



Sveučilište u Zagrebu

Stomatološki fakultet

Katarina Bauer

**ODREĐIVANJE PROMJENE BOJE I
TRANSLUCENCIJE RAZLIČITIH
ESTETSKIH MONOLITNIH
MONOKROMATSKIH CAD/CAM
MATERIJALA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Stomatološki fakultet

Katarina Bauer

**ODREĐIVANJE PROMJENE BOJE I
TRANSLUCENCIJE RAZLIČITIH
ESTETSKIH MONOLITNIH
MONOKROMATSKIH CAD/CAM
MATERIJALA**

DOKTORSKI RAD

Mentorica: izv. prof. dr. sc. Andreja Carek

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

School of Dental Medicine

Katarina Bauer

**DETERMINATION OF THE COLOR AND
TRANSLUCENCY CHANGES OF
DIFFERENT ESTHETIC MONOLITHIC
MONOCHROMATIC CAD/CAM
MATERIALS**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Associate Professor Andreja Carek, PhD

Zagreb, 2026.

Rad je izrađen na Zavodu za fiksnu protetiku stomatološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te na Zavodu za javno zdravstvo Krapinsko - zagorske županije.

Istraživanje je odobreno od etičkog povjerenstva Stomatološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (broj 05-PA-30-V-2/2022)

Lektor hrvatskog jezika: Marija Antolić, magistra hrvatskog jezika i književnosti i prim.ling.

Lektor engleskog jezika: Anđela Štrok, magistra engleskog jezika i književnosti

Voditeljica rada: izv. prof. dr. sc. Andreja Carek

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

Datum obrane rada: _____

Rad sadrži: 109 stranica

 20 tablica

 41 slika

 1 CD

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 poslijediplomskog doktorskog 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 njihovog podrijetla.

Zahvala

Zahvaljujem svoj mentorici prof. dr. sc. Andreji Carek na pomoći, savjetima i strpljenju tijekom izrade ovog rada.

Prof. dr.sc. Ljerki Slokar Benić zahvaljujem na pomoći i suradnji tijekom istraživanja.

Veliko hvala doc. dr. sc. Mateju Paru na pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvale dr. Marijani Zadravec na pomoći tijekom istraživanja.

Naposljetku, hvala majci Lidiji, ocu Stjepanu te bratu Leonardu na moralnoj podršci tijekom ovog izazovnog razdoblja.

Najviše hvala suprugu Bernardu i sinu Andreju na razumijevanju i podršci.

Ovo je naš uspjeh!

„Korijeni učenja su gorki, ali su plodovi slatki“ (Aristotel)

SAŽETAK

ODREĐIVANJE PROMJENE BOJE I TRANSLUCENCIJE RAZLIČITIH ESTETSKIH MONOLITNIH MONOKROMATSKIH CAD/CAM MATERIJALA

Cilj ove in vitro studije bio je ispitati stabilnost boje i translucencije različitih estetskih monolitnih monokromatskih CAD/CAM materijala, pomoću spektrofotometra. Materijali, boja te translucencije izabrani za ovo istraživanje su bila: CAD/CAM keramika infiltrirana polimerom, 2M2 - HT (VITA ENAMIC, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany), CAD/CAM nanokeramika, A2 - HT (GC CERASMART 270, GC Europe N.V., Leuven, Belgium), CAD/CAM kompozit, A2 - HT (TETRIC CAD, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), CAD/CAM polimer, A2 - LT (TELIO CAD, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) te CAD/CAM litij disilikatna keramika, A2 - HT (IPS e.max CAD, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein). Korištene obojene tekućine su instant kava (Nescafe Gold Crema, Nestle France, Noisiel, Francuska), crni čaj (Franck d.d., Zagreb, Hrvatska) i crveno vino (Karizma 2019, Petrač vinarija, Krapinske Toplice, Hrvatska), dok je destilirana voda korištena kao kontrolna tekućina. Pripremljeno je ukupno 200 uzoraka. Unutar skupina A2-HT/2M2-HT i A2-LT formirale su se četiri skupine (n=10) te je svaka skupina podijeljena na dvije podskupine (n=5). Uzorci iz prve podskupine rezani su na debljinu od jednog milimetra dok uzorci iz druge podskupine rezani na debljinu od dva milimetra. Svi uzorci (n=200) su termociklirani (5°C i 55°C, 5000 ciklusa) te nakon toga izloženi različitim obojenim tekućinama i stavljeni u inkubator na 37°C stupnjeva tijekom četiri tjedna. Određivanje boje i translucencije uzoraka sa spektrofotometrom provodilo se na početku istraživanja (prije termocikliranja i izlaganja obojenim tekućinama), zatim nakon tjedan dana, nakon dva tjedna pa tri te četiri tjedna izlaganja obojenim tekućinama. Svako mjerenje boje kao i translucencije uzoraka, provodilo se na bijeloj i crnoj pozadini te pod utjecajem dnevne svjetlosti. Na temelju dobivenih $L^*C^*h^*$ vrijednosti izračunala se promjena boje pojedinog uzorka (ΔE_{00}) i translucencije (ΔTP). Rezultati ovog istraživanja pokazuju, kako stabilnost pojedinog estetskog monolitnog monokromatskog CAD/CAM materijala nije jednaka te da je ovisna o vrsti materijala.

Ključne riječi: stabilnost boje, translucencija, estetski dentalni materijali, monolitni monokromatski materijali, CAD/CAM materijali, termocikliranje, spektrofotometar

Summary

DETERMINATION OF THE COLOR AND TRANSLUCENCY CHANGES OF DIFFERENT ESTHETIC MONOLITHIC MONOCHROMATIC CAD/CAM MATERIALS

Aim: The aim of this in vitro study was to determine the color and translucency changes of different esthetic monolithic monochromatic CAD/CAM materials using a spectrophotometer, after thermocycling and exposure to coloured solutions, that is, to examine the stability of the material and the structural durability of the optical properties.

Materials and methods: Five restorative materials were selected for this in vitro study: CAD/CAM polymer infiltrated ceramic, 2M2 - HT (VITA ENAMIC, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany), CAD/CAM nanoceramic, A2 - HT (GC CERASMART 270, GC Europe N.V., Leuven, Belgium), CAD/CAM composite, A2 - HT (TETRIC CAD, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), CAD/CAM polymer, A2 - LT (TELIO CAD, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) and CAD/CAM lithium disilicate ceramic, A2 - HT (IPS e.max CAD, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein). The staining solutions were instant coffee (Nescafe Gold Crema, Nestle France, Noisiel, France), black tea (Franck d.d., Zagreb, Croatia) and red wine (Karizma 2019, Petrač vinarija, Krapinske Toplice, Croatia) and distilled water as control liquid. In total, there were 200 specimens fabricated. Within the A2-HT/2M2-HT and A2-LT groups, 4 groups (n=10) were formed, and each of the groups was then divided into two subgroups (n=5). The CAD/CAM blocks of the first subgroup were sliced into specimens of a one millimeter thickness, while the CAD/CAM blocks of the second subgroup were sliced into specimens of a two millimeter thickness. All specimens (n=200) were thermocycled (5°C and 55°C, 5000 cycles) and then exposed to various staining solutions. All specimens immersed in staining solutions were stored in an incubator at 37°C for four weeks. Color measurements were obtained using a spectrophotometer at the beginning of the research (before thermocycling and exposure to various staining solutions), after one week, two weeks, three weeks and four weeks of exposure in staining solutions. The color and translucency measurements of each specimen were performed on a white and black background under the daylight. The color changes (ΔE_{00}) and translucency changes (ΔTP) of each specimen were calculated based on the obtained $L^*C^*h^*$ values.

Results: The comparison of material type impact on the color change clearly shows the following order

Telio CAD > Tetric CAD > Vita Enamic > GC Cerasmart 270 > IPS e.max CAD

While the comparison of staining solution type impact on the color change shows

Red wine > Instant coffee $\geq$ Black tea > Distilled water

Color change for coffee and black tea is not different for the material Telio CAD.

Conclusion: The stability of each esthetic monolithic monochromatic CAD/CAM material is not the same and it depends on the type of material, staining solution and sample thickness.

Keywords: color stability, translucency, esthetic dental materials, monolithic monochromatic materials, CAD/CAM materials, thermocycling, spectrophotometer

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1.	Dentalni CAD/CAM sustav.....	2
1.2.	CAD/CAM dentalni materijali.....	4
1.2.1.	CAD/CAM litij disilikatna keramika.....	6
1.2.2.	CAD/CAM kompozit.....	9
1.2.3.	CAD/CAM polimetilmetakrilat.....	11
1.2.4.	CAD/CAM hibridni materijali.....	13
1.2.5.	Optička svojstva CAD/CAM materijala.....	15
1.3.	Boja i kolorimetrijski sustavi.....	18
1.4.	Određivanje boje.....	29
2.	CILJEVI I HIPOTEZE.....	34
3.	MATERIJALI I POSTUPCI	36
3.1.	Priprema uzoraka.....	37
3.2.	Postupak određivanje boje, termocikliranja i izlaganja uzoraka obojenim tekućinama.....	41
3.3.	Statistička analiza.....	48
4.	REZULTATI.....	50
5.	RASPRAVA.....	84
6.	ZAKLJUČCI.....	93
7.	LITERATURA.....	95
8.	ŽIVOTOPIS.....	106

Popis skraćenica

ANOVA	analiza varijance (eng. <i>analysis of variance</i>)
CAD/CAM	računalno potpomognuto dizajniranje / računalno potpomognuta proizvodnja
PMMA	polimetilmetakrilat
PICN	polimerom infiltrirana keramička mreža (eng. <i>polymer infiltrated ceramic network</i>)

1. UVOD

1.1. Dentalni CAD/CAM sustav

Pacijenti danas žele nadomjeske koji ne zadovoljavaju samo funkcijske kriterije, nego su i estetski na visokoj razini. Tijekom 20. stoljeća dentalni materijali i dentalna tehnologija, značajno su napredovali kako bi se prilagodili povećanim estetskim zahtjevima pacijenata, posebno u području stomatološke protetike. U potražnji za estetskim materijalima, novi estetski materijali uvedeni su u svakodnevnu praksu isto kao nove tehnologije obrade, kao što je CAD/CAM tehnologija (1). Razvojem CAD/CAM tehnologije značajno je prošireno i poboljšano područje izrade bezmetalnih protetskih radova. Dentalni CAD/CAM sustav sve se češće koristi, te je uspješno integriran u mnogim područjima stomatologije. CAD/CAM sustav može se koristiti u stomatološkim ordinacijama i u laboratorijima (2,3).

Od 1970-ih godina, CAD/CAM tehnologija, u raznim industrijama doživljava značajan razvoj, a istraživanje i razvoj dentalnih CAD/CAM sustava se aktivno provodi diljem svijeta od 1980-ih. Nedavno su komercijalni dentalni CAD/CAM sustavi uvedeni za specifična područja poput potpuno keramičkih restauracija (1). U stomatologiji, glavni razvoj dentalnih CAD/CAM sustava dogodio se 1980-ih. Tri pionira posebno su pridonijela razvoju trenutnih dentalnih CAD/CAM sustava. Dr. Duret je bio prvi u području razvoja dentalnih CAD/CAM sustava. Od 1971. godine počeo je izrađivati krunice s funkcionalnim oblikom okluzalne površine koristeći niz sustava koji su započeli s optičkim otiskom nosača zuba u ustima, nakon čega je slijedilo dizajniranje optimalne krunice uzimajući u obzir funkcionalno kretanje i glodanje krunice koristeći numerički upravljani stroj. Kasnije su dr. Duret i njegovi suradnici radili na Sopha sustavu, koji je imao utjecaj na kasniji razvoj dentalnih CAD/CAM sustava u svijetu (1,4-6).

Dr. Moermann, je 1985. godine uveo prvi komercijalno dizajnirani CAD/CAM sustav, pod imenom CEREC. Pokušao je koristiti novu tehnologiju u dentalnoj ordinaciji klinički uz pacijentovu stolicu. Nakon što je uzeo digitalni otisak intraoralnom kamerom, slijedilo je dizajniranje i izrada inleja iz keramičkog bloka pomoću kompaktnog stroja postavljenog uz stolicu. Pojava ovog sustava bila je zaista inovativna jer je omogućila keramičke restauracije istog dana. Kada je ovaj sustav objavljen, brzo je proširio pojam CAD/CAM u dentalnoj profesiji. Danas se ovaj sustav uspješno koristi diljem svijeta za izradu nadomjestaka (1,4,5).

Treći je dr. Andersson, koji je početkom 1980-ih razvio Procera sustava. Legure nikla i kroma korištene su kao zamjena za zlatne legure zbog drastičnog porasta cijena zlata. Međutim, zbog

pojave alergije na metale, posebno u sjevernoj Europi, predložena je tranzicija na titan. Budući da je precizno lijevanje titana tada još bilo teško, Dr. Andersson je pokušao izrađivati titanove kopče i uveo CAD/CAM tehnologiju u proces kompozitnih presvučenih restauracija. Ovo je bila primjena CAD/CAM-a u specijaliziranom postupku kao dio ukupnog sustava obrade (1,4,5).

Dijelovi od kojih se sastoji CAD/CAM sustav:

1. Alat za digitalizaciju, odnosno skener koji pretvara trodimenzionalne strukture zuba i čeljusti u digitalne podatke putem optičkih ili mehaničkih skenera. Neki od optičkih skenera su es1 (etkon, laserska zraka), Everest Scan (KaVo, projekcije bijele svjetlosti) i Lava Scan ST (3M ESPE, projekcije bijele svjetlosti). Osnova ove vrste skenera je prikupljanje trodimenzionalnih struktura postupkom triangulacije. Izvor svjetlosti je projekcija bijele svjetlosti ili laserska zraka. Izvor svjetlosti i prijemna jedinica su u određenom kutu u odnosu jedno na drugo. Kroz ovaj kut računalo može izračunati trodimenzionalni skup podataka iz slike na prijemnoj jedinici.
2. Softver koji obrađuje podatke i stvara skup podataka za proizvod koji se izrađuje.
3. Proizvodna tehnologija koja pretvara skup podataka u željeni proizvod (5-9).

CAD/CAM sustav možemo podijeliti na temelju izrade samog nadomjeska. Jedan način izrade jest u ordinaciji (in office, chairside), drugi omogućuje izradu u laboratoriju (in lab system), a treća mogućnost izrade jest u proizvodnim centrima (milling centre).

U ordinacijskom sustavu proizvodnje sve komponente CAD/CAM sustava nalaze se u ordinaciji te se nadomjestak izrađuje bez sudjelovanja dentalnog laboratorija. Prednost ove tehnike jest digitalni otisak koji podrazumijeva korištenje intraoralne kamere, umjesto konvencionalnog otiska. Nakon prijenosa podataka, na računalu se planira i oblikuje potrebni nadomjestak. Konačni podaci šalju se u glodalicu kako bi iz odabranog CAD/CAM materijala oblikovala nadomjestak. Izravna izrada nadomjeska smanjuje potrebno vrijeme za izradu nadomjeska kao i mogućnost ljudske pogreške te samim time nadomjestak može biti gotov u jednoj posjeti. Spomenuti „CEREC“ sustav najpoznatiji je i najviše prihvaćeni pripadnik ove skupine.

Postupak izrade neizravnom tehnikom, odnosno u laboratoriju, može se usporediti s konvencionalnom tehnologijom izrade protetičkog nadomjeska. Ovim načinom se u dentalnom laboratoriju skenira izliveni radni model pacijenta, dobiven iz klasičnog otiska koji je prethodno uzeo doktor dentalne medicine. Dobiveni se podaci obrađuju u računalnom programu te se nadomjestak izrađuje u glodalici koja je također smještena u laboratoriju. Ovom tehnikom najčešće se izrađuju keramičke jezgre koje se, nakon probe u ustima, individualiziraju tehnikom slojevanja, čime se završava rad (8 – 10).

Ako se nadomjestak izrađuje u proizvodnom centru, skupovi podataka proizvedeni u stomatološkom laboratoriju šalju se putem interneta u odabrani centar kako bi se nadomjestak izradio pomoću CAD/CAM uređaja. Nadomjestak se nakon izrade šalje u odgovarajući laboratoriji gdje se obavlja završna obrada. Prednost ove metode proizvodnje jest što je manje investicijski zahtjevna, budući da je potrebno kupiti samo alat za digitalizaciju i softver (8,10).

CAD/CAM sustavi su unaprijedili stomatologiju pružajući visokokvalitetne restauracije. Evolucija postojećih sustava i uvođenje novih sustava pokazuju proširene mogućnosti i poboljšanu kvalitetu, kao i raznolikost u složenosti i primjeni. Novi materijali također pokazuju poboljšana estetska i mehanička svojstva, slična onima prirodnog zuba (11).

