

Eksperimentalni i komercijalni kompozitni materijali s remineralizacijskim učinkom

Dukarić, Ksenija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, School of Dental Medicine / Sveučilište u Zagrebu, Stomatološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:127:682179>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb School of Dental Medicine Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

Stomatološki fakultet

Ksenija Dukarić

**EKSPERIMENTALNI I KOMERCIJALNI
KOMPOZITNI MATERIJALI S
REMINERALIZACIJSKIM UČINKOM**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.

Rad je ostvaren u: Zavod za endodonciju i restaurativnu stomatologiju, Stomatološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Mentor rada: doc. dr. sc. Matej Par, Zavod za endodonciju i restaurativnu stomatologiju, Stomatološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Lektor hrvatskog jezika: Silvija Košćec, magistra edukacije hrvatskog jezika i književnosti, magistra pedagogije

Lektor engleskog jezika: Mihovila Lozančić, magistra prevođenja i jezičnih usluga

Rad sadrži: 33 stranice

8 slika

Rad je vlastito autorsko djelo koje je u potpunosti samostalno napisano uz naznaku izvora drugih autora i dokumenata korištenih u radu. Osim ako nije drukčije navedeno, sve ilustracije (tablice, slike i dr.) u radu su izvorni doprinos autora diplomskog rada. Autor je odgovoran za pribavljanje dopuštenja za korištenje ilustracija koje nisu njegov izvorni doprinos, kao i za sve eventualne posljedice koje mogu nastati zbog nedopuštenog preuzimanja ilustracija, odnosno propusta u navođenju njihova podrijetla.

Zahvala

Hvala mojem mentoru doc. dr. sc. Mateju Paru na pomoći pri izradi ovog diplomskog rada. Najveće mu hvala na svim savjetima, prenesenom znanju, pruženim prilikama, proširenim vidicima i uloženom vremenu koje je nesebično dijelio u svrhu mojeg napretka tijekom studiranja.

Hvala mojoj sestri Ivani, braći Mislavu i Mariu te roditeljima Ani i Ivanu na svojoj podršci tijekom školovanja.

Hvala mojim prijateljima zbog kojih je ovo putovanje bilo još zabavnije.

EKSPERIMENTALNI I KOMERCIJALNI KOMPOZITNI MATERIJALI S REMINERALIZACIJSKIM UČINKOM

Sažetak

Kompozitni materijali s remineralizacijskim učinkom sve su više zastupljeni u znanstvenim istraživanjima, a postupno ulaze i u kliničku praksu s ciljem smanjenja pojave sekundarnog karijesa kao najvažnijeg čimbenika neuspjeha kompozitnih restauracija zbog polimerizacijskog skupljanja i posljedičnog nastanka marginalne pukotine. Takvi materijali sadrže aktivna punila koja potiču remineralizaciju tvrdih zubnih tkiva postupnim otpuštanjem kalcijevih, fosfatnih, fluoridnih i ostalih iona. Uz remineralizaciju do koje dolazi ugradnjom iona u kristalnu rešetku hidroksiapatita tvrdih zubnih tkiva, moguća je i precipitacija kalcijevih fosfata na površini materijala. Jedno od poznatijih punila kompozitnih materijala koje može služiti kao izvor remineralizirajućih iona je bioaktivno staklo čija se struktura može prilagođavati ovisno o namjeni, stoga je ono danas zastupljeno kao punilo u eksperimentalnim, ali i u nekim komercijalnim kompozitnim materijalima. Pod pojmom „bioaktivnost“ kod bioaktivnog stakla podrazumijeva se otpuštanje remineralizirajućih iona u vodenom mediju i taloženje hidroksiapatita na površini čime se teoretski može zabrtviti marginalna pukotina. Dodatni učinci bioaktivnog stakla su alkalizacija okolnog vodenog medija i antibakterijski učinak. Najpoznatiji komercijalni kompozitni materijal s remineralizacijskim učinkom je Cention koji zbog zadovoljavajuće estetike i mehaničkih svojstava, mogućnosti postavljanja u jednom debelom sloju, remineralizirajućeg djelovanja i financijske prihvatljivosti predstavlja potencijalnu alternativu konvencionalnim kompozitnim materijalima. Također, dostupni komercijalni kompozitni materijali s remineralizacijskim učinkom su Activa Bioactive, Activa Presto i Surefil One. Nedostatak komercijalnih materijala s remineralizacijskim učinkom jest prebrzi dolazak na tržište i nedovoljno provedenih kliničkih istraživanja kojima bi se pokazao stvarni remineralizacijski učinak na tvrda zubna tkiva.

Ključne riječi: sekundarni karijes; remineralizacijski učinak; bioaktivno staklo; eksperimentalni kompozitni materijali; komercijalni kompozitni materijali

EXPERIMENTAL AND COMMERCIAL COMPOSITE MATERIALS WITH REMINERALIZING EFFECT

Summary

Remineralizing composite materials are increasingly represented in scientific studies and are gradually finding their way into clinical practice in order to reduce the occurrence of secondary caries as the most important factor in the failure of composite restorations due to polymerization shrinkage and the resulting formation of marginal gaps. These materials contain active fillers that stimulate remineralization of the tooth structure through the gradual release of calcium, phosphate, fluoride and other ions. In addition to remineralization, which occurs through the incorporation of ions into the crystal lattice of the hydroxyapatite of the hard dental tissues, the precipitation of calcium phosphates on the surface of the material is also possible. One of the better-known fillers in composite materials that can serve as a source of remineralizing ions is bioactive glass, the structure of which can be adapted depending on the intended use, which is why it is now included as a filler in experimental, but also in some commercial composite materials. The term "bioactivity" in bioactive glass is used to indicate the release of remineralizing ions in the aqueous medium and the deposition of hydroxyapatite on the surface, which can theoretically seal the marginal gap. Additional effects of bioactive glass include the alkalization of the surrounding aqueous medium and the antibacterial effect. The best-known commercial composite material with a remineralizing effect is Cention, which is a potential alternative to conventional composite materials due to its satisfactory esthetics and mechanical properties, the possibility of applying a thick layer, its remineralizing effect and its financial acceptability, represents a potential alternative to conventional composite materials. Other commercially available remineralizing composite materials include Activa Bioactive, Activa Presto and Surefil One. A major shortcoming of commercial remineralizing materials is their rapid introduction to the dental market, while there is insufficient clinical evidence of their actual remineralizing effect on dental hard tissue.

Key words: secondary caries; remineralization effect; bioactive glass; experimental composite materials; commercial composite materials

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI	3
2.1. Sastav kompozitnih materijala.....	4
2.2. Polimerizacija i polimerizacijsko skupljanje	5
2.3. Remineralizirajući učinak.....	5
2.4. Bioaktivno staklo	5
3. EKSPERIMENTALNI KOMPOZITNI MATERIJALI S REMINERALIZIRAJUĆIM UČINKOM.....	8
4. KOMERCIJALNI KOMPOZITNI MATERIJALI S REMINERALIZIRAJUĆIM UČINKOM	15
4.1. Activa Bioactive	16
4.2. Activa Presto.....	17
4.3. Cention.....	18
4.4. Surefil One.....	21
5. RASPRAVA.....	22
6. ZAKLJUČAK	25
7. LITERATURA.....	27
8. ŽIVOTOPIS	32

