali su identične ili bolje odazive kao prethodno razvijeni senzori za plin. Nadalje pretvaranje silicijevog dioksida u silicij se može koristiti za fotoluminiscenciju u stanicama dijatomeja. Budući da je fotoluminiscencija pod utjecajem okolnih plinova, bilo bi moguće stvaranje fotoluminiscentnih plinskih senzora koji detektiraju dušikov dioksid, metan, ugljični monoksid te drugo (Pawolski, 2018).



Slika 7. Prikaz senzora napravljen od mikroporozne silicijske strukture pretvorene iz frustule dijatomeja (izvor: <https://phys.org/>).

2.2.4. "Lab on a Chip" primjena

Tehnologija Lab on a chip temelji se prvenstveno na mikrosustavima koji uključuju mikroelektroničke i biološke komponente, zato se frustula dijatomeja lako uklapa u koncept mikroskopske analize sustava (mTAS) ili laboratorija na čipu (Mehta, 2008). Takav sustav zahtijeva vrlo male veličine uzoraka, pa se tako mogu koristiti u proizvodnji osjetljivih uređaja za lako otkrivanje i kromatografiju različitih biomolekula i opasnih kemikalija iz različitih uzoraka (Ghobara i Mohamed, 2019).

2.2.5. Dijatomeje za skladištenje vodika

Energija vodika predložena je kao alternativno gorivo koje ima svojstvo čistoće i visoke kalorijske vrijednosti, međutim skladištenje vodika posebno je izazovno jer je uspostavljanje sigurnosnog i učinkovitog sustava teško na sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku. Prirodni minerali kao materijali za skladištenje vodika, poput metala, mikroporozni metalni materijali (MMoM), silikatne nanocijevi, magnezijev hidrid (MgH_2) su nedavno razvijeni, međutim njihove visoke temperature, disocijacija, hidriranje-dehidriranje ograničavaju njihovu uporabu u aplikacijama povezanim s vodikom. Iznenadujuće, velika

poroznost s velikom površinom, malom veličinom čestica, snažnom adsorpcijom i izvrsnom toplinskom stabilnošću čine dijatomeje savršenim kandidatom za skladištenje vodika (Zhang i Sun, 2018a).

2.2.6. Dijatomeje za solarne članke

Solarni članci su klasificirani kao silicijski solarni članci, nanokristalni solarni članci osjetljivi na boje, plastični solarni članci i sl.. Među njima su silicijski solarni članci s jedinstvenim prilagodljivim optičkim i elektroničnim svojstvima koji su postali najdominantniji u primjenama solarne energije. Silicijski poluvodiči nisu dobri vodiči za električnu energiju, što dovodi do velikog otpora i istovremenog gubitka mase. Gratzel i O'Regan (1991) su objavili izvješće kojim su predstavili novi tip solarnih članaka osjetljivih na boje koja je imala 7% učinkovitosti temeljena na nanokristalnim TiO_2 . TiO_2 je ključan zbog svojih optičkih, električnih i bioloških svojstava koje mogu biti aktivirane UV svjetlošću, međutim kod TiO_2 nedostaje velika površina koju pružaju nanočestice. Tako bi specifična površina dijatomeja mogla poboljšati učinkovitost solarnih članaka zbog velikog broja molekula koje se apsorbiraju na njihovoj površini. Stoga su rezultati eksperimenta vođeni ovom temom dokazali da miješanje frustule dijatomeja s TiO_2 može poboljšati efekt zarobljavanja svjetlosti i pravilnim optičkim raspršivanjem (Zhang i Sun, 2018b).

3. ZAKLJUČAK

Dijatomeje su fotosintetske mikro alge koje su izazvale veliko zanimanje na raznim istraživačkim područjima. Njihove jedinstvene ljušturice pružile su čovječanstvu razne primjene u biomedicini, genetici, energetskim aplikacijama itd. Istraživanja dijatomeja brzo prelaze iz podcijenjenih domena u visoku primjenu u nanotehnologiji i mikroprodukciji. Svjedočimo značajnom napretku u razumijevanju strukturnih, mehaničkih, optičkih svojstava dijatomeja što je dovelo do nanoizradnje i inženjeringa novih materijala i uređaja na bazi dijatomejskog silicijeva dioksida (mikrosenzori, optički uređaji, uređaji za pročišćavanje vode, laboratorija na čipu itd.) (Gordon i sur., 2009). Diyatomeje s drugim nanomaterijalima obećavaju pristup poljima vezanim uz energiju, solarne ćelije, skladištenje vodika i toplinske energije, proizvodnju biogoriva itd. (Zhang i Sun, 2018a). Karakterizirani hijerarhijskom strukturom pora, velikom površinom, lakoj dostupnosti, iskorištene su za razvoj inovativnih uređaja za biomedicinsku primjenu, te predstavljaju alternativu za buduće uređaje za isporuku lijekova i gena (Terracciano i sur., 2018). Iako je nanotehnologija dijatomeja još na početku razvoja smatra se da bi one mogle biti rješenje mnogim važnim svjetskim problemima.