1.2. CAD/CAM dentalni materijali

Važan cilj estetske stomatologije je stvaranje nadomjestaka koji se ne razlikuju od prirodnih zubi. Estetski materijali uz dobru biokompatibilnost imaju i boju vrlo sličnu zubima kao i optička svojstva koja ih čine nadmoćnima za visoko estetske nadomjeske. Unatoč inovacijama dentalnih restaurativnih materijala kao što su biokompatibilnost, poboljšana mehanička i optička svojstva, uspjeh estetskih restauracija pretežno ovisi o izboru vrste materijala (1, 12 - 15). Razvoj dentalnih restaurativnih materijala, koji je vođen biomimetičkim pristupom, kako bi što bolje oponašao prirodne karakteristike zuba, doveo je do uvođenja novih generacija keramičkih, kompozitnih i hibridnih materijala s poboljšanim mehaničkim i optičkim svojstvima. Time se proširio spektar dentalnih materijala, omogućavajući širu primjenu u fiksnoj protetici, u skladu s principima minimalno invazivne stomatologije. Kako bi se postigla idealna morfologija, kontura i kontakt, sve više se preferiraju indirektne restauracije, koristeći CAD/CAM tehnologiju. Štoviše, industrijski proizvedeni blokovi su homogeniji i imaju veću

čvrstoću od materijala koji se koriste za direktne restauracije. Također, u posljednjim godinama primijećen je značajan porast potražnje pacijenata bezmetalnih nadomjestaka. Kao rezultat toga, znanstvena istraživanja sve više se fokusiraju na ove materijale, kako bi se istražile njihove osobine, primjene i ograničenja (16 – 18). CAD/CAM materijali klasificiraju se prema sastavu, kao što su keramike, kompozitne smole, nanokeramike, polimerom infiltrirana keramička mreža (PICN) te polimetilmetakrilat (PMMA). Svaki od njih, ima specifične mehaničke i fizičke karakteristike te jedinstvene indikacije za kliničku primjenu (19). Druga vrsta klasifikacije odnosi se na način obrade; kao laboratorijski ili ordinacijski. Svaki materijal ima različite parametre obrade, a cijeli sustav treba se prilagoditi na temelju karakteristika specifičnih materijala. Sastav dentalnih CAD/CAM materijala te njihova mehanička i fizička svojstva, vode stomatologe u odabiru najprikladnijeg materijala za korištenje (20, 21). Neki od najistaknutijih prednosti CAD/CAM tehnike u odnosu na konvencionalnu izradu restauracija uključuju optimiziran rad, jedinstvenu konzultaciju i kraće vrijeme liječenja. Ključna prednost CAD/CAM-a je to što ova tehnika pohranjuje kliničke informacije elektroničkim putem i omogućava uvid u podatke izrađenih restauracija u bilo kojem trenutku. Osim toga, veća preciznost i digitalizacija radnog toka, smatraju se pouzdanim rješenjem za postizanje estetskih očekivanja pacijenata. Izrada nadomjestaka koja uključuje metale, nema estetske prednosti i zahtijeva invazivnije oblikovanje zuba te produženo vrijeme proizvodnje. Stoga su opcije, koje koriste isključivo keramiku, postupno postale obećavajući alternativni pristup. Uzimajući u obzir zahtjeve pacijenata i stomatologa u području estetske stomatologije, CAD/CAM tehnologija sve više zauzima svakodnevnu kliničku praksu, kao alternativa konvencionalnim metodama izrade nadomjeska, zbog svojih estetskih i tehničkih prednosti (22).

1.2.1. CAD/CAM litij – disilikatna keramika

Dugi niz godina, dentalne keramike su smatrane najboljim dostupnim materijalom za usklađivanje estetike i izgleda složenih ljudskih zubnih struktura. S povećanjem estetskih zahtjeva u stomatologiji od strane doktora dentalne medicine i pacijenata, kao i razvojem CAD/CAM tehnologije, dostupna je velika raznolikost dentalnih keramika. Dentalna keramika je među najvažnijim materijalima u raznim područjima poput implantologije, ortodontije i protetike. Dentalne keramike često se smatraju idealnim izborom za dentalne restauracije zbog svog prirodnog izgleda, biokompatibilnosti i izdržljivosti. Osim toga, keramika se odlikuje dobrom translucencijom, čvrstoćom, izvanrednom otpornošću na trošenje i stabilnošću unutar usne šupljine, što je čini privlačnom opcijom za pacijente koji traže dugotrajna rješenja (17, 23). Dentalne keramike dizajnirane za CAD/CAM sustave, doživjele su značajne napretke u posljednjih nekoliko godina, pokazujući izvanrednu dugovječnost uz poboljšana optička i mehanička svojstva. Proizvedene u obliku blokova, dentalne keramike dostupne su u veličinama koje su prikladne za razne vrste restauracija. Litij – disilikat, je staklo-keramički materijal koji se ističe kao jedan od najpopularnijih izbora zbog svojih izvanrednih mehaničkih svojstava, biokompatibilnosti i estetskih karakteristika (22, 24).

Staklokeramike su polikristalinični materijali pripremljeni kontroliranom kristalizacijom putem različitih metoda obrade, koja potiče nukleaciju i rast kristala. Materijali, sastavljeni od jedne ili više kristalnih faza ugrađenih u staklastu matricu, imaju poboljšanu otpornost na trošenje, kemijsku otpornost, savojnu čvrstoću, tvrdoću, otpornost na lom i dimenzijsku stabilnost. Fizička svojstva staklo-keramika ovise o više čimbenika: mikrostrukturi, kemijskom sastavu, kristalnosti, toplinskoj povijesti, kinetici, faznom sastavu i dodacima. Mehanička svojstva krhkih materijala ovise o unutarnjim mikromehaničkim naprezanjima, koja se javljaju tijekom hlađenja između sastavnih faza. Optička svojstva ovise o veličini kristala i razlikama u indeksu loma staklaste matrice i kristalne faze. Prozirnost se povećava smanjenjem veličine kristala. Ako staklasta matrica ima isti indeks loma kao kristalna faza, prozirnost se povećava. Nasuprot tome, veliki kristali smanjuju prozirnost, ali istovremeno povećavaju mehanička svojstva staklo-keramika (25, 26). Staklokeramike su materijal izbora za estetske restauracije, posebno za prednje zube, zbog svoje sposobnosti da imitiraju prirodna zubna tkiva, biokompatibilnosti, kemijske trajnosti u oralnom okruženju i adekvatnih mehaničkih svojstava. Staklokeramike na bazi litij - disilikata ($\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$) predstavljaju jedan od najuspješnijih komercijalnih

materijala u stomatologiji, a mnogi stručnjaci ih široko biraju zbog njihove raznolike primjene (27).

Litij - disilikat, prvi puta je predstavljen 1988. godine od strane Ivoclar Vivadent (Lihtenštajn), pod imenom IPS Empress 2. Ovaj materijal bio je vrsta stakla ispunjenog česticama, poznatog kao staklokeramika, i sadržavao je oko 70% kristalnog punila litij - disilikata. IPS Empress 2 pokazao je ravnomjerniju raspodjelu kristala i imao je manje defekata kada se koristio u kombinaciji s postupkom lijevanja pod pritiskom. Godine 2005. optimiziran je proizvodni proces Empress 2, što je omogućilo pojavu novog keramičkog materijala, IPS e.max Press, što je dovelo do povlačenja IPS Empress 2 s tržišta 2009. godine. Litij – disilikata keramika revolucionirala je područje keramičkih nadomjestaka, zbog poboljšanja estetskih i mehaničkih svojstava. 2006. godine tvrtka Ivoclar Vivadent (Lihtenštajn) izdala je litij - disilikatnu staklokeramiku IPS e.max CAD, koja je posebno dizajnirana za CAD/CAM tehnologiju. Ime označava estetski maksimum, a riječ je o visoko kvalitetnom materijalu. IPS e.max CAD je keramički sustav temeljen na staklu od litij - disilikata, koji se sastoji od litij dioksida, kalijevog oksida, alumine, kvarca, fosfornog oksida i tragova elemenata, a karakteriziraju ga translucencija i trajnost. Ovaj materijal se kupuje u "plavom stanju", odnosno dolazi u djelomično kristaliziranom obliku i prvenstveno se sastoji od meta-silikata (Li_2SiO_3 ; ~40%), uz kristalne jezgre litij disilikata ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$). IPS e.max CAD se obrađuje u svom djelomično kristaliziranom "plavom stanju", koje karakterizira umjerena fleksibilna čvrstoća (~130 MPa), otpornost na frakture ($0,9\text{--}1,25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) i Vickersova tvrdoća (5400 MPa), što rezultira većom učinkovitošću rezanja, lakšom i bržom obradom te manjim trošenjem alata za obradu. Nakon završetka procesa obrade, dobiveni nadomjestak se kristalizira na $840\text{--}850^\circ\text{C}$, tijekom 20–25 minuta, pod vakuumom, kako bi se meta-silikatni kristali pretvorili u ~70% litij - disilikata i dobila potpuno kristalizirana mikrostruktura (24, 28, 29). Osim toga, ovaj materijal se preferira u odnosu na krunice od cirkonijskog dioksida jer je otporniji, trajniji i manje podložan oštećenjima (30).

Litij - disilikat ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) karakteriziraju prisutnost otprilike 70% kristala litij - disilikata, koji mjere između 2 i 5 μm u duljini i 0,8 μm u promjeru, ugrađenih unutar amorfne staklaste matrice, što ga klasificira kao staklokeramički materijal. Kemijski sastav ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) doprinosi izvanrednim mehaničkim svojstvima litij - disilikata, uključujući savojnu čvrstoću od 300 do 400 MPa, otpornost na lom od 2,8 do 3,5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, temperaturu topljenja od 920°C , koeficijent

toplinske ekspanzije od $10,6 + 0,25 \text{ ppm/}^{\circ}\text{C}$ i dobru translucenciju, kao i tvrdoću sličnu onoj prirodnih zuba. Izvanredna translucencija ovih keramika čini ih omiljenim izborom za estetski zahtjevne slučajeve, iako varijabilnost savojne čvrstoće CAD/CAM blokova ovisi o proizvođaču. Ovi keramički blokovi pokazali su značajan klinički uspjeh, dok njihova mehanička svojstva omogućuju širu primjenu, na primjer za izradu ljuskica, inleja, onleja, pojedinačnim kronicama ili mostova do 3 člana (20, 30, 31). Litij - disilikat, jedno je od najpopularnijih materijala za dentalne restauracije zbog svoje visoke mehaničke čvrstoće i povoljnih estetskih svojstava. U posljednje vrijeme, CAD/CAM tehnologija postala je svakodnevno prisutna u kliničkoj praksi. Manje je tehnički osjetljiva, što omogućuje izradu detaljnijih i preciznijih nadomjestaka, a istovremeno smanjuje vrijeme i troškove proizvodnje. U procesu obrade koristi se djelomično kristalizirano stanje litij metasilikata, kako bi se povećala učinkovitost rezanja, maksimizirao životni vijek alata za frezanje i olakšao proces zbog njegove blage do umjerene čvrstoće i tvrdoće. Dodatna toplinska obrada nakon frezanja uzrokuje strukturne promjene u keramici koja potiče rast i zrenje litij - disilikata. Isto tako utječe na optička i mehanička svojstva, koja su glavni faktori u određivanju rezultata tretmana keramikom u dentalnoj klinici. Prozirnost je primarni faktor u kontroli estetskog rezultata dentalnih keramika, a izravna propusnost svjetlosti pokazala se kao pouzdana metoda za procjenu prozirnosti i neprozirnosti estetskih restaurativnih materijala. Mehanička čvrstoća je važan faktor koji kontrolira klinički uspjeh dentalnih nadomjestaka, što određuje trajnost restauracije. Debljina keramike, koja je određena količinom smanjenja zuba, jedan je od glavnih faktora koji utječe na optička i mehanička svojstva keramičkih materijala. Prethodna istraživanja su pokazala da na parametar prozirnosti dentalnih keramika, uključujući staklokeramike i cirkonijske keramike, značajno utječe debljina, pri čemu se prozirnost smanjuje s povećanjem debljine (32).

1.2.2. CAD/CAM kompoziti

Kompozitni materijali u dentalnoj medicini koriste se od šezdesetih godina prošlog stoljeća. Otkriće kompozitne smole bisfenol A glicidil dimetakrilat (Bis-GMA) zasluga je Rafaela L. Bowena, što je predstavljalo prekretnicu za izravnu oralnu primjenu ovih materijala. Prvotno je korištena samo za estetske restauracije prednjih zuba, međutim, s vremenom i poboljšanjem fizičko-mehaničkih svojstava, kompoziti su postali univerzalni materijali za izradu ispuna. Prvi kompoziti bili su dvokomponentni i samopolimerizirajući, a ubrzo su se pojavili svjetlosno-polimerizirajući. Veliki napredak u razvoju kompozitnih materijala došlo je s uvođenjem polimerizacije vidljivim svjetlom 1977. godine. Krajem 1970-ih uvedeni su novi monomeri, a razvijeni su makropunjeni i mikropunjeni kompoziti, koji se razlikuju po veličini čestica anorganskog punila. Početkom 1980-ih kompoziti su se, osim za izravne ispune, počeli koristiti i u indirektnim postupcima nadoknade izgubljenog tvrdog zubnog tkiva (33). Kompozit se definira kao kombinacija dvaju ili više kemijski različitih materijala. Sastoje se od tri dijela: organske smolaste matrice, anorganskih čestica punila i vezujućeg sredstva. Osim navednog u sastavu kompozita nalaze se i stabilizatori boje, inhibitori, pigment i aktivatorski sustav. Organsku smolastu matricu predstavlja bisfenol-A-glicidil metakrilat (Bis-GMA) ili uretan dimetakrilat (UDMA). Fizička svojstva kompozitnih materijala određena su količinom anorganskog punila. Veličina čestica varira od materijala do materijala, a njihova veličina određuje stupanj poliranosti kompozita, dok njihova zastupljenost poboljšava mehanička svojstva materijala. U anorgansko punilo ubraja se koloidni silicij, barijsilikat, stroncij/borosilikatno staklo, kvarc, zink silikat, litij aluminij silikat, itrijev- i iterbijev trifluorid. Spojno sredstvo povezuje polimernu matricu s česticama punila. Kemijska veza ostvaruje se silanima, koji sprječavaju hidrolitičku degradaciju punila i omogućuju raspodjelu naprezanja između smole i punila. Najčešće korišteni spojni agens je γ -metaksiloksiipropiltrimetoksi silan, koji se s jedne strane veže za hidroksilne skupine punila, dok se s druge strane metakrilatne skupine podvrgavaju polimerizaciji (33, 34). Za mnoge doktore dentalne medicine, direktne restauracije kompozitom, prvi su izbor prilikom nadomjeska tvrdih zubnih tkiva. Niz tehničkih ograničenja, poput izazovnih situacija kod zuba s većim gubitkom tkiva i rubnog propuštanja, kao i često razočaravajući vijek trajanja kompozita, legitimirali su indirektni restaurativni pristup. Onaj koji kombinira izradu izvan usne šupljine i korištenje materijala sa superiornim mehaničkim svojstvima. Tijekom posljednjih desetljeća, monolitne restauracije uz pomoć

CAD/CAM tehnologije postale su popularne i počele su zamjenjivati velike direktne kompozitne ispune. Digitalizacija, a posebno uvođenje CAD/CAM jedinica za izradu na radnom mjestu, olakšala je tijek rada za proizvodnju indirektnih restauracija, čineći ga bržim, jednostavnijim i preciznijim u usporedbi s konvencionalnim postupkom (35). CAD/CAM kompozitni blokovi proizvode se pod optimiziranim i standardiziranim uvjetima, uključivanjem čestica punila u smjesu monomera koja se učvršćuje pod visokim temperaturama i tlakom. Ova metoda polimerizacije omogućuje veću homogenost materijala uz manju prisutnost defekata i poboljšava mehanička svojstva kao što su: otpornost na frakture, otpornost na savijanje i trošenje. Isto tako, ovom metodom postiže se veći stupanj konverzije, koji utječe na kemijsku stabilnost materijala, odnosno apsorpciju vode te dodatno smanjuje udio ostatnog monomera koji ima tendenciju ispuštanja iz materijala (36, 37). CAD/CAM kompoziti temelje se na polimernoj matrici koja se sastoji od različitih vrsta dimetakrilata (DMA) i obogaćena je visokim udjelom anorganskih punila (najčešće stakla). Punila se razlikuju po obliku, veličini i sastavu. Nadalje, u usporedbi s keramikom, CAD/CAM kompoziti su korisne zbog svoje tvrdoće, čvrstoće i elastičnih modula, koji su usporedivi sa strukturom zuba, što dovodi do manjeg trošenja antagonista (38). Paradigm MZ100 (3M Oral Care, Seefeld, Njemačka) bio je prvi CAD/CAM kompozitni materijal s fleksibilnom čvrstoćom od 157 MPa. Ostali primjeri CAD/CAM kompoziti uključuju Tetric CAD (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn), koji se sastoji od smole od Bis-GMA, Bis-EMA, TEGDMA i UDMA, ispunjene sa 70% čestica barijevog stakla i silicijevog dioksida. Ovaj kompozit ima fleksibilnu čvrstoću od 273,8 MPa i elastični modul od 10,2 GPa (20, 39). Čimbenici poput promjera punila, omjera spojnog sredstva, udio punila te sastava punila i monomera, mogu utjecati na mehanička svojstva CAD/CAM kompozita. CAD/CAM kompoziti, koji sadrže visoki udio nano-punila, dostupni su za restauracije stražnjih zuba. U usporedbi s konvencionalnim kompozitima, CAD/CAM kompoziti pokazuju superiorna mehanička svojstva, poput fleksibilne čvrstoće, Vickersove tvrdoće i otpornosti na frakture u smislu njihove kliničke otpornosti na trošenje. Iako su Vickersove tvrdoće niže od onih keramičkih, fleksibilna čvrstoća usporediva je s čvrstoćom keramičkih blokova i unutar je prihvatljivog raspona (>100 MPa) za pojedinačne restauracije opisane u ISO standardima. U konvencionalnim kompozitima, Youngovi moduli povećavaju se kako prosječni promjer čestica punila raste pri konstantnom udjelom punila.

Da bi se dodatno poboljšala mehanička svojstva CAD/CAM kompozita i postigla izvrsna svojstva, potrebno je optimizirati veličinu nano-punila (40, 41).