Popis skraćenica

Bis-GMA - bisfenol-A-glicidil-metakrilat

Bis-EMA - bisfenol A etoksilat dimetakrilat

TEGDMA - trieten-glikol-dimetakrilat

UDMA - uretan-dimetakrilat

DMAEM - 2-(dimetilamino)etil metakrilat

4-META - 4-metakriloksietil trimelitična kiselina

ACP – amorfni kalcijev fosfat

BS – bioaktivno staklo

1. UVOD

Napredak u razvoju materijala omogućio je minimalno invazivni pristup u dentalnoj medicini. Cilj minimalno invazivnih tehnika je što veće očuvanje tvrdih zubnih tkiva, a tome je, između ostaloga, doprinio razvoj kompozitnih materijala. Kompozitni materijali počeli su se razvijati 50-ih godina prošlog stoljeća i njihova osnovna struktura (stakleno punilo u metakrilatnoj matrici) nije se promijenila do danas, ali su svojstva znatno poboljšana što je omogućilo primjenu u estetskoj zoni kao i u zoni mehaničkih opterećenja (1). Stoga su kompozitni materijali danas prvi izbor za izravne restauracije svih klasa (2). Međutim, najčešćim razlogom neuspjeha kompozitnih restauracija smatra se sekundarni karijes koji je posljedica nastanka mikropukotine između stijenke zuba i ispuna zbog polimerizacijskog skupljanja kompozitnog materijala (3). Budući da taj mikroprostor nije dostupan mehaničkom čišćenju, nakupljanje acidogenih bakterija i proizvodnja kiseline dovodi do demineralizacije tvrdih zubnih tkiva. Jedno od mogućih rješenja tog problema su remineralizacijski materijali, a kako bi se obuhvatila povoljna estetska, mehanička i biološka svojstva, počeli su se razvijati tzv. „bioaktivni“ kompozitni materijali. U posljednje vrijeme pojavile su se kritike pojma „bioaktivni materijal“ zbog nedostatka jasne definicije i kriterija prema kojima bi se materijal mogao svrstati u tu kategoriju (4). Stoga je ispravnije ovu skupinu nazivati „remineralizirajućim“ materijalima. Oni se općenito temelje na topljivim punilima koja imaju sposobnost otpuštanja kalcijevih, fosfatnih, fluoridnih i ostalih iona koji se mogu ugraditi u demineralizirana tvrda zubna tkiva ili se talože na površini materijala te tako brtve mikropukotinu i sprječavaju nastanak sekundarnog karijesa (5). Među poznatijim punilima je bioaktivno staklo (BS) koje osim otpuštanja iona ima sposobnost taloženja hidroksiapatita na površini, a antibakterijski učinak postiže porastom pH tijekom procesa otapanja (5). Njegov sastav i struktura mogu se prilagođavati ovisno o namjeni, stoga je ono danas zastupljeno kao punilo u eksperimentalnim, ali i u nekim komercijalnim kompozitnim materijalima. Svrha ovog rada je prikazati neke od dostupnih komercijalnih i eksperimentalnih kompozitnih materijala s remineralizacijskim učinkom, njihova pozitivna i negativna svojstva te se također osvrnuti na potencijal za buduća istraživanja i kliničku primjenu.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Sastav kompozitnih materijala

Kompozitni materijali predstavljaju spoj najmanje dviju različitih, međusobno netopljivih komponenti koje u kombinaciji imaju bolja svojstva nego svaka komponenta pojedinačno. Osnovni sastav kompozitnih materijala čine organska smolasta matrica, anorganske čestice punila i spojno sredstvo. Najčešće korištena smolasta matrica je Bis-GMA, monomerna molekula koja čini 12 % – 40 % mase kompozitnih materijala. Njoj se dodaje niskoviskozna smola (najčešće TEGDMA) kako bi se smanjila viskoznost matrice i povećala mogućnost inkorporacije ostalih sastavnica kompozitnih materijala koje su važne za mehanička i estetska svojstva. Umjesto Bis-GMA u nekim se kompozitnim materijalima kao osnovni monomer koristi UDMA, smola niske viskoznosti, ali višeg polimerizacijskog skupljanja. Svojstva kompozitnih materijala koje određuje smolasta matrica jesu stupanj konverzije i polimerizacijsko skupljanje, topljivost i apsorpcija vode (6 – 9). Da bi se poboljšala optička (translucencija, opalescencija) i fizička svojstva (tvrdoća, čvrstoća, elastičnost) kompozitnih materijala, dodaje se anorganski dio koji čine čestice punila. One se mogu podijeliti prema kemijskom sastavu i veličini. Prema kemijskom sastavu čestice koje se koriste su: pirogeni koloidni silicijev dioksid, borosilikatno staklo, kristalinični kvarc, barijevi aluminosilikati i dr. (7, 10). Prema veličini čestica kompozitne materijale dijelimo na makropunjene, mikropunjene i hibridne kompozitne materijale. Hibridni kompozitni materijali omogućuju najviši udio punila, tj. optimalna fizičko-mehanička svojstva uz očuvanu estetiku i mogućnost primjene u prednjem i stražnjem segmentu. Makropunjeni kompozitni materijali nisu zadovoljili te uvjete zbog nemogućnosti optimalnog poliranja, a mikropunjeni zbog nedovoljne tvrdoće i nemogućnosti primjene u zoni žvačnog stresa jer su se zbog velikog omjera površina čestica prema volumenu punila mogla dodavati u matricu razmjerno u maloj količini (7, 11). Da bi se ostvarila kemijska i mehanička veza između organskog i anorganskog dijela, površina čestica punila obložena je međugraničnim spojnim sredstvom. Najčešće je to γ -metakriloksi-propiltrimetoksisilan, spoj koji omogućuje razmjerno trajnu kemijsku vezu (12). Uz navedene osnovne komponente, kompozitnim materijalima dodaju se i pigmenti, različiti metalni oksidi za postizanje različitih nijansi materijala, a za postojanost boje zaslužni su stabilizatori. Inicijatori polimerizacije dodaju se za aktivaciju reakcije polimerizacije, a inhibitori polimerizacije sprječavaju spontanu polimerizaciju tijekom rukovanja i skladištenja materijala (7, 8).

2.2. Polimerizacija i polimerizacijsko skupljanje

Polimerizacija je reakcija u kojoj se monomerne molekule iz smolaste matrice međusobno povezuju i stvaraju polimernu strukturu. Ona utječe na važna svojstva kompozitnih materijala poput tvrdoće, dubine stvrdnjavanja, stabilnosti boje i dr. Koliko je polimerizacija bila uspješna, pokazuje stupanj konverzije, parametar koji govori koliko je dvostrukih C=C veza iz smolaste matrice iskorišteno za stvaranje polimerne strukture. Veći stupanj konverzije znači bolja fizičko-mehanička svojstva i veću biokompatibilnost kompozitnih materijala. Vrijednosti stupnja konverzije prema literaturi variraju između 43,5 % i 80 % (7). Što je veći stupanj konverzije, veće je skupljanje materijala jer se povezivanjem monomera smanjuje međumolekulska udaljenost. Volumetrijsko skupljanje kompozitnih materijala kreće se u rasponu od 1,5 % do 5,0 % (7). Posljedica polimerizacijskog skupljanja je stres između kompozitnog materijala i stijenke kaviteta koji dovodi do lokaliziranog odvajanja materijala od stijenki, stvaranja rubne pukotine, mikropropuštanja i s vremenom nastanka sekundarnog karijesa s mogućom iritacijom pulpe (7, 8).

2.3. Remineralizirajući učinak

Danas se teži razvoju materijala koji nisu inertni već „aktivni“, tj. koji potiču remineralizaciju postupnim otpuštanjem kalcijevih i fosfatnih iona s ciljem ugradnje ovih iona u demineralizirana tvrda zubna tkiva, a u određenim situacijama i precipitacije sloja apatita na površini materijala (8). Postoje brojni preparati na bazi različitih spojeva i minerala kojima se remineraliziraju tvrda zubna tkiva, a neki od najpoznatijih remineralizacijskih punila kojima se može ostvariti remineralizirajući učinak kompozitnih materijala su mono-, di- i tri-kalcijevi fosfati (13, 14), amorfni kalcijev fosfat (ACP) i bioaktivno staklo (5, 15).