4. LITERATURA

- Brajković A. 2019. Optimizacija uvjeta fotoformnog uzgoja i karakterizacija dijatomeje izolirane iz Jadranskog mora. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 86 str.
- Chepurnov VA, Chaerle P, Roef L, Meirhaeghe AV, Vanhoutte K. 2011. Classical breeding in diatoms: Scientific background and practical perspectives. U: Seckbach J, Kociolek JP. (ur.), *The Diatom world*. Springer, Netherlands, str. 171-173.
- Cristobal G, Blanco S, Bueno G. 2020. Modern Trends in Diatom Identification,
- Dolatabani J, Guardia M. 2011. Applications of diatoms and silica nanotechnology in biosensing, drug, and gene delivery, and formation of complex metal nanostructures. *TrAc Trends in Analytical Chemistry*, 30: 1538-1548.
- Galović S. 2017. Taksonomski sastav i ekologija zajednice planktonskih dijatomeja u Južnojadranskoj kotlini. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, str. 71.
- Ghobara M, Mohamed A. 2019. Diatomaceous Earth-Based Lab-on-a-chip, U: Seckbach J, Gordon R. (ur.), *Diatoms fundamentals and applications*. 100 cummings Centar, Beverly, str. 494.
- Gordon R, Losic D, Tiffany MA, Nagy SS, Sterrenburg F.A.S. 2009. The Glass Menagerie: diatoms for novel applications in nanotechnology. *Trends in biotechnology*, 27: 116-127.
- Gordon R, Witkowski A, Gebeshuber IC, Allen CS. 2010. The Glass Menagerie: The Diatoms of Antarctica and their potential roles in nanotechnology. *Trend sin biotechnology*, 25: 7-12.
- Gratzel M, O'Regan B. 1991. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 6: 737-740.
- Greeshma N. 2011. Diatoms for nanomanufacturing. Diplomski rad, University of Gothenburg, str. 76.
- Lee RE. 2008. Evolution of two membranes of chloroplast endoplasmic reticulum and the Chlorarachniophyta, U: Lee RE. (ur.), *Phycology-fourth edition*, Cambridge University press, Cambridge, str. 383.
- Lošić D. 2018. Diatom nanotechnology. Royal Society of Chemistry, Cambridge, str: 286
- Matek A. 2020. Optimizacija umjetnog osvjetljenja u uzgoju laboratorijskih kultura dijatomeja *Achnanthes elongata* i *poulinea lepidochelicola*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, str. 77.

- Mehta DM. 2008. Lab on chip technology for Health and Environmental Application. *Nanotechnology and the Developing World*, 5: 400-407.
- Mishra M, Arukha AP, Bashir T, Yadav D, Prasad GBKS. 2017. All New Faces of Diatoms: Potential Source of Nanomaterials and Beyond. *Frontiers in Microbiology*, 8: 1239.
- Pawolski D. 2018. Structures and silica forming properties of insoluble organic matrices from diatoms, *Doktorska disertacija*, University of Dresden, str. 105.
- Popović-Perković Z. 2015. Interna skripta iz predmeta Botanika mora, Sveučilište u Splitu
- Rosengarten G, Herringer JW. 2018. Interactions of Diatoms With Their Fluid Environment, U: Losic D. (ur.), *Diatom nanotechnology*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, str. 14.
- Sandhage KH, Allan SM, Dickerson MB, Ernst EM, Gaddis CS, Shian S, Weatherspoon MR, Ahmad G, Cai Y, Haluska MS, Snyder RL, Unocic RR, Zalar FM. 2007. Inorganic Preforms of Biological Origin: Shape-Preserving Reactive Conversion of Biosilica Microshells (Diatoms). U: Behrens P, Bauerlin E. (ur.), *Handbook of Biomineralization*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, str. 235-237.
- Seckbach J, Kociolek JP. 2011. *The Diatom World*. Springer, Netherlands, str. 557.
- Šušnjara M. 2016. Dijatomeje kao biološki pokazatelji ekološkog stanja Izvora rijeke Gacke. *Diplomski rad*, Sveučilište u Zagrebu, str. 56.
- Terracciano M, Rea I, Stefano L, Santos H. 2018. Natural Nanostructured Silica from Diatoms, U: Losic D. (ur.), *Diatom nanotechnology*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, str. 203-204.
- Uthappa UT, Brahmkhatri V, Sriram G, Jung HY, Yu J, Kurkuri N, Aminabhavi TM, Altalhi T, Neelgund GM, Kurkuri MD. 2018. Nature engineered diatom biosilica as drug delivery systems. *Journal of Controlled Release*, 281: 70-83.
- Viličić D. 2002. *Fitoplankton Jadranskog mora; biologija i taksonomija*, Školska knjiga, Zagreb, str. 247.
- Wolske AL. 2015. Effects of multiple species on motility in diatom assemblages. *Diplomski rad*, University of Chicago, str. 75.
- Zhang YX, Sun XW. 2018a. Diatom for Hydrogen Storage. U: Losic D. (ur.), *Diatom nanotechnology*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, str: 191.
- Zhang YX, Sun XW. 2018b. Diatom for solar cells. U: Losic D. (ur.), *Diatom nanotechnology*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, str. 185.