1.2.3. CAD/CAM polimetilmetakrilat

Dobro izrađen privremeni nadomjestak ključan je za postizanje kvalitetnog trajnog protetskog nadomjeska. Privremeni nadomjestak mora održavati položaj zuba, štititi pulpu, očuvati potporni aparat zuba te osigurati funkciju i estetiku. Terapija dentalnim implantatima, ortodonska stabilizacija ili postupci koji uključuju opsežnu okluzalnu rekonstrukciju odnosno promjene vertikalne dimenzije, situacije su gdje je privremena zaštita potrebna kroz dulje vrijeme. Kada dugotrajne fiksne privremene restauracije zamjenjuju nekoliko zuba, čvrstoća i stabilnost materijala su ključni za dugotrajno privremeno liječenje (42). Iz tog razloga, privremeni restaurativni materijali trebaju imati dobra fizička i mehanička svojstva, kako bi se izbjegli neuspjesi pod dugotrajnim funkcionalnim opterećenjem. Na temelju sastava, materijali za privremene restauracije mogu se podijeliti u dvije vrste: polimetilmetakrilata (PMMA) ili poli-etilmetakrilata (PEMA) i bis-akrilne ili dimetakrilatne smole. PMMA je prvi put korišten kao privremeni materijal, a s napretkom u znanosti o materijalima, uvedeni su noviji materijali poput bis-akrilata kako bi se postigli najbolji klinički rezultati. PMMA je najčešći i najstariji korišten materijal, zbog svojih prednosti, poput izvrsne dimenzionalne stabilnosti u oralnim okruženjima, niske cijene, prihvatljive estetike te jednostavnosti izrade i popravka. Prihvatljiva translucencija i estetika, omogućuju dobru prilagodbu u usnoj šupljini (43).

Uvođenje digitalne tehnologije u području protetske stomatologije, revolucioniralo je terapijski tijek. Više istraživanja usporedilo je fizička i mehanička svojstva CAD/CAM PMMA s konvencionalnim PMMA i utvrdilo da CAD/CAM PMMA imaju bolja svojstva. Konvencionalni PMMA materijali pokazuju visok stupanj skupljanja tijekom polimerizacije, te visoku razinu ostatnog monomera, apsorpciju vode te poroznost. Pojava ovih nedostataka je smanjena, korištenjem standardiziranih i optimiziranih proizvodnih tehnika (44).

PMMA je polimer akrilne kiseline koji je prvi put opisao Redtenbacher 1843. godine. Međutim, razvoj PMMA za biomedicinske primjene bio je postupan proces koji se protezao kroz

desetljeća. Od 1940-ih, PMMA je postao bitan materijal za dentalne laboratorije i klinike. Svojstva poput jednostavnosti obrade, prihvatljiva mehanička svojstva, estetika, isplativosti i niska toksičnosti, PMMA je zamijenio prethodno korištene materijale. Svi ranije korišteni materijali imali su određene nedostatke, a potraga za idealnim materijalom još uvijek je u tijeku. Tijekom posljednje polovice 20. stoljeća, PMMA je stekao značajnu popularnost za izradu raznih dentalnih i maksilofacijalnih nadomjestaka, uključujući obturatore, proteze, privremene krunice i mostove (45).

PMMA je sintetički polimer koji se sintetizira adicijskom reakcijom i polimerizacijom metilmetakrilata kako bi se formirao polimetilmetakrilat. Reakcija polimerizacije aktivira se generiranjem slobodnog radikala, bilo kemijski ili pomoću toplinske ili svjetlosne energije. U fazi propagacije, aktivirana polimerizacija nastavlja se vezanjem monomera, a zatim završava premještanjem slobodnih elektrona na kraj lanca. Različiti mehanizmi mogu prekinuti reakciju polimerizacije, poput dodavanja kemijskih inhibitora (hidrokinon ili metileter) u monomer, isto tako prisutne nečistoće u monomeru mogu inhibirati polimerizacijsku reakciju reagirajući sa slobodnim radikalima. Rastući interes za PMMA nadomjeske potaknuo je razvoj PMMA blokova s poboljšanim optičkim i fizičkim svojstvima. Primjeri uključuju Telio CAD od Ivoclar Vivadent, Schaan iz Lihtenštajna i VITA CAD-Temp MultiColor blokove iz VITA Zahnfabrik (Bad Sackingen, Njemačka). PMMA se široko primjenjuje u protetskoj stomatologiji, uključujući izradu baza proteza, obturatora, ortodontskih retainera i privremenih nadomjestaka. CAD/CAM PMMA pokazuje superiorna svojstva u usporedbi s konvencionalnim PMMA materijalima. Poboljšanje mehaničkih svojstava proširilo je upotrebu CAD/CAM PMMA za dugotrajne privremene nadomjeske, čak i do jedne godine. Osim toga, povećana hidrofobna priroda CAD/CAM PMMA, u usporedbi s konvencionalnim, rezultira smanjenim nakupljanjem plaka na površinama CAD/CAM protetika. Značajno je zabilježeno i smanjeno vezivanje *Candida albicans*, glavnog patogena u protetskom stomatitisu (20, 45). Materijali na bazi PMMA trebaju imati određena svojstva ovisno o biološkoj primjeni. Sukladno tome, PMMA materijali su opsežno modificirani i istraženi u odnosu na različita kemijska, biološka, fizička i mehanička svojstva. Protetski nadomjesci izloženi su kompleksnim oralnim uvjetima, stoga ti materijali moraju biti stabilni odnosno biokompatibilni i ne smiju uzrokovati iritaciju, toksičnost ili mutaciju oralnih tkiva (45).

1.2.4. CAD/CAM hibridni materijali

Cilj svih stomatoloških materijala je oponašati složenost mehaničkih i bioloških karakteristika cakline i dentina. Međutim, to nije lak zadatak obzirom na složenost prirodnih struktura zubnih tkiva. Stomatološke keramike pokazuju neke fizičke osobine koje su analogne onima cakline, dok kompozitne smole bolje reproduciraju karakteristike dentina. Razvoj određenih materijala koji bi kombinirali karakteristike keramike i kompozita bio bi idealan (46). Kompozitne smole i keramike su najčešće korišteni materijali za izradu stomatoloških restauracija. Kompozitne smole, u osnovi se sastoje od organske matrice ojačane anorganskim česticama punila. Količina čestica punila izravno je povezana s Youngovim modulom i tvrdoćom materijala. S druge strane, skupljanje tijekom polimerizacije određuje se monomerima matrice, a najčešći su Bis-GMA, UDMA, UTMA i Bis-EMA. Razvoj tehnologije punila doveo je do značajnih poboljšanja svojstava kompozitnih smola. Međutim, klinička izvedba izravnih kompozitnih smola i dalje je inferiorna u odnosu na neizravne keramičke restauracije, posebno u pogledu marginalne prilagodbe, usklađenosti boje i anatomske oblike. Osim toga, usporedba između neizravnih keramika i neizravnih kompozita, oba proizvedena u CAD/CAM sustavu, pokazala je da neizravne kompozitne restauracije imaju slabija estetska svojstva i otpornosti na trošenje u usporedbi s keramikama. Čvršće keramike s visokim kristalnim sadržajem su manje prozirne od staklokeramika. Idealno rješenje bi bilo, zamijeniti izgubljeno zubno tkivo restaurativnim materijalom, koji ima svojstva slična zubu. Tim ciljem razvijeni su novi materijali koji nastoje imitirati svojstva prirodnog zuba. Zbog poboljšanja svojstava i težnji za stvaranjem „idealnog“ restaurativnog materijala, keramike i kompozitne smole su kombinirane u jedan materijal. Ova činjenica čini se dobrom alternativom za povezivanje elastičnog modula kompozitne smole, koji je sličan dentinu, s dugoročnom estetskom stabilnošću keramike. Ovi materijali, nedavno su predstavljani i nazvani hibridnim materijalom. Indikacije su: minimalno invazivne restauracije i stražnje krunice, ljuskice, inleji i onleji za stražnje zube te krunice nakon implantološke terapije. Sastav i mikrostruktura stomatoloških materijala određuju njihova mehanička i fizička svojstva. Osobito za keramike, mikrostruktura ovisi o sinteriranju i značajno utječe na koeficijent toplinske ekspanzije, vrijednosti otpornosti, kemijsku topivost, prozirnost i optički izgled (47). Superiorna svojstva keramike, kao što su estetika, biokompatibilnost, otpornost na trošenje i kemijska trajnost, potaknula su kontinuirano istraživanje i razvoj naprednih keramika tijekom vremena. Polimeri su laki za rukovanje i nude

moгуćnost intraoralnog popravka, fleksibilniji su i manje djeluju abrazivno na antagonista, no njihova slaba otpornost na trošenje i slabija mogućnost za poliranjem stavljaju ih u nepovoljan položaj u usporedbi s keramikom. Keramika je krhka, što povećava rizik od marginalnog odlamanja i fraktura. Slično tome, loša otpornost na frakture, staklokeramika dovela je do razvoja niza keramičkih materijala s visokim kristalnim sadržajem kako bi se kompenzirale okluzalne sile (48 - 50). Prednosti oba materijala, kombinirane su u novim hibridnim materijalima, kako bi se minimalizirali njihovi nedostaci. Ovi materijali karakteriziraju se dvostrukom mrežnom strukturom keramike i polimera, u kojoj je dominantna keramička mreža ojačana polimernom mrežom. Savojna čvrstoća ovih hibridnih materijala iznosi između 150 i 210 MPa, i simulira strukturu i svojstvo prirodnog zuba. Polimerna struktura materijala također sprječava nastanak pukotina u keramičkoj mreži (51). Hibridni materijali mogu se klasificirati na temelju metoda proizvodnje, sastava i mikrostrukture: polimerom infiltrirana keramička mreža (PICN) i nanokeramika.

Materijal poznat pod nazivom, polimerom infiltrirana keramička mreža (PICN), ima svojstva keramike i polimera. Definira se kao hibridni materijal s dvostrukom mrežom od keramike i polimera. Keramički prah se komprimira u blokove, a zatim se sinterira u poroznu mrežu. Rezultat je sinterirana glinična keramička mreža koja ima trodimenzionalnu međusobno povezanu geometriju te je treba obraditi uz pomoć vezivnog sredstva kako bi se potaknula povezanost između različitih faza materijala. Kemijski obrađena keramička mreža infiltrira se umreženim polimerom, a zatim se polimerizira na visokoj temperaturi od 180 °C i pod visokim pritiskom od 300 MPa, stvarajući polimerom infiltriranu keramičku mrežu. Gustoća i temperatura obrade imaju značajan utjecaj na konačna svojstva ovog materijala. Primijećeno je da veća gustoća prethodno infiltrirane keramike i veći pritisak infiltracije pružaju superiorna mehanička svojstva. Optimalna gustoća je ključna za osiguranje potpune infiltracije polimera (46, 49). PICN ima bolju otpornost na trošenje od kompozitnih smola te pokazuje visoku savojnu čvrstoću i elastičnost sličnu dentinu. Dominantna keramička mreža pokazuje dobru otpornost na trošenje, a međusobno spojene mreže keramike i polimera sprječava širenje pukotina u materijalu. PICN se primjenjuje za izradu ljuskica, inleja, onleja, prednje i stražnje pojedinačne krunice te implantološke protetike. PICN CAD/CAM blokovi našli su primjenu u području neizravne restauracije zuba, a komercijalno dostupni PICN je poznat pod nazivom Vita Enamic (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Njemačka). Ovaj materijal sastoji se od 86%

keramike (50–63% SiO₂ / 20–23% Al₂O₃) i 14% polimera (UDMA / TEGDMA). Savojna čvrstoća Vita Enamic iznosi 150 – 160 MPa a modul elastičnosti 30 GPa (20, 50, 52, 53).

Nanotehnologijom naziva se znanost koja se bavi dimenzijama na atomskoj i molekularnoj razini. Veličina čestica materijala i kemijska svojstva mogu se promijeniti pomoću nanotehnologije. Nanokeramike sastoje se od nanočestica keramike, Bis-GMA, UDMA, BisEMA i TEGDMA. Nanokeramike razlikuju se od kompozitnih blokova prvenstveno u veličini čestica. Tako je veličina polimernih čestica oko 20nm, dok veličina keramičkih čestica iznosi 4 – 11nm. U njihovoj proizvodnji, koristi se silan kao spojno sredstvo. Visoki udio nanočestica čini materijal otpornim na trošenje i lomljenje. Nano-dimenzionalna struktura također jača kemijske veze koje se formiraju između anorganske keramike i organske smolaste matrice. Nanokeramike imaju sličnosti s prirodnim zubima, često pokazujući savojnu čvrstoću od 238 MPa dok modul elastičnosti iznosi 12 GPa. Nanokeramike se koriste u raznim stomatološkim postupcima, uključujući ljuskice, inlejš, onlejš, te pojedinačne krunice i mostove (20, 50). Keramikom ojačani polimeri razvijeni su kao pokušaj da se premosti razlika između svestranosti kompozitnih smola i trajnosti te estetskih svojstava keramičkih materijala. Oni kombiniraju međusobno isprepletene polimere i različite vrste keramike koje pokazuju prihvatljivu estetiku, otpornost i sposobnost za proizvodnju minimalno invazivnih adhezivnih restauracija. Ovi sustavi se lako mogu izrađivati, manipulirati, prilagođavati i popravljati (46).

1.2.5. Optička svojstva CAD/CAM materijala

S napretkom restaurativnih materijala, individualna očekivanja u odabiru materijala također su se razvila. Tijekom posljednjih 30 godina, tržište je doživjelo eksploziju raznolikosti estetskih materijala, što je značajno proširilo raspon restaurativnih materijala. Jedan od glavnih ciljeva estetske stomatologije je proizvodnja restauracija koje se što vjernije približavaju izgledu prirodnih zuba. Boja, translucencija, opalescencija i fluorescentnost su optička svojstva koja definiraju bitan izgled prirodnog zuba (54 – 56). Među ovim estetskim karakteristikama, translucencija i boja imaju najznačajniji utjecaj na izgled zuba. Osim toga, translucencija je ključni faktor u estetskim dentalnim restauracijama. Kada svjetlost interagira s površinom materijala, javljaju se refleksija, refrakcija i apsorpcija. Površinsko raspršivanje je optički efekt

u kojem svjetlost ulazi u površinu materijala, ondje se rasprši i zatim izlazi predominantno kroz površinu. Ovaj fenomen raspršivanja ispod površine od ključne je važnosti za restaurativne materijale kako bi bili prozirni i oponašali izgled prirodnih zuba (57). Kako bi zadovoljili rastuće estetske zahtjeve pacijenata, doktori dentalne medicine trebaju dublje razumjeti optička svojstva dentalnih materijala, pri čemu je translucencija ključni faktor u oponašanju optičkih svojstava cakline i dentina. Translucencija, koja se odnosi na sposobnost svjetlosti da prodre u materijal, predstavlja stanje između potpune neprozirnosti i transparentnosti i od značajne je kliničke važnosti iz nekoliko razloga: omogućuje prilagodbu optičkih svojstava dentalnih tkiva, pomaže u maskiranju nepoželjnih boja podloge te olakšava prozirnost za materijale koji se stvrdnjavaju svjetlom (58). U estetskoj stomatologiji, parametar prozirnosti (TP) često se koristi i izračunava unutar okvira prostora boja međunarodne komisije za osvjetljavanje (CIE). Koristi se za kvantitativnu procjenu prozirnosti mjerenjem razlike u boji između bijele i crne pozadine. Više vrijednosti TP označavaju veću prozirnost, dok niže vrijednosti TP označavaju manju prozirnost (60, 61). Parametri translucencije monolitnih monokromatskih CAD/CAM materijala variraju ovisno o vrsti materijala (Tablica 1).