2.4. Bioaktivno staklo

Bioaktivno staklo razvijeno je krajem Drugog svjetskog rata za primjenu u ortopedskoj kirurgiji zbog osteokonduktivnih i bioaktivnih svojstava zbog čega je kasnije preuzeto i u dentalnoj medicini. Sastavni je dio pasta za zube kojima se tretira preosjetljivost, praška za pjeskarenje, različitih lakova i kompozitnih materijala (16). Ispituje se u eksperimentalnim kompozitnim materijalima kako bi se povećala trajnost restauracija jer se marginalna pukotina i posljedični sekundarni karijes nastali kao posljedica polimerizacijskog skupljanja smatraju glavnim razlogom

neuspjeha kompozitnih restauracija (17, 18). Bioaktivnost BS-a podrazumijeva otpuštanje remineralizirajućih iona u vodenom mediju i taloženje hidroksiapatita na površini staklenih čestica što se u dentalnoj medicini može iskoristiti za brtvljenje marginalne pukotine, a uz to još pokazuje alkalizirajući i antibakterijski učinak (19). Prvi razvijeni BS nazvan je 45S5 gdje „45S“ podrazumijeva 45 % težinskog udjela SiO_2 , a „5“ molarni omjer kalcija prema fosforu (16). Ima mogućnost otpuštanja visokih koncentracija kalcija i fosfata i povišenja pH-vrijednosti otopine, no ne može se koristiti kao punilo kompozitnih ispuna u područjima velikih žvačnih opterećenja zbog nedostatnih mehaničkih svojstava (20). Budući da se sastav BS-a promjenama omjera oksidnih prekursora može mijenjati prilikom sinteze (21), uz konvencionalni BS 45S5 razvijeni su i BS-i s modificiranim sastavom prilagođenim različitim potrebama (22). Za primjenu BS-a u restaurativnim materijalima važno je postići ravnotežu između reaktivnosti i topljivosti s jedne strane te postojanosti mehaničkih svojstava s druge strane kako bi se povećala trajnost restauracija i omogućila njihova primjena u područjima većih žvačnih opterećenja. BS 45S5 ima visok udio natrija što ga čini izrazito reaktivnim i topljivim, a od iona koji se mogu iskoristiti za remineralizaciju tvrdih zubnih tkiva otpuštaju se samo kalcijevi i fosfatni ioni. Kako bi se BS što bolje prilagodio kao reaktivno punilo kompozitnim materijalima, predložena je i proizvedena nova formulacija BS-a koja ima manji udio natrijevih iona što ga čini stabilnijim, a dodani su i fluoridni ioni koji pospješuju remineralizaciju tvrdih zubnih tkiva (22). Neizbježan nedostatak svakog reaktivnog punila za kompozitne materijale je što povećanjem njegova udjela u materijalu mehanička svojstva slabe. Također, jedan od razloga smanjenih mehaničkih svojstava je da čestice navedenog bioaktivnog stakla nisu silanizirane zbog čega izostaje kemijsko povezivanje između čestica punila i smole. Razlog upotrebe nesilaniziranih čestica je slabije otpuštanje remineralizirajućih iona ako su čestice obložene slojem silana (18). Kao potencijalno rješenje navedenih nedostataka proizvedene su nanočestice mezoporoznog BS-a koje zbog svoje porozne strukture imaju veću površinu, a teoretski niskoviskozna smolasta matrica ima mogućnost penetracije tih pora čime se nakon polimerizacije omogućuje mehanička veza i isključuje se potreba za silanizacijom (18). Ova teorijska pretpostavka još nije potvrđena u istraživanjima. Međutim, ako se pokaže ispravnom, mikromehanička retencija mezoporoznih čestica punila u metakrilatnoj smoli mogla bi riješiti dugogodišnji problem nedostatka adekvatnog svezivanja reaktivnih čestica i smolaste matrice. Također, veća površina čestica omogućuje i bolju reaktivnost pa se udio BS-a u kompozitnom materijalu ne treba povećavati kako bi se ostvario optimalan

remineralizacijski učinak. Mezoporoznom staklu dodan je bakar koji ima antibakterijski učinak što omogućava razvoj kompozitnih materijala s antibakterijskim, remineralizirajućim i dobrim mehaničkim svojstvima (18, 23). Osim sastava BS-a, na njegovu reaktivnost utječe i veličina čestica. U prijašnjim istraživanjima pokazano je da nanočestice, za razliku od mikročestica, zbog svoje 30-ak puta veće površine za mogućnost otpuštanja iona doprinose boljoj remineralizaciji, neutralizaciji kiselina, taloženju hidroksiapatita i boljem antimikrobnom učinku (24). Međutim, problem s nanočesticama je što je količina punila zbog njihove velike površine ograničena pa to negativno utječe na mehanička svojstva kompozitnog materijala. Također, nanočestice se brže troše, tj. imaju visoku početnu reaktivnost, a kasnije je njihova reaktivnost neznatna. Moguće rješenje bila bi primjena čestica BS-a hibridnih dimenzija pri čemu bi nanočestice omogućavale brzu precipitaciju hidroksiapatita i time brzo brtvljenje marginalne pukotine, a mikročestice postupnu remineralizaciju tvrdih tkiva i neutralizaciju kiselina.

**3. EKSPERIMENTALNI KOMPOZITNI MATERIJALI S
REMINERALIZIRAJUĆIM UČINKOM**

Remineralizirajući kompozitni materijali koji sadrže BS počeli su se sve više istraživati kako bi se njegovim antikariogenim svojstvima smanjile negativne posljedice polimerizacijskog skupljanja i stvaranja mikropukotine te posljedičnog nastanka sekundarnog karijesa i kako bi se povećala klinička uspješnost i trajnost kompozitnih restauracija.

Dvije eksperimentalne serije kompozitnih materijala s dodatkom BS-a koje su razmjerno temeljito ispitane temeljene su na svjetlosno-polimerizirajućoj smolastoj matrici sastavljenoj od Bis-GMA i TEGDMA u omjeru 60 : 40 (Slika 1). Kao ojačavajuće punilo korišteno je silanizirano barijevo staklo i pirogeni SiO₂ (Slika 2), a pripremljene su dvije serije materijala kako bi se usporedili učinci konvencionalnog BS-a 45S5 i novog BS-a s modificiranim sastavom. U tzv. C-seriji eksperimentalnih kompozitnih materijala kao reaktivno punilo dodano je od 5 % do 40 % težinskog udjela komercijalno dostupnog BS-a 45S5, a u E-seriji dodan je modificirani BS u istim postocima težinskih udjela. Modificirani BS pripremljen je suradnjom Centra za dentalnu medicinu Sveučilišta u Zürichu u Švicarskoj i Zavoda za endodonciju i restaurativnu stomatologiju Stomatološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (22). Za razliku od konvencionalnog BS-a 45S5, modificirani BS sadrži smanjen udio natrija (s 24,5 % težinskog udjela na 10,5 % težinskog udjela) uz dodatak fluorida (12 % težinskog udjela CaF₂). Ukupni udio punila u svim kompozitnim materijalima u obje serije iznosio je 70 % težinskog udjela (22).