Tablica 1. Vrijednosti parametra translucencije za CAD/CAM materijale debljine 1mm i 2mm
(preuzeto iz 61)

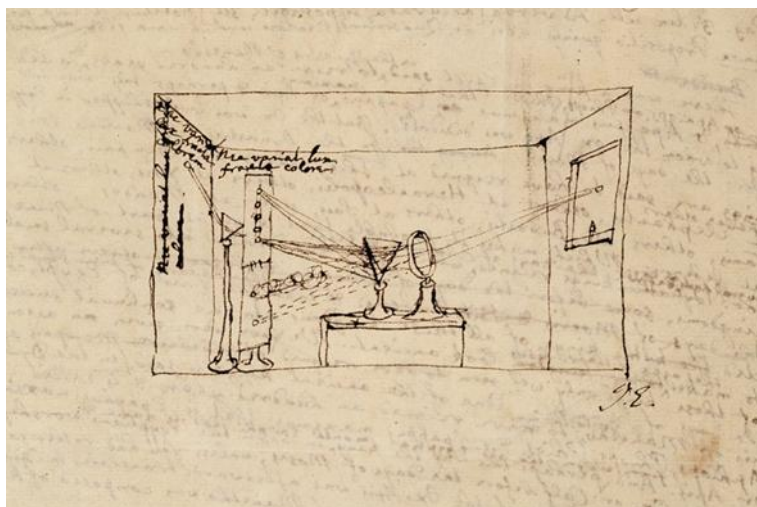
Materijal	CAD/CAM litij - disilikat	CAD/CAM polimerom infiltrirana keramika	CAD/CAM nanokeramika	CAD/CAM kompozit	CAD/CAM polimer
1 mm	17	17	17	16	15
2 mm	12	12	12	10	9

Unatoč napretku u dentalnim restaurativnim materijalima, uključujući bolju biokompatibilnost i poboljšana mehanička i optička svojstva, uspjeh estetskih restauracija uvelike ovisi o odabiru odgovarajućeg materijala. Translucencija je ovisna o sastavu materijala, prvenstveno zbog razlika u refrakcijskom indeksu između punila i organske matrice, količine punila i veličine

punila (62). Razvoj CAD/CAM tehnologije značajno je proširio i poboljšao područje protetskih bezmetalnih restauracija. Glavna prednost ove tehnologije leži u mogućnosti korištenja homogenih, bezgrešnih CAD/CAM blokova. I kliničari i proizvođači traže restaurativni materijal koji uravnotežuje savojnu čvrstoću s idealnom trasnLucencijom potrebnom za stvaranje restauracija koje vjerno oponašaju prirodne zube. Nedavni napredci u monolitnim CAD/CAM restaurativnim materijalima imaju za cilj poboljšanje i optičkih i mehaničkih svojstava ovih restauracija (63). Restauracije od litij - disilikata najprije se obrađuju u djelomično kristaliziranom obliku, a zatim prolaze kroz kristalizacijsko pečenje kako bi postigle svoju konačnu čvrstoću i estetski potencijal. Pokazalo se da mali silikatni kristali u matrici litij - disilikata poboljšavaju prozirnost materijala. Alternativni pristup postizanju optimalnih svojstava CAD/CAM restaurativnih materijala, kao što su dovoljna prozirnost, lako poliranje i visoka otpornost na lom, jest kombiniranje prednosti keramike i polimera. To je dovelo do razvoja hibridnih materijala, koji se proizvode u obradivim CAD/CAM blokovima i za koje se izvještava da imaju zadovoljavajuća mehanička i estetska svojstva. Hibridne keramike poznate su po svojoj visokoj savojnoj čvrstoći, te odličnim optičkim svojstvima, čineći ih vrijednom opcijom za restauracije. Hibridne materijale možemo podijeliti na nanokeramike i keramike infiltrirane polimernom mrežom (64). Polimeri igraju važnu ulogu u stomatologiji, pri čemu je polimetilmetakrilat (PMMA) široko korišten. Privremena restauracija mora ispunjavati biološke, estetske i mehaničke zahtjeve za fiksno - protetske restauracije. U slučajevima potpune rehabilitacije usne šupljine, privremene restauracije trebaju biti izdržljive, posebno ako su potrebni dodatni tretmani poput intenzivne parodontalne terapije, ortodontske stabilizacije ili prilagodbi vertikalnoj dimenziji okluzije. Za dugotrajne fiksne privremene restauracije koje zamjenjuju više zuba, ključno je da materijal pruža i čvrstoću i stabilnost kako bi podržao produženu upotrebu i izdržljivost (51, 65). Kompozitni materijali obično se sastoje od tri glavna sastojka: organske matrice, anorganskih čestica punila i veziva. CAD/CAM materijali polimeriziraju se pod kontroliranim uvjetima pri povišenoj temperaturi i pritisku, što rezultira poboljšanim optičkim svojstvima (66).

1.3. Boja i kolorimetrijski sustavi

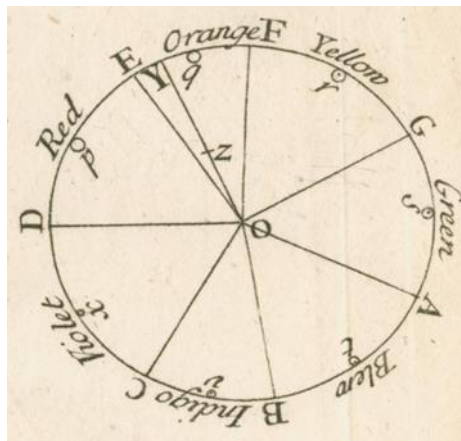
Svjetlost i njome povezani fenomeni proučavaju se od davnina te je povijest istraživanja zanimljiva i bogata. Razdoblje u kojem su se formirale prve znanstvene spoznaje o svjetlosti, koje su i danas važeće i znanstveno prihvaćene, je razdoblje od 17. stoljeća do danas. Može se reći da naše moderno razumijevanje svjetlosti i boje počinje Newtonovim otkrićem disperzije svjetlosti koje je objavio 1672. godine. Krajem 1660-ih, Newton je počeo eksperimentirati s fenomenom boja i predavao je o optici. Tada se općenito smatralo da su boje mješavine svjetlosti i tame. Također se vjerovalo da prizme daju boje svjetlu. Promatrajući refrakciju svjetlosti, Newton je shvatio da je ova teorija pogrešna. Demonstrirao je da prizma razlaže "bijelu" svjetlost na spektar boja. Newton je nabavio trokutastu prizmu i počeo "pokušavati s poznatim fenomenima boja." U svojim bilješkama navodi: "Nakon što sam zatvorio svoju sobu i napravio mali otvor u prozoru kako bih pustio prikladnu količinu sunčeve svjetlosti, postavio sam svoju prizmu na ovaj ulaz, da bi bila tako refraktirana na suprotni zid. Isprva je to bio vrlo ugodan zabavni trenutak, promatrati živopisne i intenzivne boje koje su se proizvele; ali nakon nekog vremena, kada sam počeo pažljivije razmišljati o njima, iznenadio sam se vidjevši ih u duguljastom obliku, za koji sam, prema uobičajenim zakonima refrakcije, očekivao da će biti kružni." Originalna skica prikazuje tamnu prostoriju u kojoj je ovaj eksperiment proveden (Slika 1).



Slika 1. Newtonov crtež refraktiranja sunčeve svjetlosti prizmom. Eksperiment prikazuje svjetlost koja prolazi kroz otvor, zatim se prikuplja lećom i fokusira na prizmu koja potom refraktira bijelu svjetlost u njene spektralne komponente. Eksperimentalni crtež također prikazuje drugu prizmu koja se koristi da pokaže da uski spektar svjetlosti nije dodatno razložen. Poseban eksperiment korišten je za pokazivanje reverzibilnosti procesa (preuzeto iz 67)

On je prvi koristio riječ spektar (latinski za "izgled" ili "prikaz") u ovom smislu. Također je koristio dodatne prizme za ponovnu kombinaciju razdvojenih komponenti i pokazao da spektralno obojena svjetlost ne mijenja svoja svojstva razdvajanjem obojene zrake i osvjetljavanjem različitih objekata, bez obzira je li se reflektirala, raspršivala ili prenosila. Što se tiče boja, Newton je rekao: "Jer zrake, da govorim ispravno, nisu obojene. U njima nema ničega osim određene moći i dispozicije da pobude osjet ovog ili onog kolorita." Tijekom tog razdoblja istraživao je i refrakciju svjetlosti te demonstrirao da se višebojni spektar koji proizvodi prizma može ponovo sastaviti u "bijelu" svjetlost pomoću leće i druge prizme. U istom razdoblju Newton je primijetio da je kut refrakcije različitih boja kroz prizmu različit. Uočio je da, čak i kada svjetlosne zrake u obliku kružnog snopa ulaze u prizmu, spektar boja koji izlazi na mjestu minimalne devijacije ima duguljast oblik. Duljina obojenog spektra bila je otprilike pet puta veća od njegove širine. Izjavio je da je interakcija objekta sa svjetlošću ta koja stvara boju objekta, a ne sam objekt. Ovo je poznato kao Newtonova teorija boje (67, 68).

U svom promatranju disperzije bijele svjetlosti u spektralne komponente, Newton je podijelio spektar na sedam nazvanih boja: ljubičastu, indigo, plavu, zelenu, žutu, narančastu i crvenu. Boje je postavio u kružni oblik i nazvao ga krugom boja, koristeći ga za demonstraciju rezultata mješavina spektralnih svjetlosti, uključujući komplementarnost (one koje se, kada se pomiješaju, međusobno poništavaju i rezultiraju bijelom, sivom ili crnom) (Slika 2).

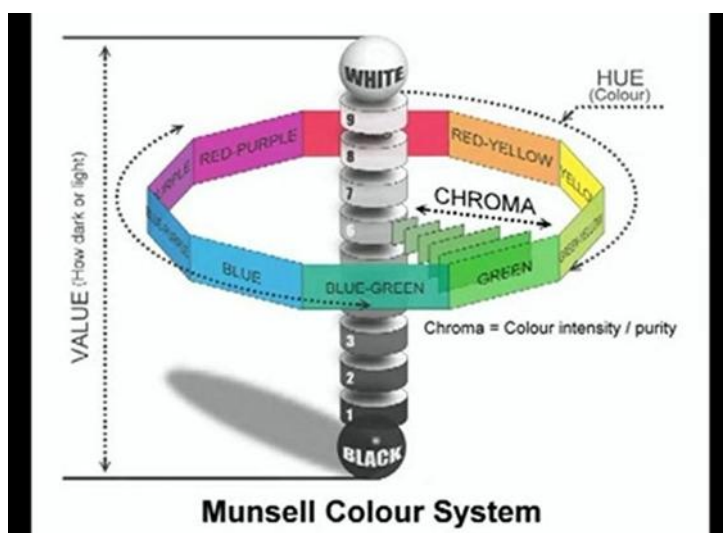


Slika 2. Boje i povezane glazbene note u Newtonovom krugu boja, prikazane u njegovoj knjizi Optika iz 1704. godine. Krug pokriva punu glazbenu oktavu, od D do D. Boje na suprotnim stranama su komplementarne. (preuzeto iz 67)

Veličina svakog segmenta razlikovala se od ostalih prema njegovim proračunima valne duljine, sedam glazbenih tonova ili intervala od osam zvukova i odgovarajuće širine u spektru. Odabir sedam boja proizašao je iz uvjerenja, preuzetog iz starogrčkog, da su boje, objekti u sunčevom sustavu, glazbene note i dani u tjednu međusobno povezani. To vjerojatno objašnjava izbor indiga kao još jednog tonusa između plave i ljubičaste. Newton je predložio metodu za određivanje "punoće ili intenziteta" kombiniranih boja na krugu na temelju udaljenosti središta za svaku od svjetlosnih zraka (udaljenost od O do Z u prikazu za Boju Y, koja proizađe iz sastava svih boja u zadanoj mješavini). Krug boja bio je, u nedostatku nespektralnih boja, rana reprezentacija onoga što je stoljećima kasnije, u izmijenjenom obliku, postalo dijagram intenziteta. U svom sustavu, Newton je povezao ljubičastu s crvenom u krugu, pa tako veliki

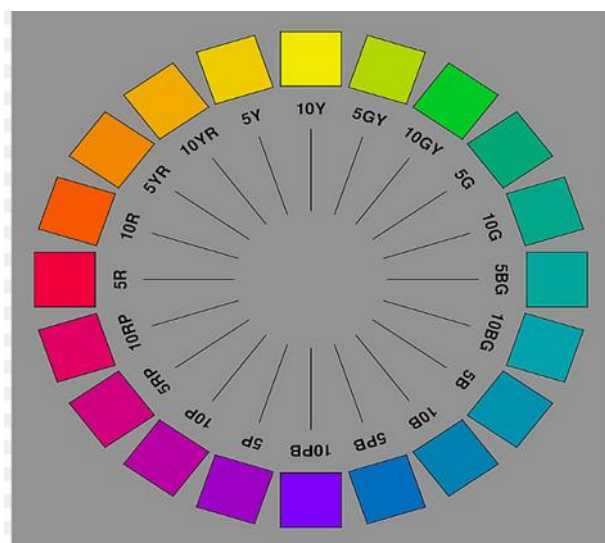
spektar purpurnih boja nije bio prikazan. Newton je opisao komplementarne boje i njihovu mješavinu te izjavio: "Ako se pomiješaju samo dvije od primarnih boja koje su u krugu suprotne jedna drugoj u jednakim proporcijama,..., boja sastavljena od ove dvije neće biti savršeno bijela, nego neka blijeda anonimna boja." Newtonov koncept komplementarnih boja temeljitije je demonstriran u devetnaestom stoljeću od strane teoretičara boje. Helmholtz je uspostavio komplementarne parove podražaja, a Ogden Rood (1831–1902) naglasio je da je za otkrivanje primijenjenih boja u njihovoj prirodnoj sjajnosti potrebno poznavanje komplementarnih tonova. Verzija Newtonovog kruga boja bez indigo plave usvojena je od strane slikara za opisivanje komplementarnih boja. Ipak, ovaj kružni dijagram postao je model za mnoge sustave boja osamnaestog i devetnaestog stoljeća. Konceptualni raspored boja u ovom obliku također je omogućio da primarne boje slikara (crvena, žuta, plava) budu postavljene nasuprot svojim komplementarnim bojama (npr. crvena nasuprot zelenoj), kao način označavanja da će svaka komplementarna boja pojačati učinak druge kroz optički kontrast (67 – 69). Postoje tri različita i uobičajena načina korištenja pojma boja. U području kemije, boja se koristi kao generički pojam za boje i pigmente. U fizici, koristi se za označavanje optičkih fenomena s mjerenjem u smislu relevantnih optičkih svojstava objekta. U znanostima, poput fiziologije i psihologije, boja se proučava u kontekstu ljudskog vizualnog procesa i osjeta u svijesti čovjeka kao optičkog promatrača. Kombinirane intenzitete valnih duljina prisutnih u snopu vidljive svjetlosti određuju svojstvo koje nazivamo bojom. Vidljiva svjetlost je oblik elektromagnetske energije u rasponu valnih duljina od približno 400-700 nm, koju ljudsko oko može detektirati (70). Objekt emitira, reflektira ili prenosi svjetlost iz vanjskog izvora kako bi bio vidljiv. Može se reći da je percepcija boje rezultat fiziološkog odgovora na fizički podražaj. Kolorimetri i spektrofotometri također obrađuju reflektiranu svjetlost s površine objekta, a ti uređaji izračunavaju podatke o svjetlosnom toku u parametre boje koji se mogu koristiti za određivanje nijanse i izračunavanje razlika u bojama. Prijenosni modeli ovih instrumenata mogu se koristiti u kliničkoj stomatologiji za određivanje boje zuba (71). Razvijene su različite metode za kvantificiranje boje i izražavanje boje numerički, čime je omogućena preciznija komunikacija o bojama. Jedan od najpoznatijih, najopsežnijih i najstarijih sustava klasifikacije boja koji se još uvijek koristi svakako je Munsellov sustav boja. Američki slikar Albert Munsell osmislio je tzv. Munsellovo stablo boja, u kojem je svaka boja iz osnovne Munsellove palete klasificirana prema osnovnim atributima koji detaljnije definiraju svaku boju.

Ti atributi su: H = ton (tonalnost, hue, colour), V = svjetlina (luminiscencija, value), C = zasićenost (saturacija, saturation, chroma, intensity). Munsellov sustav boja predstavlja trodimenzionalnu organizaciju boja i može se usporediti s cilindrom. Akromatska os proteže se kroz središte cilindra, pri tome se bijela boja nalazi na vrhu, dok se crna boja nalazi na dnu (Slika 3) (72).



Slika 3. Munsellov sustav boja (preuzeto iz 72)

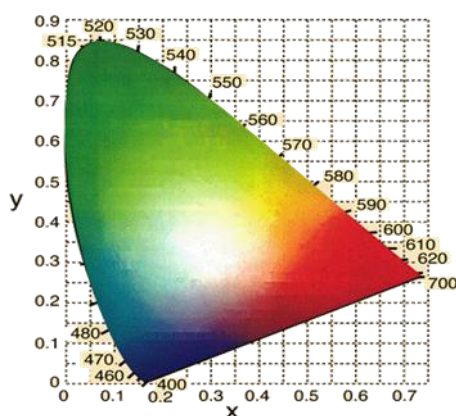
Godine 1905. Munsell je razvio metodu za izražavanje boja koristeći papirnate uzorke boja klasificirane prema nijansi, svjetlini i zasićenosti. Nijansa je atribut boje prema kojem razlikujemo crvenu od zelene, plave, žute itd. Munsell je crvenu, žutu, zelenu, plavu i ljubičastu nazvao glavnim nijansama. Susjedne boje u ovom nizu mogu se miješati kako bi se dobila kontinuirana varijacija od jedne boje do druge. Ovaj niz može se rasporediti u krug jer se vraća na početnu točku. Nakon što je dodao pet međunijansi, ukupno deset nijansi, koristio je inicijale kao simbole za označavanje sektora nijansi (tj. R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P i RP). Krug nijansi podijeljen je na 100 koraka, s nultom točkom na početku crvenog sektora. Svaki korak imao je jednake vizualne promjene u nijansi (Slika 4) (71).



Slika 4. Munsellov krug boja (preuzeto iz 71)

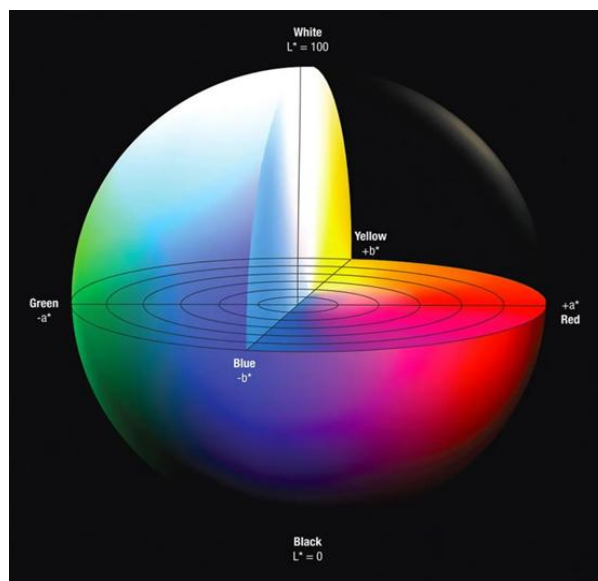
Vrijednost označava svjetlinu boje, a skala vrijednosti kreće se od 0 za crnu do 10 za bijelu. Bijele, crne i sive boje su akromatske i nemaju nijansu. Ova svjetlina može se mjeriti neovisno o nijansi. Kao što prikazuje slika ...gore navedena..., svjetlina raste prema vrhu i opada prema dnu. Step en odstupanja boje od neutralne boje iste vrijednosti naziva se zasićenost. Boje s niskom zasićenosti mogu se opisati kao slabe, dok su boje s visokom zasićenosti jake ili živopisne. Na taj način, sve boje mogu se rasporediti prema tri atributa u trodimenzionalnom prostoru. Neutralne boje postavljene su duž vertikalne linije, ili neutralne osi, s crnom na dnu i bijelom na vrhu. Sve sive boje na ovoj osi raspoređene su između crne i bijele. Nijanse su prikazane pod raznim kutovima oko neutralne osi, pri čemu je skala zasićenosti okomita na os i raste prema van (71). Osjet boje je psihofizički doživljaj koji nastaje kao odgovor na različite podražaje – stimulus, pri čemu se ne uzimaju u obzir samo izvor svjetlosti i karakteristike promatranog objekta, već i psihološki i fiziološki uvjeti promatrača. S obzirom na to da različiti ljudi boje doživljavaju na različite načine, poduzeti su eksperimentalni pokušaji da se standardizira način na koji prosječna osoba vidi boje i da se taj doživljaj brojčano izrazi. 1931. CIE je definirala pojam standardnog promatrača za kolorimetriju na osnovi eksperimenata koje su neovisno jedan o drugome provodili William David Wright 1928. i John Guild 1931. godine (73).

Godine 1931., Međunarodna komisija za osvjetljavanje (CIE) definirala je koncept vrijednosti X, Y i Z, temeljen na trokomponentnoj teoriji boje vida. Ova teorija tvrdi da oko posjeduje receptore za tri osnovne boje: crvenu, zelenu i plavu. Sve ostale boje vide se kao mješavina ovih osnovnih boja. Tristimulusne vrijednosti XYZ i pripadajući Yxy prostor boja, čine temelj današnjih CIE prostora boja. Koncept XYZ tristimulusnih vrijednosti temelji se na trokomponentnoj teoriji boje vida, koja navodi da oko ima receptore za tri osnovne boje (crvenu, zelenu i plavu) i da se sve boje vide kao mješavine tih tri osnovnih boja. XYZ tristimulusne vrijednosti izračunavaju se koristeći funkcije usklađivanja boja standardnog promatrača. Slika prikazuje dijagram kromatičnosti (Slika 5). Kako bi se vizualno prikazao spektar boja koji može percipirati prosječna osoba, CIE je definirala ovaj dvodimenzionalni prostor u kojem su predstavljene sve boje vidljive ljudskom oku. Boje podražaja definiraju se kromatskim koordinatama x i y, koje se izračunavaju na temelju XYZ tristimulusnih vrijednosti (71, 73). Na ovom dijagramu, a^* i b^* označavaju smjerove boja: $+a^*$ je smjer crvene, $-a^*$ je smjer zelene, $+b^*$ je smjer žute, dok $-b^*$ je smjer plave. Središnja točka je akromatska; kako se a^* i b^* vrijednosti povećavaju i točka se pomiče od središta, zasićenje boje raste.



Slika 5. CIE xy dijagram kromatičnosti (preuzeto iz 73)

Uniformni prostor boja je prostor u kojem promjene istih veličina u koordinatama boja odgovaraju promjenama iste veličine u prepoznatljivim vidljivim tonovima boje i zasićenosti boje (74). Godine 1976. CIE je definirala uniformni trodimenzionalni prostor temeljen na CIEXYZ prostoru boja, Munsellovom sustavu boja i teoriji suprotnih parova boja. Munsellove boje definiraju se pomoću tri vrijednosti: ton, kromatičnost i svjetlina. U CIELAB prostoru boje su predstavljene kroz tri osi: dvije kromatske osi a^* i b^* , te akromatsku os L^* (luminance) koja označava svjetlinu — $L^* = 0$ predstavlja crnu, dok $L^* = 100$ predstavlja bijelu. Kromatska os a^* orijentirana je između crvene i zelene boje, pri čemu pozitivna a^* os pokazuje prema crvenom stimulusu, a negativna prema zelenom. Kromatska os b^* orijentira se između žute i plave boje, pri čemu pozitivna b^* os pokazuje prema žutom stimulusu, a negativna prema plavom. Ovi parovi boja, zeleno-crveni i plavo-žuti, odgovaraju teoriji suprotnih procesa koja objašnjava način na koji ljudsko oko percipira boje. Središte kromatskih osi je akromatsko, a pomicanjem od središta raste kromatičnost boja u CIELAB prostoru. CIELAB prostor boja, danas je jedan od najpopularnijih uniformnih prostora za mjerenje boje objekata i široko se koristi u gotovo svim područjima (Slika 6). $L^*a^*b^*$ je trodimenzionalni prostor boja, odnosno sustav koji je rezultat pretvorbe x, y, z vrijednosti koordinatnog sustava u tri nove varijable L^*, a^* i b^* , čime se daje numerički opis položaja boje u tom trodimenzionalnom prostoru. Korekcija je izvedena na sljedeći način: $y = L^*, x$ i $y = a^*,$ te z i $y = b^*.$ Ovaj vrlo praktičan i najčešće korišten sustav boja našao je široku primjenu u brojnim znanstvenim istraživanjima koja se bave bojom i vizualnom percepcijom. Najprihvaćeniji je jer sve tri varijable (ton, zasićenje, svjetlina) omogućuju numerički opis položaja boje unutar trodimenzionalnog prostora boja (71, 74, 75).



Slika 6. CIELab sustav boja (preuzeto iz 71)

Drugi prostor boja, $L^*C^*h^*$ prostor boja, koristi isti dijagram kao $L^*a^*b^*$ prostor boja, ali koristi cilindrične koordinate umjesto pravokutnih. U ovom prostoru boja, L^* označava svjetlinu i jednaka je L^* vrijednosti iz $L^*a^*b^*$ prostora boja, C^* označava intenzitet, a h^* je kut nijanse. Položaj boje opisuje se kroz odnos udaljenosti od varijable L^* , te varijable C^* , dok kut h^* predstavlja kut između njih. Kut vektora h^* (kut boje) određuje ton boje u ravnini koju tvore osi a^* i b^* . Pri tome, 0° označava crveni ton, a 90° žuti ton. Vrijednost intenziteta C^* je 0 u središtu i povećava se s udaljenošću od središta. Kut nijanse h^* definira se kao počevši od $+a^*$ osi i izražava se u stupnjevima: 0 bi bilo $+a^*$ (crvena), 90° bi bilo $+b^*$ (žuta), 180° bi bilo $-a^*$ (zelena), a 270° bi bilo $-b^*$ (plava). Duljina vektora h^* (a^* b^*) označava zasićenost C^* , koja se kreće od 0 do 60 kromatskih jedinica, pri čemu 60 označava potpunu zasićenost tona boje (71, 75). Udaljenosti u CIELAB prostoru boja mogu se koristiti za približno predstavljanje opažene veličine razlika u bojama između boje objekta približno iste veličine, gledanih u identičnim bijelim do srednje sivo obojenim okolnostima, a izražava se parametrom ΔE^* .

Razlika CIELAB koordinata:

$$\Delta L^* = L^*_{1} - L^*_{0} \quad (1)$$

$$\Delta a^* = a^*_{1} - a^*_{0} \quad (2)$$

$$\Delta b^* = b^*_{1} - b^*_{0} \quad (3)$$

$$\text{Razlika kromatičnosti: } \Delta C^*_{ab} = \Delta C^*_{ab,1} - C^*_{ab,0} \quad (4)$$

$$\text{Razlika u kutu tona: } \Delta h_{ab} = h_{ab,1} - h_{ab,0} \quad (5)$$

Ukupna razlika:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

ili u $L^*C^*h^*$ obliku:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*_{ab})^2 + (\Delta C^*_{ab})^2 + (\Delta H^*_{ab})^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$\Delta H^*_{ab} = 2(C^*_{ab,1} - C^*_{ab,0})^{1/2} \sin(\Delta h_{ab} / 2) \quad (76) \quad (8)$$

CIE je nastavila poboljšavati formule za ukupnu razliku boja da bi se dobile preciznije vrijednosti te je definirala novu formulu : CIEDE2000.

$$\Delta E_{00} = [(\Delta L' / k_L S_L) + (\Delta C' / k_C S_C) + (\Delta H' / k_H S_H) + R_T (\Delta C' / k_C S_C) (\Delta H' / k_H S_H)]^{1/2} \quad (9)$$

$$\Delta L' = L'_1 - L'_0 \quad (10)$$

$$\Delta C' = C'_1 - C'_0 \quad (11)$$

$$\Delta H' = 2(C'_0 - C'_1)^{1/2} \sin(\Delta h' / 2) \quad (12)$$

$$S_C = 1 + 0,045 C' \quad (13)$$

$$S_H = 1 + 0,015 C' T \quad (14)$$

$$S_L = 1 + 0,015 (L' - 50)^2 / \sqrt{20 + (L' - 50)^2} \quad (15)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C \quad (16)$$

$\Delta L'$, $\Delta C'$ i $\Delta H'$ su razlike u svjetlini, boji i nijansi između dva uspoređena primjerka. S_L , S_C i S_H su funkcije za komponente svjetline, boje i nijanse. R_T je funkcija rotacije koja specificira interakciju između razlike u boji i nijansi u plavom rasponu. Eksperimentalno promatranje i materijalne varijable mogu imati parametrijske učinke koji utječu na rezultate vizualne razlike u boji (CIE, 1993.). Parametarski faktori k_L , k_C i k_H mogu se koristiti za korekciju ovih učinaka. U referentnim uvjetima parametarski faktori imaju pripisane vrijednosti jedinice i to ne utječe na ukupnu razliku u boji. Preporučena vrijednost parametarskih faktora je 1 (77). U istraživanjima koja se bave bojom u dentalnoj medicini ΔE_{00} jednadžba se pokazala pouzdanijom, jer ima bolju korelaciju s ljudskim opažanjem usporedbi s CIELAB formulom (78). Za praktičnu primjenu potrebno je utvrditi granice vizualne percepcije razlika u boji. Tako neki pojednici uočavaju već malu razliku, dok drugima nije uočljiva veća vrijednost u razlici boje. Stoga su ΔE_{00} interpretacije napravljene u smislu opažljivih i prihvatljivih pragova. Prema tome, CIEDE2000 prag percepcije je 0,8, a prag prihvatanja je 1,8. Ove vrijednosti uključene su u ISO/TR 28642:201623 i mogu poslužiti kao mjera za procjenu kvalitete i pomoći pri odabiru estetskih stomatoloških materijala, te njihovih svojstava u kliničkoj praksi te u interpretaciji vizualnih i instrumentalnih opažanja, kako u stomatološkim istraživanjima, tako i u budućim procesima standardizacije (77, 79).

1.4. Određivanje boje

Subjektivni doživljaj boje može se mijenjati ovisno o različitim uvjetima promatranja, poput izvora svjetlosti i boje pozadine. Dokazano je da određivanje boje također može biti pod utjecajem pojedinca, poput spola, dobi, iskustva i umora. Metode za procjenu odnosno mjerenje boje dentalnih struktura, uključuju vizualnu subjektivnu procjenu i instrumentalnu procjenu. Vizualna subjektivna procjena temelji se na tome da kliničar jednostavno uspoređuje pacijentove zube s dostupnim vodičem za nijanse, poput Vita classical, VITA 3D - MASTER (Slika 7a i 7b) (80, 81).



Slika 7a. Ključ boja VITA classical



Slika 7b. Ključ boja VITA 3D – MASTER

(preuzeto iz 82)

Instrumenti za usklađivanje boje zuba uvedeni su na tržište kako bi smanjili ili prevladali nesavršenosti i neusklađenosti tradicionalnih metoda procjene boja. Digitalne metode omogućuju objektivno mjerenje, ali zahtijevaju opremu poput spektrofotometara. Spektrofotometri su među najpreciznijim, najkorisnijim i najfleksibilnijim instrumentima za određivanje boje u stomatologiji. Mjere količinu svjetlosne energije reflektirane s objekta u intervalima od 1-25 nm duž vidljivog spektra. Spektrofotometar se sastoji od izvora optičkog zračenja, sredstva za disperziju svjetlosti, optičkog sustava za mjerenje, detektora i sredstva za pretvorbu dobivene svjetlosti u signal koji se može analizirati. Općenito, izvori svjetlosti se difrakturiraju. Koriste se različiti izvori svjetlosti (npr. tungsten-halogen žarulje ili ksenonske bljeskalice), filtrirani ili nefiltrirani, koji pružaju svjetlost s potrebnom spektralnom distribucijom.

Nekoliko valnih duljina prolazi kroz ulaznu pukotinu i testni uzorak. Različite valne duljine svjetlosti selektivno apsorbiraju uzorak. Svjetlost zatim prolazi kroz drugu pukotinu, zvanu izlaznu pukotinu, i udara u detektor. Detektor pretvara intenzitet svjetlosti na određenoj valnoj duljini u električni signal, koji se zatim pojačava i prikazuje na ekranu ili iscrtava na grafikonu. U slučaju neprozirnog uzorka, mjeri se refleksija uzorka, obično u rasponu od 380 do 760 nm, na diskretnim valnim duljinama. Svjetlost se zatim razdvaja na pojedinačne valne duljine, bilo prije bilo nakon što padne na uzorak, pomoću monokromatora (prizma, difrakcijska rešetka ili interferencijski filter). Pri mjerenju neprozirnog uzorka koristeći refleksijski spektrofotometar, treba uzeti u obzir i difuznu i spekularnu refleksiju, a koriste se različite geometrije osvjetljenja i gledanja. Detektori koji se obično koriste su fotodiodne (83). Podaci dobiveni spektrofotometrima moraju se obraditi i pretvoriti u oblik koji je koristan za stomatološke stručnjake. Mjerenja dobivena ovim instrumentima često su usklađena s vodičima za boje u stomatologiji i konvertirana u ekvivalentne tablice boja. U usporedbi s promatranjima ljudskim okom ili konvencionalnim tehnikama, utvrđeno je da spektrofotometri nude 33% veću preciznost i objektivnije usklađivanje u 93,3% slučajeva. Brojni istraživači preporučuju da su vizualne metode usklađivanja boja zajedno s instrumentalnim tehnikama vrijednije kada se koriste u kombinaciji, jer se međusobno nadopunjuju (80, 81, 84, 85).

Na tržištu su dostupni razni spektrofotometri:

Crystaleye (Olympus, Tokyo, Japan) kombinira prednosti tradicionalnog spektrofotometra s digitalnom fotografijom (Slika 8). Kroz razvoj optičke i obradne tehnologije slika, ovaj proizvod omogućava stomatologu da preciznije i jednostavnije uskladi boju zuba u odnosu na tradicionalni spektrofotometar. Značajna prednost ovog sustava je što "virtualne tablice boja" u računarskoj bazi podataka mogu biti međusobno povezane i vizualno superponirane na sliku prirodnog zuba, čime se tehničaru omogućava da vizualizira odgovarajuće tablice boja. Digitalna slika proizvedena od strane Crystaleye koristi izvor svjetlosti s 7 LED traka, što rezultira preciznijim prikazom boje od konvencionalnih sustava koji se koriste s digitalnim kamerama. Štoviše, slika koju proizvodi Crystaleye snima se unutar usne šupljine, te je stoga oslobođena vanjskog svjetla koje može uzrokovati nesklad (81).



Slika 8. Spektrofotometar Crystaleye (Olympus, Tokyo, Japan) (preuzeto iz 86)

Vita Easyshade Lite (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Njemačka) je bežični, mali, prijenosni, isplativo, baterijski napajan spektrofotometar kontaktnog tipa koji pruža dovoljno informacija o nijansama za pomoć u procesu analize boje (Slika 9). Easyshade Lite omogućuje različite načine mjerenja: način za pojedinačni zub, način za područje zuba (cervikalne, srednje i incizalne nijanse), verifikaciju boje restauracije (uključujući usporedbu svjetline, kromatske i tonalne vrijednosti) i način za tablice boja (praksa/trening) (81).



Slika 9. VITA Easyshade Lite (preuzeto iz 87)

SpectroShade Micro II (MHT Optic Research, ITALIJA) je imidžing spektrofotometar koji koristi kombinaciju digitalne kamere i LED spektrofotometra (Slika 10). Ima unutrašnji računar s analitičkim softverom. Sustav za usmjeravanje pozicije zuba, prikazan na LCD ekranu osjetljivom na dodir, koristi se tijekom mjerenja boje. Slike i spektroskopski podaci mogu se pohraniti u unutrašnju memoriju i prenijeti na računar (81).