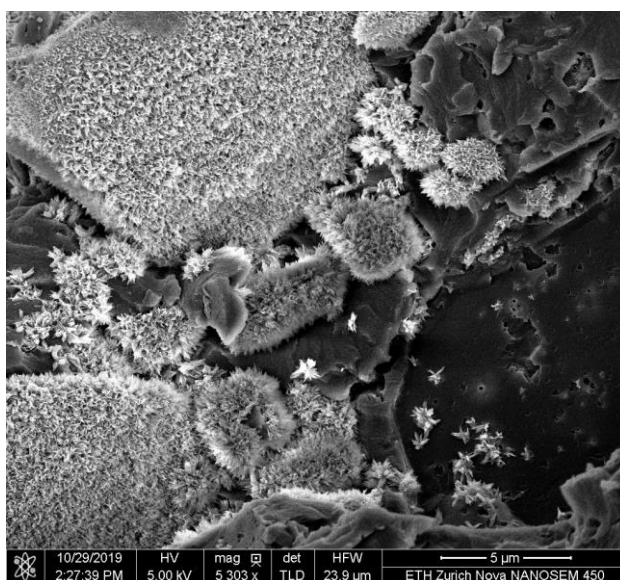


Slika 1. Metakrilatne smole i sustav fotoinicijatora za pripremu eksperimentalnih kompozitnih materijala. S lijeva na desno: Bis-GMA, TEGDMA, kamforkinon, etil-4-dimetilaminobenzoat.

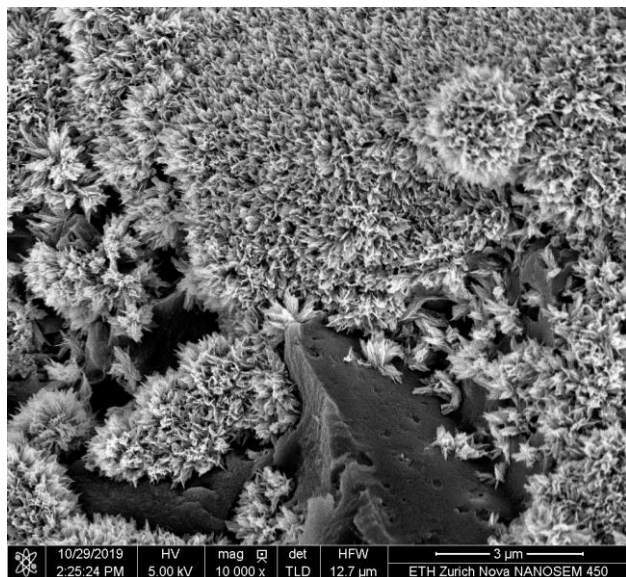


Slika 2. Punila za pripremu eksperimentalnih kompozitnih materijala. S lijeva na desno: bioaktivno staklo, barijevo staklo dimenzija čestica 2 mikrometra, barijevo staklo dimenzija čestica 0,2 mikrometra, silika (pirogeni SiO_2).

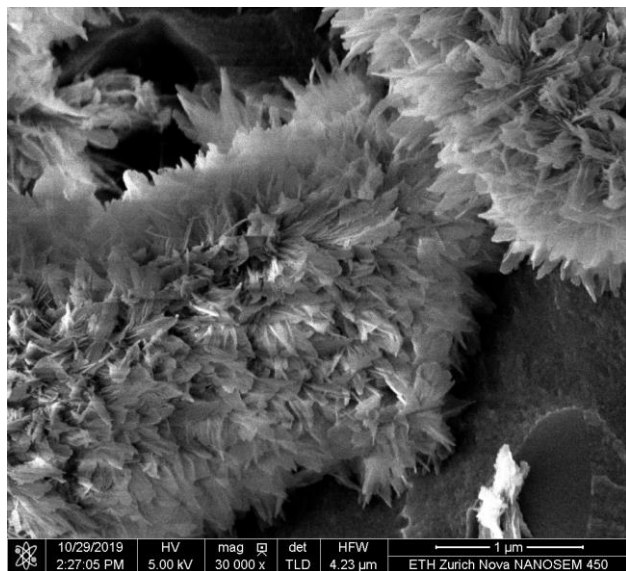
Modificirani BS pokazao je bolju mogućnost remineralizacije tvrdih zubnih tkiva zbog otpuštanja fluorida (25) te bolju stabilnost u usnoj šupljini u usporedbi s konvencionalnim BS-om 45S5. Također, neutraliziranjem kiselina smanjuje se gubitak mineralnog sastava tvrdih zubnih tkiva prilikom izlaganja kiselom mediju (22), a smanjivanjem broja kariogenih bakterija takvi materijali mogu djelovati antibakterijski. Kompozitni materijali koji sadrže modificirani BS talože mješavinu hidroksiapatita i fluorapatita (Slike 3 – 5) na površini čime se brtvi marginalna pukotina i potencijalno prevenira nastanak sekundarnog karijesa (22).



Slika 3. Snimka taloga hidroksiapatita na površini eksperimentalnih kompozitnih materijala dobivena skenirajućim elektronskim mikroskopom. Povećanje 5.300 x.



Slika 4. Snimka taloga hidroksiapatita na površini eksperimentalnih kompozitnih materijala dobivena skenirajućim elektronskim mikroskopom. Povećanje 10.000 x.



Slika 5. Snimka taloga hidroksiapatita na površini eksperimentalnih kompozitnih materijala dobivena skenirajućim elektronskim mikroskopom. Povećanje 30.000 x.

Nedostatak kompozitnih materijala koji sadrže konvencionalni BS 45S5 nedostatna su mehanička svojstva pri čemu se povećanjem udjela BS-a u načelu oslabljuju mehanička svojstva (20). Modificirani BS manje je reaktivan zbog smanjenog udjela natrija i u istraživanjima je pokazano da bez obzira na težinske udjele bioaktivnog punila pokazuje klinički prihvatljive vrijednosti savojne čvrstoće, manje je osjetljivo na degradaciju uzrokovanu simultanim starenjem i uslijed naknadne polimerizacije kod nekih materijala moguće je opaziti i poboljšanje mehaničkih svojstava (26).

Druga istraživačka skupina istražila je seriju eksperimentalnih kompozita koji su također sadržavali BS sa smanjenim udjelom natrija uz dodatak fluorida (27). Smolasta matrica pripremljena je miješanjem 42,25 % bisfenol A etoksilat dimetakrilata (Bis - EMA) s 55 % TEGDMA. Dodano je 0,25 % fotoinicijatora 2-(dimetilamino)etil metakrilat (DMAEM) i 0,5 % kamforkinona. Budući da su ovi kompozitni materijali namijenjeni adheziji u ortodonciji, dodano je i 2 % 4-META (4-metakriloksietil trimelitična kiselina) kako bi se poboljšala adhezija između zuba i ortodontskih bravica. Modificirani BS u tim se formulacijama materijala sastoji od 35,25 % SiO₂, 5,75 % P₂O₅, 43 % CaO, 6 % Na₂O i 10 % CaF₂. U usporedbi s konvencionalnim BS-om 45S5, u spomenutom modificiranom sastavu BS-a je smanjen udio natrijevih iona i povećan udio kalcijevih, fluoridnih i fosfatnih iona kako bi otpuštanje iona bilo što efikasnije. Postotak težinskog udjela BS-a iznosio je od 0 % do 80 % (27 – 29).

Takvi kompozitni materijali s BS-om u tri različite otopine (tris pufer, pH = 7,3 te umjetna slina, pH = 7 i pH = 4) otpuštali su fluoridne i kalcijeve ione kontinuirano i do 180 dana. Za razliku od staklenoionomernog materijala gdje se fluoridni ioni otpuštaju naglo u prva 24 h, zatim otpuštanje pada nakon 3 dana do 2 tjedna i tek onda slijedi faza stabilizacije, eksperimentalni kompozitni materijali s BS-om kontinuirano su otpuštali fluoridne ione, osobito oni s većim postotkom težinskog udjela BS-a. Razmjerno niske koncentracije fluoridnih iona izmjerene u otopinama u prvih 12 h objašnjavaju se potrošnjom fluoridnih iona za stvaranje fluoroapatita (27). Kalcijevi ioni smatraju se 20 puta efikasnijima od fosfata u prevenciji demineralizacije cakline (27). Oni su se također kontinuirano otpuštali tijekom 180 dana s time da je najveće otpuštanje uočeno u kiseloj okolini gdje je otapanje materijala najveće. Otapanjem BS-a pH otopine postupno je povećan što dodatno doprinosi protukarijesnom učinku. Pretpostavlja se da su otpušteni fosfatni ioni iskorišteni za stvaranje apatita u prisutnosti kalcijevih iona u otopini (27).

Još jedno istraživanje navedenih eksperimentalnih kompozita modificiranih dodatkom BS-a sa smanjenim udjelom natrija pokazalo je minimalnu bioaktivnost materijala (u ovom slučaju definiranu kao sposobnost taloženja apatita) u neutralnoj otopini osim u slučajevima kada je otopina bila zasićena kalcijevim i fosfatnim ionima. Međutim, kad se materijali nađu u kiselom mediju, otpuštaju se OH^- ioni koji neutraliziraju kiselinu i fluoridni ioni. Budući da ovi ioni također doprinose stvaranju fluorapatita, BS osim što prevenira remineralizaciju tvrdih zubnih tkiva, na njih djeluje i reparatorno (28). BS brže degradira u kiselim uvjetima otpuštajući kalcijeve, fosfatne i fluoridne ione. Povećanjem pH otopine s 4 na 5 i više olakšava se stvaranje fluoroapatita (29). U neutralnoj otopini kompozitni materijali s BS-om doprinose površinskom stvaranju apatita koji djeluje kao protektivni sloj protiv kiselog medija i posljedične demineralizacije. Niže vrijednosti pH i odsutnost kalcijevih i fosfatnih iona u otopini doprinosi stvaranju kalcijeva fluorida umjesto fluoroapatita (29).

**4. KOMERCIJALNI KOMPOZITNI MATERIJALI S REMINERALIZIRAJUĆIM
UČINKOM**

Remineralizirajući materijali, osim u znanstvenim istraživanjima, postupno ulaze i u kliničku praksu. Cention N (Ivoclar Vivadent, Schaan, Lihtenštajn) bio je prvi komercijalno dostupan remineralizirajući kompozitni materijal s dodatkom BS-a koji je na tržištu predstavljen kao „bioaktivan“ (30), a u kratkom razdoblju pojavili su se i Activa Bioactive (Pulpdent, Watertown, SAD), Activa Presto (Pulpdent, Watertown, SAD) i Surefil One (Dentsply Sirona, Konstanz, Njemačka). Selektivno uklanjanje karijesa uz primjenu remineralizirajućih materijala koji omogućuju dobro rubno zatvaranje i imaju bolja mehanička svojstva od staklenoionomernih materijala poželjno je jer se prevenira otvaranje pulpnog prostora, održava vitalitet zuba, a istovremeno štedi vrijeme i novac (31).

4.1. Activa Bioactive

Materijal Activa Bioactive predstavljen je na tržištu kao materijal koji ima mehanička, estetska i fizikalna svojstva kompozita i povećanu mogućnost otpuštanja kalcijevih, fosfatnih i fluoridnih iona u usporedbi sa staklenoionomernim materijalom (31). Punilo sadrži silanizirano bioaktivno staklo i kalcij, silaniziranu siliku i natrijev fluorid, a smolasta matrica diuretan modificiran dodatkom hidrogeniranog polibutadiena i druge metakrilatne monomere, modificiranu poliakrilnu kiselinu i vodu. Miješanjem dviju komponenti u spiralnom aplikatoru počinje acido-bazna reakcija gdje poliakrilna kiselina i dimetakrilatni fosfatni monomeri reagiraju sa silaniziranim fluoro-aluminij-silikatnim punilima. Osim acido-bazne reakcije, miješanjem komponenti pokreće se i kemijska polimerizacija, a dodani fotoinicijatori također omogućuju i svjetlosnu polimerizaciju. Tijekom acido-bazne reakcije otpušteni kalcijevi i aluminijski ione tvore ionske veze s ioniziranim karboksilnim skupinama. Ti ioni zajedno s fluoridnim ionima također imaju mogućnost izmjene s oralnim okruženjem (30).

U znanstvenim istraživanjima pokazano je da Activa Bioactive slabije otpušta fluoridne ione od staklenoionomernog materijala. Proizvođač je također naveo da materijal otpušta kalcijeve i fosfatne ione, ali nije pokazano da ti ioni induciraju remineralizaciju tvrdih zubnih tkiva tako da se s obzirom na dostupna nezavisna istraživanja Activa Bioactive ne može klasificirati kao remineralizirajući materijal (30).

4.2. Activa Presto

Activa Presto univerzalni je nanohibridni kompozitni materijal koji je na tržištu od 2020. godine. Predstavljen je kao svjetlosno-polimerizirajući, prilagodljivi, visoko estetski i radioopakan materijal indiciran za restauracije svih klasa. Materijal je tekuće konzistencije i dolazi u štrcaljkama iz kojih se pomoću metalne kanile postavlja u kavitet (Slika 6). Otpušta kalcijeve, fosfatne i fluoridne ione (32). Osim podataka iz proizvođačkih brošura, u literaturi trenutno nisu dostupna nezavisna istraživanja o učincima ovog materijala. Stoga su potrebna dodatna znanstvena istraživanja kako bi se bolje upoznala potencijalna karijes-preventivna učinkovitost materijala Activa Presto.



Slika 6. Aplikacija materijala Activa Presto u kavitet zuba.