Slika 10. SpectroShade Micro

Uređaji za mjerenje potpune površine zuba pružaju kartu boja za izradu izravnih ili neizravnih restauracija. Ovi sustavi omogućuju virtualno preklapanje nijanse s predloženom tablicom boja na digitalnoj slici zuba na ekranu računala, koja služi kao vizualna referenca za procjenu od strane doktora dentalne medicine i/ili tehničara. Spomenuti spektrofotometri, poput Crystaleye i SpectroShade, omogućuju označavanje nijanse na temelju tablica boja i odgovarajuće ΔE^* vrijednosti usporedbe s vrijednostima tablica boja pohranjenim u memoriji. Međutim, ove karte boja su dvodimenzionalne i ne uzimaju nužno u obzir oblik, teksturu, debljinu restauracije, tip nosača i različite osnovne materijale (metal ili keramika). Uređaji za mjerenje ograničenih područja, mjere površine zuba promjera 3–5 mm. Stoga je potrebno uzeti nekoliko područja zuba kako bi se dobila reprezentativna procjena nijanse zuba. Kao minimum, potrebno je

procijeniti i zabilježiti mjerenja nekoliko područja zuba (ukupno 3 mjerenja). Utvrđeno je da smanjenje izmjerene površine zuba pomoću spektrofotometra rezultira nižim CIE $L^*a^*b^*$ vrijednostima. Spomenuti instrumenti i tehnologije prvenstveno su namijenjeni analizi boje, međutim, ove informacije same po sebi mogu biti nedovoljne za tehničara da adekvatno interpretira informacije o boji. Digitalne fotografije važan su dodatak za laboratorijskog tehničara i, zajedno s kartom boja ili "mapi boja", trebale bi biti dovoljna komunikacija za izradu prihvatljive restauracije (81). Mnogo faktora može utjecati na percepciju boje; iskorištavanjem današnje tehnologije za usklađivanje boja, subjektivnost u ocjeni boje može se minimizirati, a točna dijagnoza nijanse restauracije lakše se komunicira. Postoje uređaji za mjerenje potpune površine zuba i za mjerenje ograničenih područja površine zuba, koji ili mjere cijelu površinu zuba pružajući "kartu boje" ili manji promjer (3–5 mm) na površini zuba. Svi ovi instrumenti korisni su dodatni alati u analizi boje za izradu restauracija, u komunikaciji, reprodukciji i verifikaciji boje. Vjerojatno će novi, pristupačni, visokokvalitetni instrumenti i tehnologija za usklađivanje boja doprinijeti uspješnom radu s bojama i estetskom stomatologijom.

2. CILJEVI I HIPOTEZE

2.1. Ciljevi istraživanja

Cilj ovog in vitro istraživanja bio je evaluirati estetska svojstva različitih monolitnih monokromatskih CAD/CAM materijala nakon izlaganja termocikliranju i obojenim tekućinama. Instrumentalnim mjerenjem $L^*C^*h^*$ vrijednosti određene su promjene u boji (ΔE_{00}) i translucenciji (ΔTP), s ciljem procjene optičke stabilnosti i strukturne postojanosti svakog ispitivanog materijala.

2.2. Hipoteze istraživanja

Postavljene su sljedeće nulte hipoteze:

1. Nema razlike u stabilnosti boje različitih estetskih monolitnih monokromatskih CAD/CAM materijala
2. Boja CAD/CAM hibridnih materijala je jednako stabilna kao boja CAD/CAM litij - disilikatne keramike
3. Termocikliranje ne utječe na promjenu boje različitih estetskih monolitnih monokromatskih CAD/CAM materijala
4. Nema razlike u potencijalu bojanja između različitih obojenih tekućina

Postavljene su sljedeće radne hipoteze:

1. Ima razlike u stabilnosti boje različitih estetskih monolitnih monokromatskih CAD/CAM materijala
2. Ima razlike u stabilnosti boje CAD/CAM hibridnih materijala i CAD/CAM litij – disilikatne keramike
3. Termocikliranje ima utjecaj na promjenu boje različitih estetskih monolitnih monokromatskih CAD/CAM materijala
4. Ima razlike u potencijalu bojanja između različitih obojenih tekućina

3. MATERIJALI I POSTUPCI

3.1. Priprema uzoraka

Materijali izabrani za ovo istraživanje uključuju CAD/CAM keramiku infiltriranu polimerom, CAD/CAM nanokeramiku, CAD/CAM kompozit, CAD/CAM polimer te CAD/CAM litij - disilikatnu keramiku. Izabrana boja svih materijala je A2 odnosno 2M2, koja je prema proizvođaču ekvivalent boji A2.

- CAD/CAM keramika infiltrirana polimerom (2M2 - HT) - VITA ENAMIC (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany)
- CAD/CAM nanokeramika (A2 - HT) - GC CERASMART 270 (GC Europe N.V., Leuven, Belgium)
- CAD/CAM kompozit (A2 – HT) - TETRIC CAD (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)
- CAD/CAM polimer (A2 - LT) - TELIO CAD (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)
- CAD/CAM litij - disilikatna keramika (A2 – HT) - IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)

Pripremljeno je 40 uzoraka od svakog odabranog estetskog monolitnog monokromatskog CAD/CAM materijala, dok je ukupan broj uzoraka 200. CAD/CAM blokovi rezani su na uzorke veličine 12 x 14 x 1mm te 12 x 14 x 2mm rezalicom uz vodeno hlađenje (Isomet 1000, Buehler, Lake Bluff, Illinois, USA) (Slika 11. i Slika 12.).



Slika 11. Rezalica za pripremu uzoraka



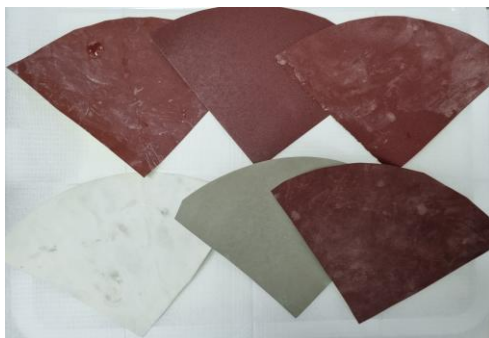
Slika 12. Postupak rezanja CAD/CAM bloka

Nakon rezanja na željenu veličinu, uzorci CAD/CAM staklokeramike kristalizirani su u peći (Programat EP3010, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) (Slika 13) na 850°C.

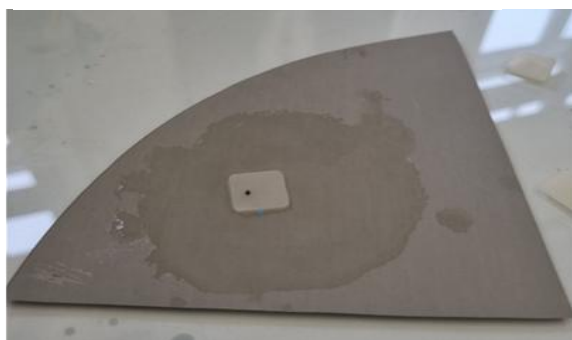


Slika 13. Peć za pečenje keramike

Za postizanje homogene površine svih uzoraka, gornja i donja strana svakog uzorka polirane su 3 minute pomoću slijeda silikonskih karbid papira P180, P280, P800, P1500 i P4000 (Sia Abrasives, Frauenfeld, Switzerland) (Slika 14 a i Slika 14 b), čija se površina prethodno navlažila vodom. Slijedilo je završno poliranje gornje i donje površine svakog uzorka pomoću aluminij-oksida suspenzije (0.05 mikrona) (MasterPrep; Buehler, Lake Bluff, Illinois, USA) i vrlo finog polirnog filca (MasterTex; Buehler, Lake Bluff, Illinois, USA). Po završetku obrade površine uzoraka, oni su isprani mlazom vode i osušeni papirnatim ubrusom.



Slika 14a. Silikonski karbid papiri P180, P280, P800, P1500, P4000 i polirni filc



Slika 14b. P4000 silikonski karbid papir

Kao obojene tekućine za uranjanje korištene su instant kava (Nescafe Gold Crema, Nestle France, Noisiel, Francuska), crni čaj (Franck d.d., Zagreb, Hrvatska) i crveno vino (Karizma 2018, Petrač vinarija, Krapinske Toplice, Hrvatska) dok je destilirana voda korištena kao kontrolna tekućina (Slika 15). Koncentracija instant kave i crnog čaja određena je prema uputama proizvođača, i pri tome je korištena voda iz slavine. 10 grama instant kave pripremljeno je s 180 mL nekipućom vodom (90°C). Za pripremu crnog čaja jedna filter vrećica crnog čaja (1,5 grama) prelivena je s 200 mL nekipuće vode (90°C) i ostavljena da odstoji 5 minuta. Nakon isteka vremena, filter vrećica crnog čaja je izvađena iz vode. Od pripremljenih napitaka (instant kava i crni čaj) te nakon otvaranja boce crvenog vina, odvojeno je 50 mL tekućine, koje su s uzorcima, stavljene u različite petrijeve zdjele (Slika 16).



Slika 15. Tekućine za uranjanje uzoraka



Slika 16. Petrijeve zdjele s uzorcima i tekućinama

3.2. Postupak određivanje boje, termocikliranja i izlaganja uzoraka obojenim tekućinama

Postupak termocikliranja proveo se na Stomatološkom Fakultetu u Zagrebu u istraživačkom laboratoriju na uređaju za termocikliranje (THE-1200; SD Mechatronik, Feldkirchen-Westerham, Germany) (Slika 17). Termocikliralo se u 5000 ciklusa na temperaturama od 5°C i 55°C stupnjeva, pri čemu je vrijeme izlaganja iznosilo 20 sekundi a vrijeme prijenosa 5 sekundi. Za postupak termocikliranja koristilo se ukupno 200 uzoraka odabranih estetskih monokromatskih CAD/CAM materijala. Uzorci pojedinog materijala zamotani su u gaze te je svaki materijal označen određenom bojom elastične gumice (Slika 18). Nakon termocikliranja

ti isti uzorci bili su izloženi različitim obojenim tekućinama, odnosno crvenom vinu, instant kavi i crnom čaju dok je destilirana voda korištena kao kontrolna skupina.



Slika 17. Uređaj za termocikliranje



Slika 18. Pripremljeni uzorci za postupak termocikliranja

U četiri različitih petrijevih zdjela, a ukupno njih 20, dodano je po 50 mL tekućine (instant kava, crni čaj, crveno vino i destilirana voda) u koje su uzorci različitih monokromatskih CAD/CAM materijala uronjeni, a nakon toga stavljeni u inkubator (Mettmert 100-800, Mettmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Germany) (Slika 19) na 37°C stupnjeva tijekom četiri tjedna. Zbog sprječavanja razvoja bakterija i gljivica tekućine u zdjelicama biti će zamijenjene svaki drugi dan.



Slika 19. Inkubator

Boja i translucencija uzoraka određena je pomoću spektrofotometra (Spectro Shade, Handy Dental, MHT, Verona, Italy) (Slika 20) unutar CIELAB prostora, određenog od strane međunarodne komisije za osvjetljenje (HRN EN ISO/CIE 11664-4:2019).

Karakteristike spektrofotometra su sljedeće:

- spektralni senzor: CCD
- spektralni opseg mjerenja: 410 – 680 nm
- brzina mjerenja: 1s po mjerenju
- ponovljivost: $\Delta E < 0,5$
- interno instrumentsko slaganje: $\Delta E < 1,0$
- mjerna geometrija: 45°/ 0°



Slika 20. Spektrofotometar

Prije svakog mjerenja boje uzorka, spektrofotometar je kalibriran prema uputama proizvođača, odnosno pomoću bijele i zelene keramičke pločice, koje se nalaze u postolju spektrofotometra (Slika 21).



Slika 21. Kalibracijske ploče spektrofotometra

Mjerenja provedena su pod utjecajem D 65 izvora svjetlosti (6503 K) prema standardu definiranom od strane CIE (HRN EN ISO11664-2:2011). Izabrani spektrofotometar ima kontrolu kuta, koja kontrolira izvođenje mjerenja u pravom položaju. Nakon postavljanja uzorka na bijelu odnosno crnu pozadinu, spektrofotometar se pomoću nastavka (kučišta) pozicionirao iznad uzorka, koji je pritom obuhvaćao cijeli uzorak. Na ekranu uređaja zatim je bila vidljiva cijela površina uzorka (Slika 22), te pomoću zelenog križića koji se pojavio na ekranu, koji je označio pravilan položaj uređaja, te je isti bio spreman za mjerenje boje. Udaljenost spektrofotometra od uzorka pri tome iznosila je 3,5 cm.



Slika 22. Prikaz uzorka na ekranu spektrofotometra

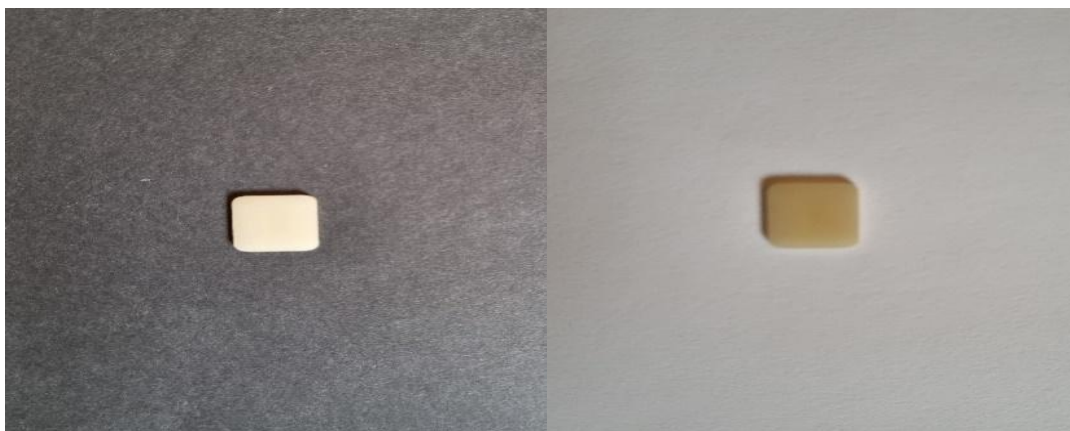
Spektrofotometrijsko mjerenje vrijednosti boje i translucencije uzoraka izražavalo se u tri parametra - $L^* C^* h^*$ vrijednostima, koji su očitani s ekrana uređaja, odnosno nakon prijenosa podataka na računalo, iz softvera namijenjenog za spektrofotometar (Slika 23).



Slika 23. Očitavanje $L^*C^*h^*$ vrijednosti iz softvera

Određivanje boje i translucencije uzoraka sa spektrofotometrom provodilo se:

- na početku istraživanja (prije termocikliranja i izlaganje obojenim tekućinama)
- nakon termocikliranja i tjedan dana izlaganja obojenim tekućinama
- nakon termocikliranja i dva tjedna izlaganja obojenim tekućinama
- nakon termocikliranja i tri tjedna izlaganja obojenim tekućinama
- nakon termocikliranja i četiri tjedna izlaganja obojenim tekućinama
- na bijeloj i crnoj pozadini kod svakog mjerenja (prije termocikliranja i izlaganja obojenim tekućinama, nakon tjedan dana, dva tjedna, tri tjedna te četiri tjedna izlaganja obojenim tekućinama)(Slika 24a i Slika 24b).



Slika 24a. Uzorak na crnoj pozadini

Slika 24b. Uzorak na bijeloj pozadini

Na temelju dobivenih $L^*C^*h^*$ vrijednosti se izračunala promjena boje (ΔE_{00}) svakog uzorka pomoću CIELAB formule (HRN EN ISO11664-6:2016).

$$\Delta E_{00} = [(\Delta L' / k_L S_L) + (\Delta C' / k_C S_C) + (\Delta H' / k_H S_H) + R_T (\Delta C' / k_C S_C) (\Delta H' / k_H S_H)]^{1/2} \quad (17)$$

$$\Delta L' = L'_1 - L'_0 \quad (18)$$

$$\Delta C' = C'_1 - C'_0 \quad (19)$$

$$\Delta H' = 2(C'_0 - C'_1)^{1/2} \sin (\Delta h' / 2) \quad (20)$$

$$S_C = 1 + 0,045 C' \quad (21)$$

$$S_H = 1 + 0,015 C' T \quad (22)$$

$$S_L = 1 + 0,015 (L'-50)^2 / \sqrt{20+(L'-50)^2} \quad (23)$$

$$R_T = -\sin (2\Delta\theta)R_C \quad (24)$$

$\Delta L'$, $\Delta C'$ i $\Delta H'$ su razlike u svjetlini, boji i nijansi između dva uspoređena primjerka. S_L , S_C i S_H su funkcije za komponente svjetline, boje i nijanse. R_T je funkcija rotacije koja specificira interakciju između razlike u boji i nijansi u plavom rasponu. Eksperimentalno promatranje i

materijalne varijable mogu imati parametrijske učinke koji utječu na rezultate vizualne razlike u boji (CIE, 1993.). Parametarski faktori k_L , k_C i k_H mogu se koristiti za korekciju ovih učinaka. U referentnim uvjetima parametarski faktori imaju pripisane vrijednosti jedinice i to ne utječe na ukupnu razliku u boji. Preporučena vrijednost parametarskih faktora je 1. Kao granicu prihvatljivosti (AT) bit će uzeta vrijednost $\Delta E_{00} = 1,8$. Dok će granica vidljivosti (PT) iznositi $\Delta E_{00} = 0,8$.

Numerička vrijednost translucencije se također temelji na CIELAB sustavu te će parametar translucencije biti izračunat prema sljedećoj formuli:

$$TP_{00} = [(L'_B - L'_W / k_L S_L)^2 + (C'_B - C'_W / k_C S_C)^2 + (H'_B - H'_W / k_H S_H)^2 + R_T (C'_B - C'_W / k_C S_C) (H'_B - H'_W / k_H S_H)]^{1/2} \quad (25)$$

Određivanje promjene translucencije, prije i poslije termocikliranja odnosno izlaganja obojenim tekućinama, provodit će se prema sljedećoj formuli:

$$\Delta TP = TP_0 - TP_1 \quad (26)$$

Kao granica prihvatljivosti (AT) bit će uzeta vrijednost $\Delta TP = 2,6$. Dok će granica vidljivosti (PT) iznositi $\Delta TP = 0,6$.