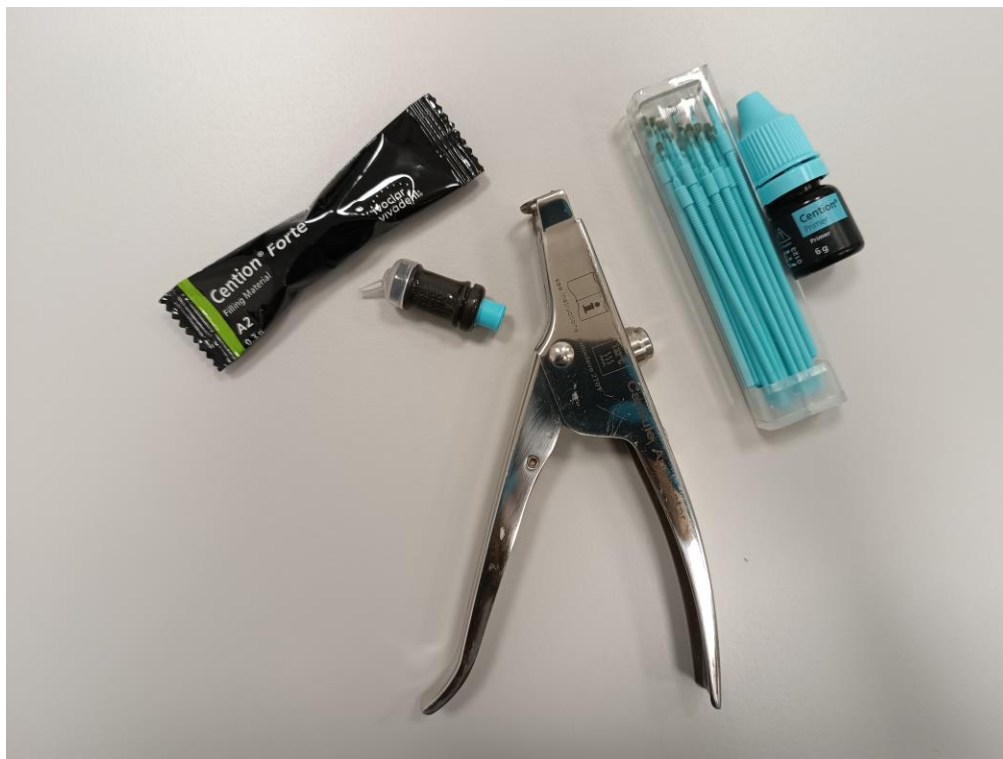
4.3. Cention

Cention N pripada specifičnoj podskupini kompozitnih materijala, tzv. alkalnim materijalima, a namijenjen je direktnim restauracijama na prednjim i stražnjim zubima. Dolazi u dvokomponentnom obliku gdje miješanjem praha i tekućine započinje reakcija stvrdnjavanja, a dodatno je moguća i svjetlosna polimerizacija zahvaljujući fotoinicijatorima poput Ivocerina (33, 34). Prah sadrži punilo, čestice alkalnog kalcij-fluorosilikatnog stakla koje otpušta fluoridne, kalcijeve i vodikove ione i čestice kalcij-barij-aluminij fluorosilikatnog stakla koje otpušta fluoridne ione. Tekućina sadrži organske dimetakrilatne monomere (UDMA) zajedno s katalizatorima i ostalim aditivima (33, 34). Otpuštanje kalcijevih i hidroksilnih iona prevenira demineralizaciju tvrdih zubnih tkiva tako što neutralizira kiselu okolinu koju stvaraju kariogene bakterije svojim metabolizmom. Otpuštanje iona ovisi o pH u usnoj šupljini, odnosno raste sa sniženjem pH-vrijednosti. Pretpostavljeni antikariogeni učinak temeljio bi se na stvaranju fluorapatitinih kristala i kalcij fluoridnog sloja na zubnoj površini koji djeluje kao rezervoar fluoridnih iona za remineralizaciju.

Kad je predstavljen na tržištu, Cention N preporučao se za primjenu s adhezijskim sustavom ili bez njega. U slučaju korištenja bez adheziva kavitet je potrebno pripremiti prema Blackovim načelima gdje je najvažnija mehanička retencija ispunjena. Naknadno su preporuke o uporabi revidirane tako da se novija kapsulirana verzija materijala (Cention Forte) preporuča koristiti isključivo uz uporabu adhezijskog sustava. Korištenje adhezijskog sustava podrazumijeva pripremu kaviteta prema suvremenim načelima minimalno invazivne preparacije uz selektivno jetkanje. Cention Forte (Slika 7 i 8) primjenjiv je kod izravnih restauracija mliječnih zuba i kod restauracija klase I, II ili V (33, 34).

Mehanička svojstva materijala Cention bolja su od staklenoionomernih materijala, a usporediva su s mehaničkim svojstvima kompozitnih materijala i amalgama (33, 34). Također, sadrži i patentirano punilo (tzv. *Isofiller*) koje smanjuje stres kod polimerizacije i smanjuje mikropukotinu nastalu polimerizacijskim skupljanjem zbog niskog modula elastičnosti što omogućuje nanošenje u jednom sloju (33, 34). Postavljanje u jednom sloju omogućava i dvostruko stvrdnjavanje materijala pri čemu kemijski aktivirana polimerizacija kompenzira eventualno nedostatno osvjetljavanje materijala u dubljim dijelovima kaviteta.

Cention Forte zbog navedene jednostavne primjene, dobre estetike i mehaničkih svojstava, remineralizirajućeg djelovanja i financijske prihvatljivosti predstavlja potencijalnu alternativu konvencionalnim kompozitnim materijalima, posebice kod pacijenata s povećanim rizikom za karijes.



Slika 7. Kapsulirana verzija materijala – Cention Forte.



Slika 8. Aplikacija materijala Cention u kavitet zuba.

4.4. Surefil One

Surefil One predstavljen je kao samoadhezivni hibridni kompozit. Sastoji se od praha i tekućine. Prah sadrži silanizirano fluoro-aluminij-silikatno staklo, kemijsko-polimerizirajuće komponente i silanizirana nereaktivna punila. Tekućinu čine voda, ionizirana modificirana poliakrilna kiselina sa svjetlosnopolimerizirajućim grupama, smjesa monomera, fotoinicijator kamforkinon i kemijsko-polimerizirajuće komponente (30). Sastojci se nalaze u kapsuli, a njezinim miješanjem i aktivacijom pokreće se reakcija stvrdnjavanja. Kada prah i tekućina dođu u kontakt, pokreće se acido-bazna reakcija. Na površini fluor-aluminij-silikatnog punila stvara se silika gel, a otpušteni kalcijevi i aluminijski ioni tvore ionske veze s ioniziranim karboksilnim skupinama. Fluoridni ioni također se otpuštaju. Druga reakcija polimerizacije pokreće se kad monomeri stvaraju polimerizacijsku mrežu sa silaniziranim fluoro-aluminij-silikatnim staklom, silaniziranim inertnim punilom i ostalim monomerima. Na kraju reakcije dvije mreže povežu se kovalentnim vezama zahvaljujući modificiranoj poliakrilnoj kiselini (30).

Surefil One prema uputama proizvođača indiciran je za sve vrste restauracija, no nema dovoljno provedenih kliničkih istraživanja kako bi se pokazala njegova stvarna učinkovitost remineralizacije tvrdih zubnih tkiva (30).

5. RASPRAVA

Remineralizirajući kompozitni materijali razvijali su se posljednjih nekoliko desetljeća u dentalnoj medicini s ciljem smanjenja pojavnosti sekundarnog karijesa i povećanja dugotrajnosti izravnih restauracija. Široko primjenjivani remineralizirajući materijal u kliničkoj praksi je staklenoionomerni materijal, no nije materijal izbora u području žvačnih opterećenja zbog slabijih mehaničkih svojstva, kao ni u estetskoj zoni zbog nedostatnih estetskih svojstava. Kako bi se dobio remineralizirajući materijal s dobrim estetskim i mehaničkim svojstvima, kompozitnim materijalima može se dodati punilo koje ima sposobnost otpuštanja iona. BS se pokazao kao obećavajuće punilo za remineralizirajuće kompozitne materijale zbog svojih višestrukih svojstava koja se mogu iskoristiti za prevenciju sekundarnog karijesa. Naime, produkti otapanja BS-a (kalcijevi, fosfatni i fluoridni ioni) sudjeluju u remineralizaciji tvrdih zubnih tkiva, a alkalizirajući potencijal povisuje pH i neutralizira kiseline nastale metabolizmom bakterija (22). Zbog sposobnosti većeg otapanja i otpuštanja iona pri sniženju pH, kompozitne materijale s BS-om neki autori nazivaju i „pametnim materijalima“ jer se kod niskog pH ($\text{pH} = 4$) poveća koncentracija kalcijevih, fosfatnih i fluoridnih iona u otopini, a u neutralnim otopinama ($\text{pH} = 6,4$) kalcijevi i fosfatni ioni iz materijala i otopine talože se na površini u obliku hidroksiapatita, odnosno fluoroapatita u slučaju fluorom modificiranog BS-a (25, 35). Važna prednost fluorapatita je njegova povećana stabilnost u kiselom okruženju.

Kao i svi današnji kompozitni materijali, tako i kompozitni materijali s BS-om zahtijevaju primjenu adhezijskog sustava, a adhezivni sloj predstavlja barijeru za ione te smanjuje koncentraciju iona koji mogu difundirati iz materijala u demineralizirana tvrda zubna tkiva (36). Količina difundiranih iona ovisi o vrsti adhezivnog sustava, odnosno razlikuje se između jetkajuće-ispirućih adhezijskih sustava te samojetkajućih sustava koji se postavljaju u jedan ili dva koraka (37). Klinički značaj navedene smanjene difuzije iona otpuštenih iz materijala utječe na remineralizaciju zidova kaviteta, dok ona ne utječe na otpuštanje iona s površine materijala oko marginalne pukotine gdje sekundarni karijes najčešće nastaje (38).

Prednost eksperimentalnih kompozitnih materijala s BS-om također je mogućnost remineralizacije aproksimalne stijenke susjednog zuba koja ovisi o količini i vrsti BS-a koji se nalazi u kompozitnom materijalu. Prijašnje istraživanje pokazalo je da konvencionalni BS 45S5 zbog veće reaktivnosti ima veći potencijal za remineralizaciju susjednog zuba od stabilnijeg BS-a sa smanjenim udjelom natrija i dodatkom fluora (39, 40). Navedeno svojstvo pokazuje da su takvi

materijali zanimljivi za buduća istraživanja i razvijanja. Međutim, općenito je *in vitro* eksperimentalnim istraživanjima teško ispitati i pokazati sve prednosti kompozitnih materijala s BS-om zbog nemogućnosti reprodukcije stvarnih složenih i individualnih uvjeta u usnoj šupljini koji utječu na prognozu kompozitnih restauracija. Većina kliničkih istraživanja koja se temelje na kratkoročnom praćenju od 1 do 2 godine ne pokazuju značajnu razliku između komercijalno dostupnih remineralizirajućih kompozitnih materijala (Activa Bioactive Restorative i Cention) i inertnih kompozitnih materijala, stoga su potrebna dugoročnija istraživanja kako bi se temeljitije ispitale možebitne prednosti od otpuštanja iona u stvarnim kliničkim uvjetima (41, 42). Sadašnji komercijalno dostupni kompozitni materijali s remineralizacijskim učinkom dolaze na tržište uglavnom bez provedenih dugotrajnih kliničkih istraživanja te je teško procijeniti stvarni remineralizacijski učinak na tvrda zubna tkiva.

Cilj restaurativne dentalne medicine je zamijeniti izgubljeno tvrdo tkivo materijalom koje ga najbolje oponaša (43). Dostupni konvencionalni kompozitni materijali omogućuju mikromehaničku vezu s tvrdim zubnim tkivima. Aplikacija konvencionalnih kompozitnih materijala zahtijeva nekoliko koraka i kvaliteta konačnog ispuna uvelike ovisi o čimbenicima vezanim uz terapeuta (44). Problemi koji se mogu pojaviti su postoperativna osjetljivost, a dugoročno sekundarni karijes zbog nastanka marginalne pukotine kao posljedica polimerizacijskog skupljanja. Tehnika koja se koristi u svakidašnjoj praksi kako bi se dentin nadomjestio materijalom najslabijih svojstava i remineralizirala tvrda zubna tkiva, a postigla maksimalna otpornost na žvačna opterećenja jest tzv. *sandwich* tehnika. Ona podrazumijeva primjenu staklenoionomernog materijala na dentinski dio kaviteta pri čemu se materijal kemijsko-mehanički veže, otpušta fluoridne ione i ima ograničen antimikrobni učinak. Negativna je strana te tehnike što oduzima puno vremena u kliničkoj praksi i tehnički je osjetljiva. Općenito, kod tehnički osjetljivijih postupaka postoji veća vjerojatnost pogreške tijekom kliničkog rada što u konačnici dovodi do lošije dugoročne prognoze ispuna, unatoč konceptualno dobroj tehnici. Kompozitni materijali s remineralizacijskim učinkom objedinili bi pozitivna svojstva staklenoionomernog i kompozitnog materijala, omogućili izradu kvalitetnog ispuna jednostavnom i brzom primjenom te povećali kliničku uspješnost kompozitnih restauracija.

6. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali s remineralizacijskim učinkom predstavljaju zanimljiv potencijal za buduća istraživanja i kliničku primjenu. Negativna svojstva takvih materijala vremenski su ograničeno otpuštanje iona i slabija mehanička svojstva u odnosu na konvencionalne kompozitne materijale. Mehanička svojstva primarno slabe zbog topljivosti reaktivnih punila, istovremeno se povećava i hrapavost površine materijala što pridonosi većoj adheziji bakterija i može predstavljati problem nakon što se sposobnost otpuštanja iona smanji. Stvoreni biofilm na površini potencijalno povećava rizik od pojave sekundarnog karijesa. Većina svojstava eksperimentalnih remineralizirajućih materijala ispitana su u *in vitro* uvjetima te su potrebna dugoročnija klinička istraživanja kako bi se temeljitije istražio stvaran remineralizirajući i alkalizirajući potencijal te klinički relevantna korist od precipitacije hidroksiapatita na površini takvih materijala.

7. LITERATURA

1. Ferracane JL. Resin composite - state of the art. *Dent Mater.* 2011;27(1):29–38.
2. He J, Lassila L, Garoushi S, Vallittu P. Tailoring the monomers to overcome the shortcomings of current dental resin composites - review. *Biomater Investig Dent.* 2023;10(1):2191621.
3. Jokstad A. Secondary caries and microleakage. *Dent Mater.* 2016;32(1):11–25.
4. Vallittu PK, Boccaccini AR, Hupa L, Watts DC. Bioactive dental materials - Do they exist and what does bioactivity mean? *Dent Mater.* 2018;34(5):693–4.
5. Tarle Z, Par M. Bioaktivni dentalni kompozitni materijali. *Rad HAZU.* 2018;(533=45):83–99.
6. Zimmerli B, Strub M, Jeger F, Stadler O, Lussi A. Composite materials: composition, properties and clinical applications. A literature review. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 2010;120(11):972–86.
7. Tarle Z i suradnici. *Restaurativna dentalna medicina.* Zagreb: Medicinska naklada; 2019. p. 213-268.
8. Miletic V. *Dental Composite Materials for Direct Restorations.* Springer International Publishing AG; 2018. 327 p.
9. Floyd CJE, Dickens SH. Network structure of Bis-GMA- and UDMA-based resin systems. *Dent Mater.* 2006;22(12):1143–9.
10. Habib E, Wang R, Wang Y, Zhu M, Zhu XX. Inorganic Fillers for Dental Resin Composites: Present and Future. *ACS Biomater Sci Eng.* 2016;2(1):1–11.
11. Lang BR, Jaarda M, Wang RF. Filler particle size and composite resin classification systems. *J Oral Rehabil.* 1992;19(6):569–84.
12. Jin X, Yuan X, Chen K, Xie H, Chen C. Role of 3-Methacryloxypropyltrimethoxysilane in Dentin Bonding. *ACS Omega.* 2022;7(18):15892–900.
13. Davis GR, Evershed ANZ, Mills D. Quantitative high contrast X-ray microtomography for dental research. *J Dent.* 2013;41(5):475–82.

14. Khan AS, Syed MR. A review of bioceramics-based dental restorative materials. *Dent Mater J.* 2019;38(2):163–76.
15. Almulhim KS, Syed MR, Alqahtani N, Alamoudi M, Khan M, Ahmed SZ, et al. Bioactive Inorganic Materials for Dental Applications: A Narrative Review. *Materials.* 2022;15(19):6864.
16. Sonatkar J, Kandasubramanian B. Bioactive glass with biocompatible polymers for bone applications. *Eur Polym J.* 2021;160:110801.
17. Askar H, Krois J, Göstemeyer G, Schwendicke F. Secondary caries risk of different adhesive strategies and restorative materials in permanent teeth: Systematic review and network meta-analysis. *J Dent.* 2021;104:103541.
18. Marovic D, Haugen HJ, Negovetic Mandic V, Par M, Zheng K, Tarle Z, et al. Incorporation of Copper-Doped Mesoporous Bioactive Glass Nanospheres in Experimental Dental Composites: Chemical and Mechanical Characterization. *Materials.* 2021;14(10):2611.
19. Par M, Mohn D, Attin T, Tarle Z, Tauböck TT. Polymerization shrinkage behaviour of resin composites functionalized with unsilanized bioactive glass fillers. *Sci Rep.* 2020;10(1):15237.
20. Par M, Tarle Z, Hickel R, Ilie N. Mechanical properties of experimental composites containing bioactive glass after artificial aging in water and ethanol. *Clin Oral Investig.* 2019;23(6):2733–41.
21. Hill RG, Brauer DS. Predicting the bioactivity of glasses using the network connectivity or split network models. *J Non Cryst Solids.* 2011;357(24):3884–7.
22. Par M, Attin T, Tarle Z, Tauböck T. A New Customized Bioactive Glass Filler to Functionalize Resin Composites: Acid-Neutralizing Capability, Degree of Conversion, and Apatite Precipitation. *J Clin Med.* 2020;9:1173.
23. Munir A, Marovic D, Nogueira LP, Simm R, Naemi AO, Landrø SM, et al. Using Copper-Doped Mesoporous Bioactive Glass Nanospheres to Impart Anti-Bacterial Properties to Dental Composites. *Pharmaceutics.* 2022;14(10):2241.