3.3. Statistička analiza

Veličina uzorka izračunata je za usporedbu promjene boje između 5 vrsta materijala, 4 vrste tekućina i 2 debljine uzoraka (trofaktorska ANOVA). Značajnost testa postavljena je na 0,8, a razina značajnosti na 0,05. Veličina uzorka odabrana je kako bi se mogla demonstrirati srednja veličina učinka (Cohenov $f = 0,25$). Za faktor debljine uzorka potrebna veličina uzorka je 129; za faktor materijala potrebna ukupna veličina uzorka je 180, a za faktor tekućine potrebna veličina uzorka je 197. Kako je broj grupa 40, ukupna veličina uzorka iznosi 200 (5 po grupi). Veličina uzorka izračunata je korištenjem G*Power 3.1.9.7. Dobiveni rezultati statistički su analizirani. Srednja vrijednost i standardna devijacija koriste se za opis promjene boje za različite materijale, otopine za bojenje, pozadine, debljinu uzoraka i stupnjeve starenja. Podudaranje podataka s normalnom raspodjelom testirano je pomoću Shapiro–Wilk testa s Bonferroni korekcijom. Mješoviti faktorski ANOVA model korišten je za testiranje razlika u

promjeni boje između različitih materijala, otopina za bojenje, pozadina, debljine uzoraka i stupnjeva starenja. Promjena boje na 5 različitih stupnjeva starenja i za različite pozadine mjerena je na istim uzorcima i predstavljaju faktore unutar mješovitog ANOVA dizajna. Post hoc usporedbe provedene su korištenjem Tukeyjeva testa. Analize su provedene koristeći SAS statistički paket na Windows platformi. Svi testovi provedeni su s razinom značajnosti $\alpha = 0,05$.

4. REZULTATI

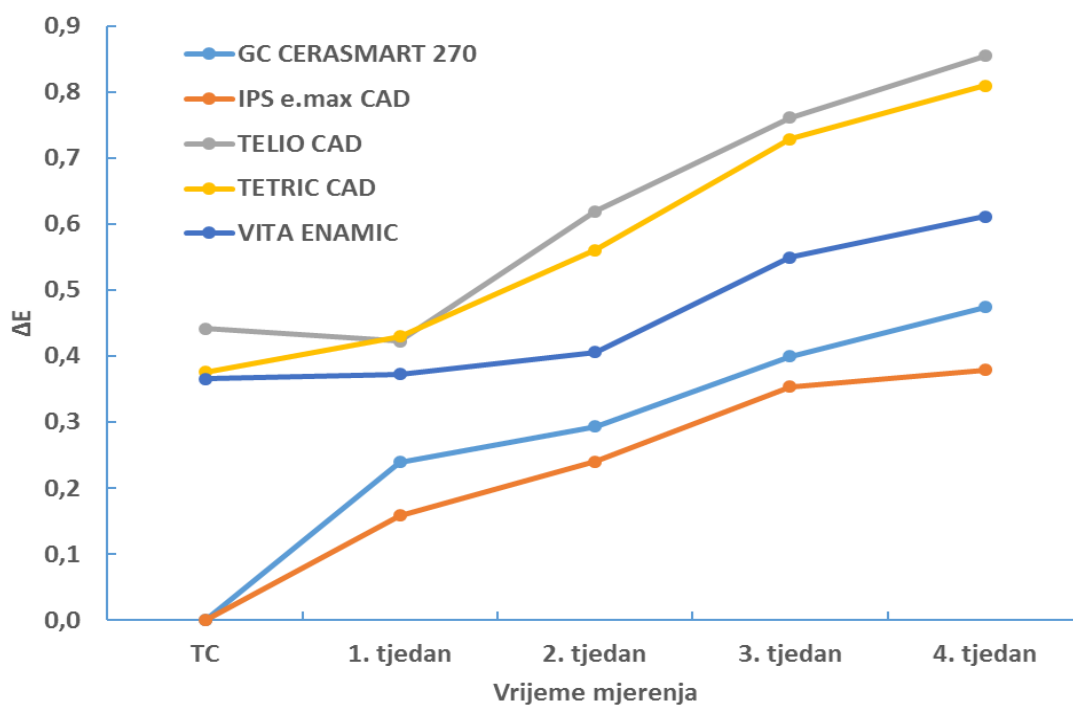
Za opis promjene boje i promjene translucencije za različite materijale, tekućine, podloge i debljine prikazane su srednja vrijednost i standardna pogreška. Za usporedbu promjene boje između različitih materijala, tekućina, debljina uzorka, boje pozadine i vremena mjerenja te usporedbu promjene translucencije između različitih materijala, tekućina, debljina uzorka i vremena mjerenja korišten je miješani faktorski ANOVA model. Promjena boje i promjena translucencije u 5 različitih vremena te promjena boje za različite boje pozadine mjerene su na istim uzorcima. Za 'post-hoc' višestruku usporedbu korišten je Tukeyev test. Za testiranje podudaranja podataka s normalnom distribucijom korišten je Shapiro-Wilksov test uz Bonferronijevu korekciju.

Analiza je napravljena pomoću statističkog paketa SAS na Windows platformi. Svi testovi su rađeni uz razinu značajnosti $\alpha=0,05$.

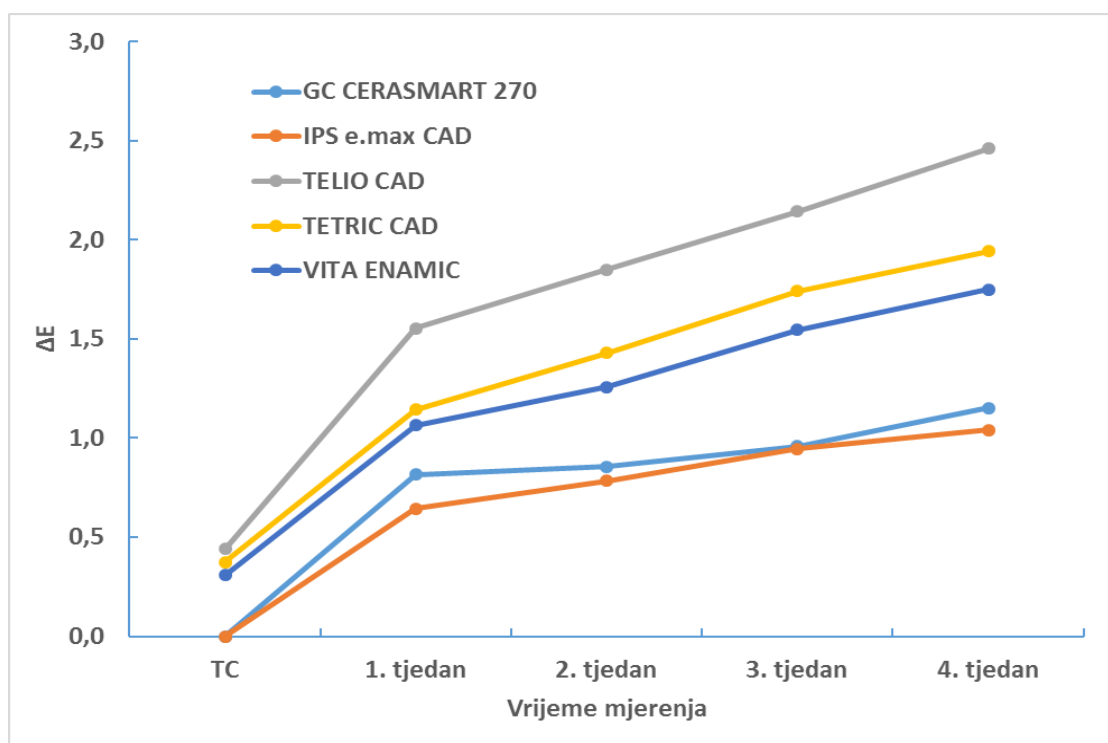
Deskriptivna statistika (srednja vrijednost i standardna devijacija) za 5 materijala i 4 tekućine za vrijednosti izmjerene neposredno nakon termocikliranja, nakon 1, 2, 3 i 4 tjedna prikazana je u tablicama 2 do 5, te slikama 25a, 25b, 25c, 25d do 27a, 27b, 27c, 27d. Posebno su prikazani rezultati za promjenu boje na bijeloj i crnoj pozadini te za debljinu uzorka od 1 mm i 2 mm.

Tablica 2. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1mm – bijela pozadina

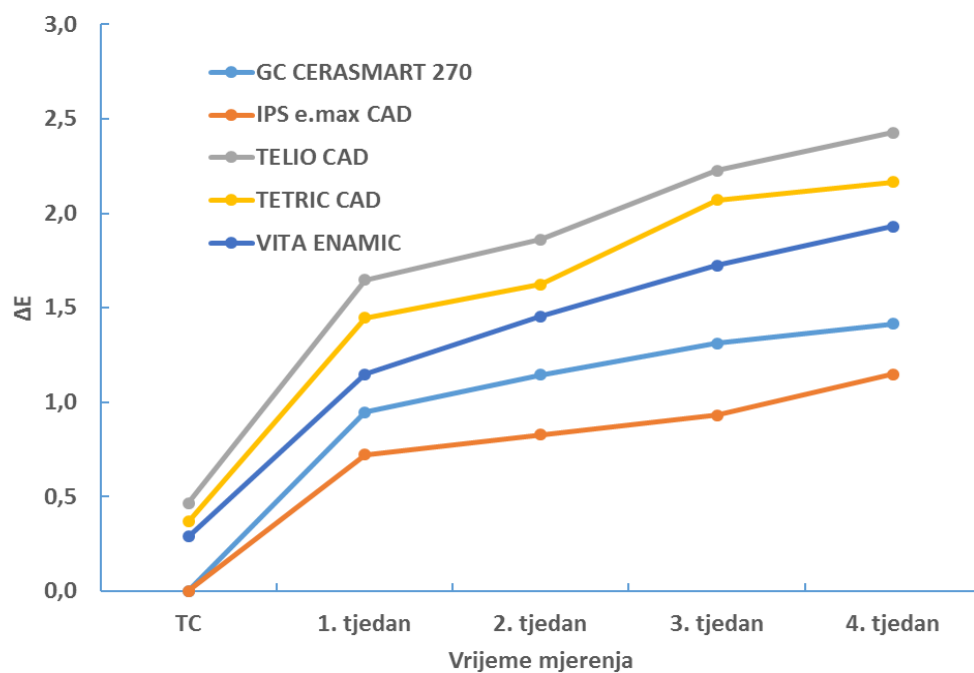
Materijal	Tekućina	TC		1. tjedan		2. tjedan		3. tjedan		4. tjedan	
		Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.
GC CERASMART 270	Destilirana voda	0,00	0,00	0,24	0,03	0,29	0,01	0,40	0,01	0,47	0,02
	Crni čaj	0,00	0,00	0,82	0,07	0,86	0,07	0,96	0,03	1,15	0,04
	Kava	0,00	0,00	0,95	0,05	1,15	0,13	1,31	0,07	1,41	0,07
	Crveno vino	0,00	0,00	1,25	0,03	1,56	0,01	1,84	0,04	2,29	0,02
IPS e.max CAD	Destilirana voda	0,00	0,00	0,16	0,03	0,24	0,03	0,35	0,03	0,38	0,06
	Crni čaj	0,00	0,00	0,64	0,04	0,78	0,00	0,94	0,04	1,04	0,03
	Kava	0,00	0,00	0,72	0,03	0,83	0,02	0,93	0,04	1,15	0,01
	Crveno vino	0,00	0,00	1,13	0,01	1,40	0,04	1,72	0,07	1,92	0,07
TELIO CAD	Destilirana voda	0,44	0,03	0,42	0,02	0,62	0,01	0,76	0,03	0,86	0,06
	Crni čaj	0,44	0,02	1,55	0,02	1,85	0,03	2,14	0,03	2,46	0,04
	Kava	0,46	0,03	1,65	0,02	1,86	0,04	2,23	0,04	2,43	0,03
	Crveno vino	0,43	0,02	1,90	0,02	2,23	0,05	2,66	0,03	3,06	0,03
TETRIC CAD	Destilirana voda	0,38	0,03	0,43	0,02	0,56	0,02	0,73	0,04	0,81	0,06
	Crni čaj	0,37	0,03	1,14	0,04	1,43	0,01	1,74	0,03	1,94	0,03
	Kava	0,37	0,03	1,45	0,04	1,62	0,02	2,07	0,01	2,16	0,03
	Crveno vino	0,37	0,05	1,74	0,03	2,05	0,03	2,42	0,01	2,65	0,03
VITA ENAMIC	Destilirana voda	0,37	0,01	0,37	0,01	0,41	0,01	0,55	0,02	0,61	0,02
	Crni čaj	0,31	0,04	1,07	0,02	1,26	0,02	1,55	0,03	1,75	0,02
	Kava	0,29	0,07	1,15	0,03	1,45	0,03	1,72	0,02	1,93	0,03
	Crveno vino	0,34	0,03	1,46	0,02	1,75	0,03	2,04	0,03	2,46	0,03



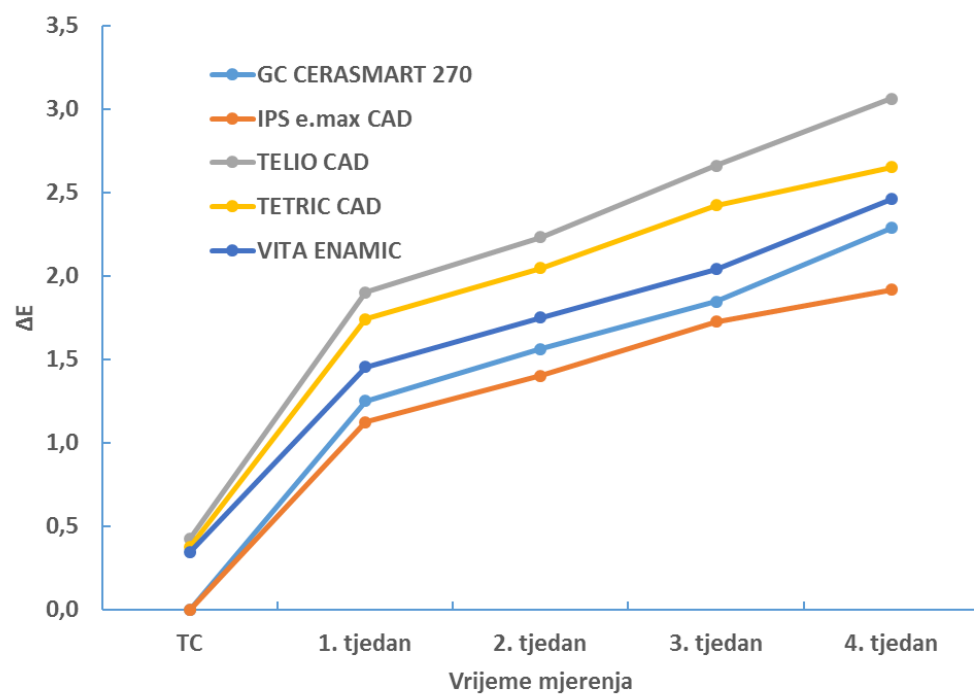
Slika 25a. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - bijela pozadina – Destilirana voda



Slika 25b. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - bijela pozadina – Crni čaj



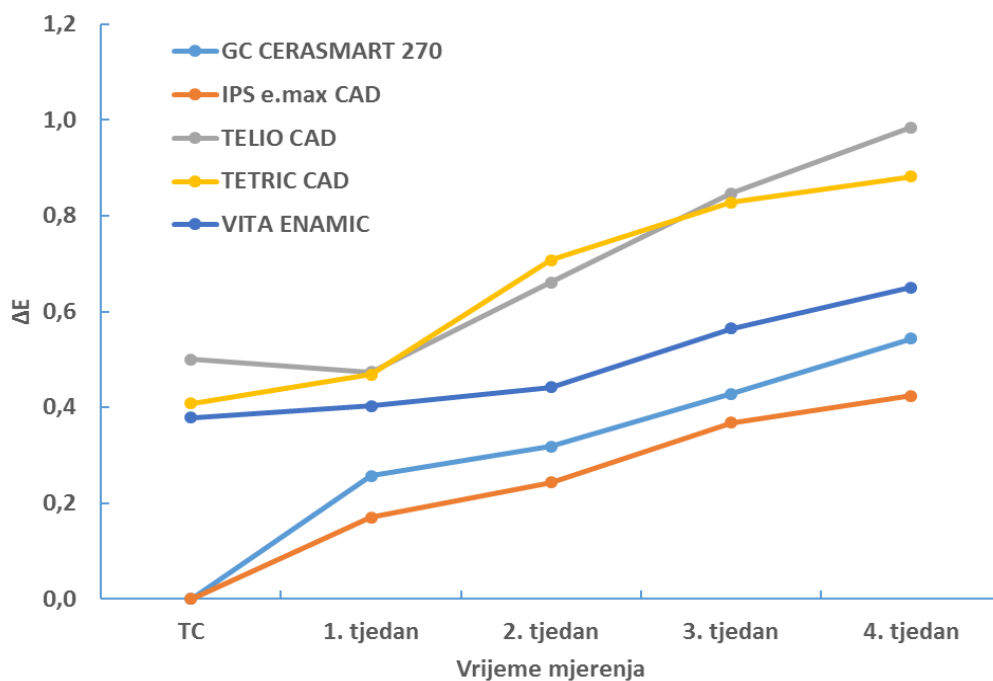
Slika 25c. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - bijela pozadina – Instant kava