24. Odermatt R, Par M, Mohn D, Wiedemeier DB, Attin T, Tauböck TT. Bioactivity and Physico-Chemical Properties of Dental Composites Functionalized with Nano- vs. Micro-Sized Bioactive Glass. *J Clin Med.* 2020;9(3):772.
25. Par M, Gubler A, Attin T, Tarle Z, Tarle A, Tauböck TT. Ion release and hydroxyapatite precipitation of resin composites functionalized with two types of bioactive glass. *J Dent.* 2022;118:103950.
26. Par M, Plančak L, Ratkovski L, Tauböck T, Marović D, Attin T, et al. Improved Flexural Properties of Experimental Resin Composites Functionalized with a Customized Low-Sodium Bioactive Glass. *Polymers.* 2022;14:4289.
27. Al-Eesa NA, Wong FSL, Johal A, Hill RG. Fluoride containing bioactive glass composite for orthodontic adhesives - ion release properties. *Dent Mater.* 2017;33(11):1324–9.
28. Al-Eesa NA, Johal A, Hill RG, Wong FSL. Fluoride containing bioactive glass composite for orthodontic adhesives - Apatite formation properties. *Dent Mater.* 2018;34(8):1127–33.
29. Na AE, N K, Rg H, A J, Fsl W. Bioactive glass composite for orthodontic adhesives - Formation and characterisation of apatites using MAS-NMR and SEM. *Dent Mater.* 2019;35(4).
30. Francois P, Fouquet V, Attal JP, Dursun E. Commercially Available Fluoride-Releasing Restorative Materials: A Review and a Proposal for Classification. *Materials.* 2020;13(10):2313.
31. Kunert M, Lukomska-Szymanska M. Bio-Inductive Materials in Direct and Indirect Pulp Capping-A Review Article. *Materials.* 2020;13(5):1204.
32. ACTIVA™ Presto™ - PULPDENT [Internet]. [cited 2024 Apr 16]. Available from: <https://www.pulpdent.com/pulpdent-products/activa-presto/>
33. Alla RK, Medicharla U, Mohammed S, Abusua F, Bhupathi A, Kanumuri MV. An update on Cention N: An aesthetic direct bulk-fill restorative material. *Int J Dent Mater.* 2023;5:17–21.
34. Hotchandani D, Sajjanar D, Lakshmi Y, Peri V, Banik A, Duggal S. Cention-N: A Comprehensive Review. *Eur Chem Bull.* 2023;12:5528–36.

35. Brauer DS, Karpukhina N, O'Donnell MD, Law RV, Hill RG. Fluoride-containing bioactive glasses: effect of glass design and structure on degradation, pH and apatite formation in simulated body fluid. *Acta Biomater.* 2010;6(8):3275–82.
36. Kelić K, Par M, Peroš K, Šutej I, Tarle Z. Fluoride-Releasing Restorative Materials: The Effect of a Resinous Coat on Ion Release. *Acta Stomatol Croat.* 2020;54(4):371–81.
37. Par M, Gubler A, Attin T, Tarle Z, Tarle A, Prskalo K, et al. Effect of adhesive coating on calcium, phosphate, and fluoride release from experimental and commercial remineralizing dental restorative materials. *Sci Rep.* 2022;12(1):10272.
38. Askar H, Krois J, Göstemeyer G, Bottenberg P, Zero D, Banerjee A, et al. Secondary caries: what is it, and how it can be controlled, detected, and managed? *Clin Oral Investig.* 2020;24(5):1869–76.
39. Par M, Gubler A, Attin T, Tarle Z, Tauböck TT. Anti-demineralizing protective effects on enamel identified in experimental and commercial restorative materials with functional fillers. *Sci Rep.* 2021;11(1):11806.
40. M P, A G, T A, Z T, A T, Tt T. Experimental Bioactive Glass-Containing Composites and Commercial Restorative Materials: Anti-Demineralizing Protection of Dentin. *Biomedicines.* 2021;9(11):1616.
41. Eissa MM, Akah M, Yousry MM, Hamza H, Hassanein H, Pameijer CH. Clinical Performance of a Bioactive Restorative Material vs a Glass Hybrid Restorative in Posterior Restorations in High-risk Caries Patients. *World J Dent.* 2021;12(4):292–300.
42. Sharma H, Suprabha BS, Shenoy R, Rao A, Kotian H. Clinical effectiveness of alkasite versus nanofilled resin composite in the restoration of occlusal carious lesions in permanent molar teeth of children: a randomized clinical trial. *Eur Arch Paediatr Dent.* 2023;24(3):301–11.
43. Croll TP. The “sandwich” technique. *J Esthet Restor Dent.* 2004;16(4):210–2.
44. Demarco FF, Collares K, Correa MB, Cenci MS, Moraes RR de, Opdam NJ. Should my composite restorations last forever? Why are they failing? *Braz Oral Res.* 2017;31(suppl 1):e56.

8. ŽIVOTOPIS

Ksenija Dukarić rođena je 28. svibnja 1998. godine u Varaždinu. Završila je Osnovnu školu Izidora Poljaka Višnjica, Osnovnu glazbenu školu u Varaždinu i opći gimnazijski smjer Srednje škole Ivanec. Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2018. godine. Od četvrte godine studiranja aktivno sudjeluje u istraživanjima u okviru projekta Biomimetički inteligentni kompozitni materijali te pohađa i aktivni je sudionik različitih kongresa. Na 9. Međunarodnom kongresu Stomatološkog fakulteta u Zagrebu osvaja 1. mjesto s oralnom prezentacijom „Precipitacija apatita na površinama eksperimentalnih kompozita: Istraživanje infracrvenom spektroskopijom s Fourierovom transformacijom“. U listopadu 2023. godine osvaja 2. mjesto na 8. kongresu s međunarodnim sudjelovanjem – Sinergija znanosti i kliničkog rada s prezentacijom „Čvrstoća vezivanja na dentin eksperimentalnih kompozitnih materijala s dodatkom fluorom obogaćenog bioaktivnog stakla“. Koautor je jednog izvornog znanstvenog rada objavljenog u časopisu kategoriziranom u prvoj kvartili (Q1) prema *Web of Science*. Nagrađena je Rektorovom nagradom u akademskoj godini 2022./2023. za individualni znanstveni rad pod nazivom „Istraživanje čvrstoće vezivanja na dentin eksperimentalnih kompozitnih materijala funkcionaliziranih dodatkom fluorom obogaćenog bioaktivnog stakla sa smanjenim udjelom natrija“. Također je aktivna i na praktičnim natjecanjima gdje osvaja 1. mjesto na „Natjecanju za najljepši kompozitni ispun“ na 3. Međunarodnom kongresu studenata dentalne medicine u Rijeci – RiCon 2022./2023.

Objavljeni radovi:

Carek A, Dukaric K, Miler H, Marovic D, Tarle Z, Par M. Post-cure development of the degree of conversion and mechanical properties of dual-curing resin cements. *Polymers* 2022;14(17):3649.