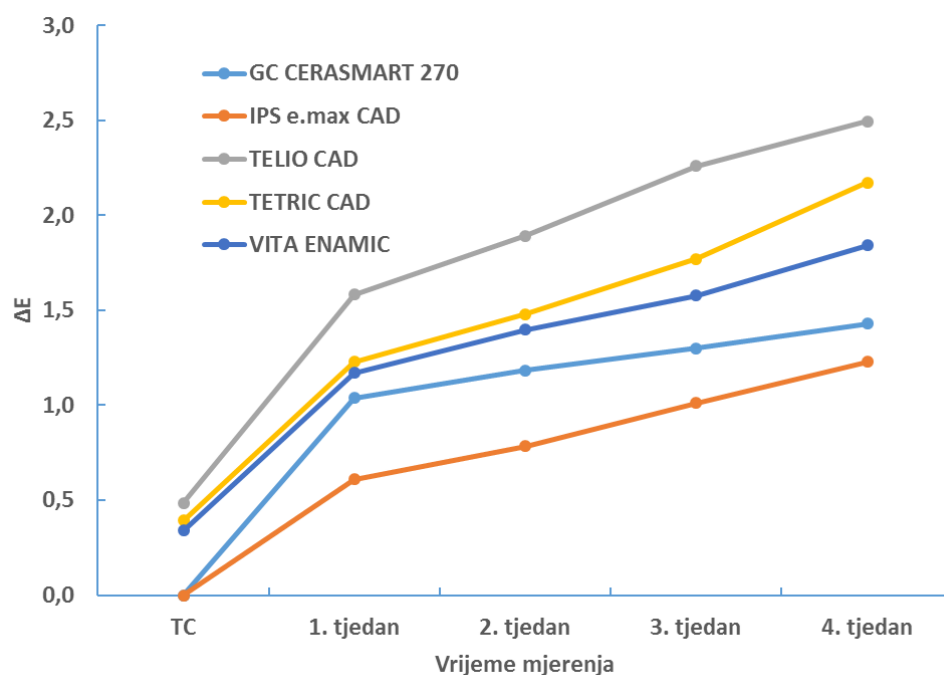


Slika 25d. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - bijela pozadina – Crveno vino

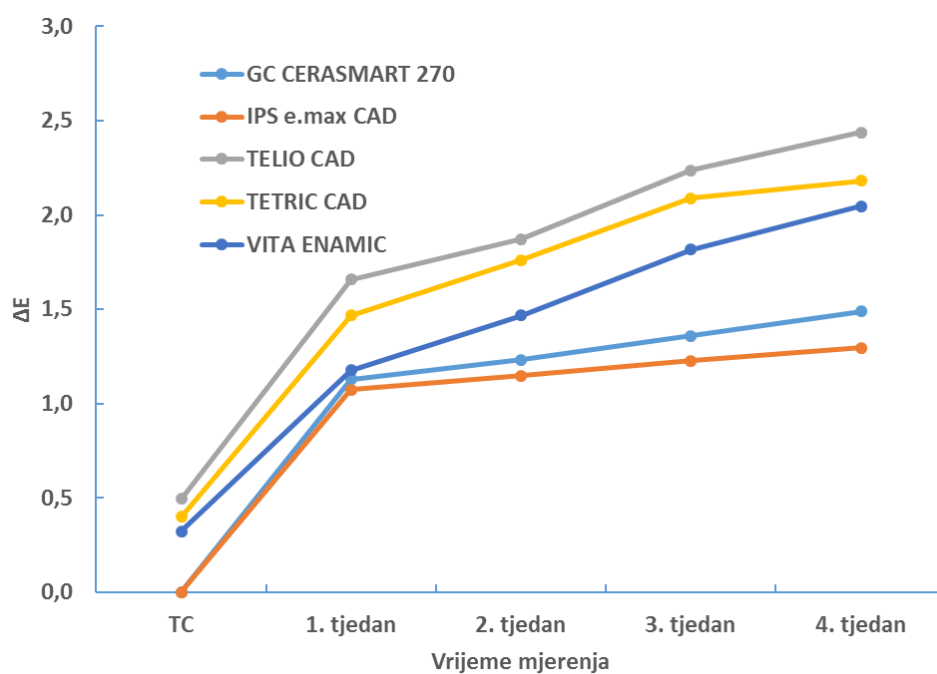
Tablica 3. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - crna pozadina

Materijal	Tekućina	TC		1. tjedan		2. tjedan		3. tjedan		4. tjedan	
		Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.
GC CERASMART 270	Destilirana voda	0,00	0,00	0,26	0,04	0,32	0,01	0,43	0,02	0,54	0,02
	Crni čaj	0,00	0,00	1,04	0,14	1,18	0,07	1,30	0,04	1,43	0,03
	Kava	0,00	0,00	1,13	0,03	1,23	0,08	1,36	0,06	1,49	0,06
	Crveno vino	0,00	0,00	1,34	0,03	1,62	0,03	1,86	0,04	2,31	0,02
IPS e.max CAD	Destilirana voda	0,00	0,00	0,17	0,02	0,24	0,04	0,37	0,03	0,42	0,02
	Crni čaj	0,00	0,00	0,61	0,09	0,78	0,02	1,01	0,05	1,23	0,06
	Kava	0,00	0,00	1,07	0,03	1,15	0,08	1,23	0,09	1,30	0,11
	Crveno vino	0,00	0,00	1,14	0,01	1,45	0,01	1,81	0,05	2,05	0,04
TELIO CAD	Destilirana voda	0,50	0,03	0,47	0,02	0,66	0,03	0,85	0,02	0,98	0,01
	Crni čaj	0,49	0,01	1,58	0,02	1,89	0,02	2,26	0,02	2,49	0,01
	Kava	0,49	0,03	1,66	0,02	1,87	0,04	2,24	0,04	2,44	0,03
	Crveno vino	0,46	0,02	1,92	0,02	2,27	0,03	2,76	0,04	3,07	0,03
TETRIC CAD	Destilirana voda	0,41	0,02	0,47	0,02	0,71	0,01	0,83	0,01	0,88	0,01
	Crni čaj	0,39	0,02	1,23	0,01	1,48	0,02	1,77	0,01	2,17	0,03
	Kava	0,40	0,01	1,47	0,03	1,76	0,02	2,09	0,01	2,18	0,02
	Crveno vino	0,40	0,04	1,76	0,03	2,15	0,02	2,45	0,01	2,73	0,04
VITA ENAMIC	Destilirana voda	0,38	0,02	0,40	0,01	0,44	0,02	0,56	0,03	0,65	0,03
	Crni čaj	0,34	0,05	1,17	0,02	1,40	0,03	1,58	0,02	1,84	0,04
	Kava	0,32	0,05	1,18	0,02	1,47	0,02	1,82	0,01	2,05	0,04
	Crveno vino	0,37	0,03	1,47	0,02	1,85	0,03	2,14	0,01	2,47	0,03

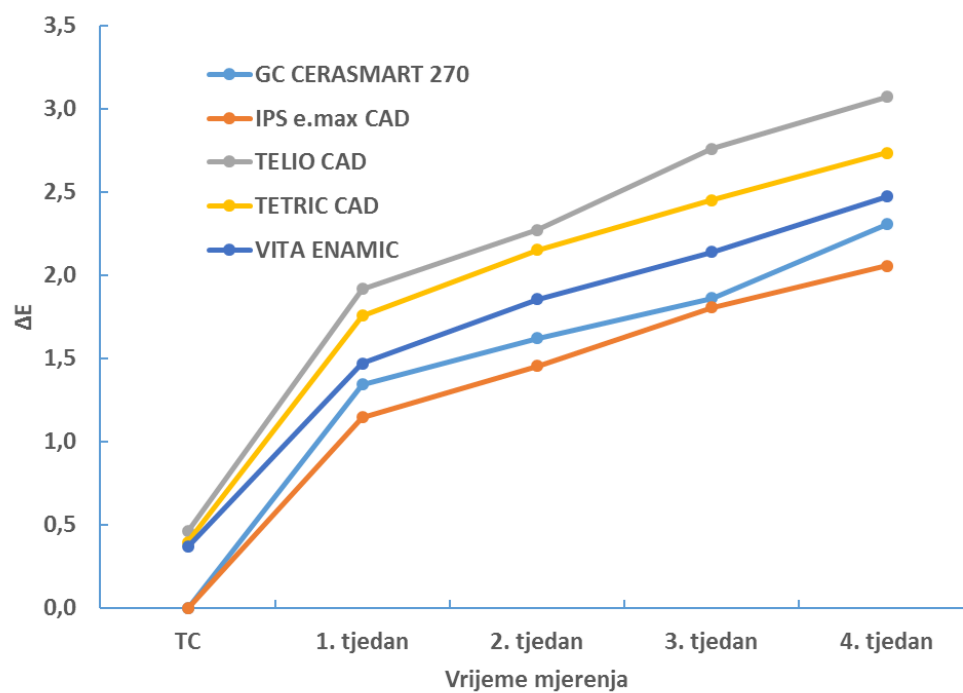
Slika 26a. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - crna pozadina – Destilirana voda



Slika 26b. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - crna pozadina – Crni čaj



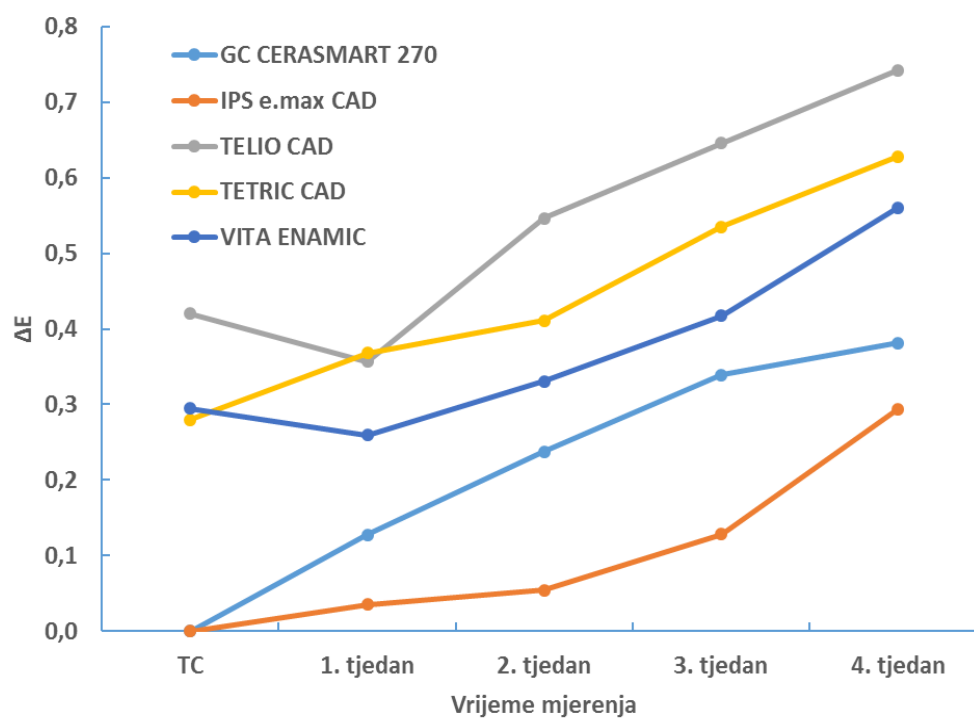
Slika 26c. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - crna pozadina – Instant kava



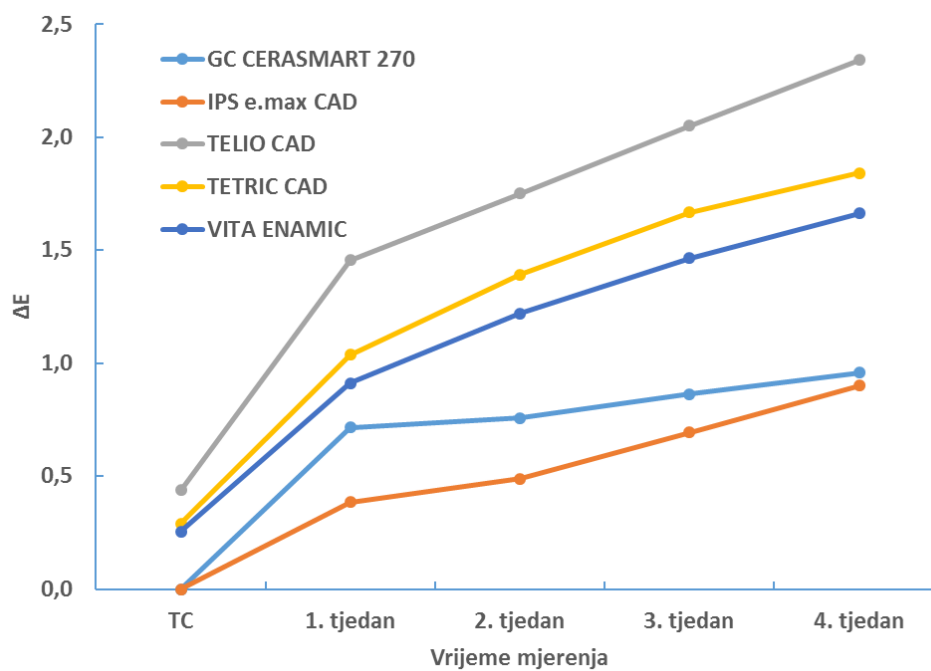
Slika 26d. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - crna pozadina – Crveno vino

Tablica 4. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - bijela pozadina

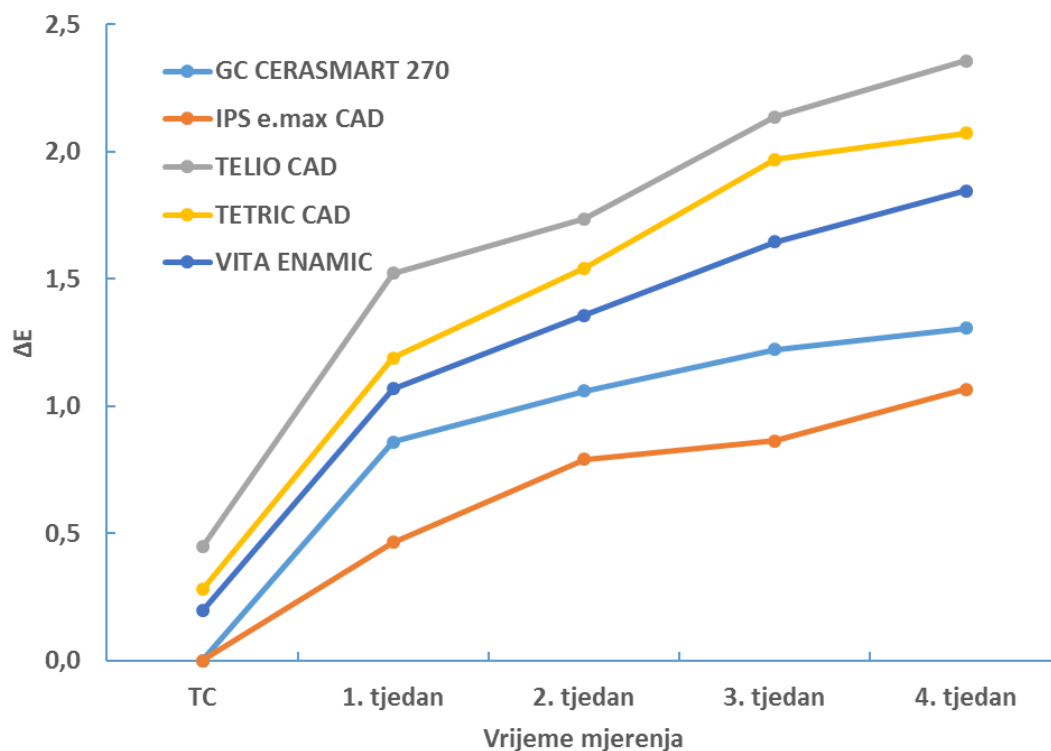
Materijal	Tekućina	TC		1. tjedan		2. tjedan		3. tjedan		4. tjedan	
		Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.
GC CERASMART 270	Destilirana voda	0,00	0,00	0,13	0,03	0,24	0,04	0,34	0,02	0,38	0,02
	Crni čaj	0,00	0,00	0,72	0,07	0,76	0,07	0,86	0,03	0,96	0,03
	Kava	0,00	0,00	0,86	0,04	1,06	0,15	1,22	0,09	1,31	0,10
	Crveno vino	0,00	0,00	1,14	0,03	1,44	0,02	1,76	0,03	2,14	0,04
IPS e.max CAD	Destilirana voda	0,00	0,00	0,04	0,01	0,05	0,01	0,13	0,02	0,29	0,01
	Crni čaj	0,00	0,00	0,39	0,01	0,49	0,11	0,69	0,09	0,90	0,06
	Kava	0,00	0,00	0,46	0,05	0,79	0,02	0,86	0,02	1,07	0,02
	Crveno vino	0,00	0,00	1,03	0,02	1,26	0,03	1,62	0,01	1,85	0,02
TELIO CAD	Destilirana voda	0,42	0,02	0,36	0,03	0,55	0,02	0,65	0,03	0,74	0,03
	Crni čaj	0,44	0,01	1,45	0,03	1,75	0,03	2,05	0,02	2,34	0,04
	Kava	0,45	0,04	1,52	0,02	1,74	0,03	2,14	0,02	2,36	0,04
	Crveno vino	0,41	0,01	1,72	0,02	2,16	0,03	2,55	0,03	2,96	0,03
TETRIC CAD	Destilirana voda	0,28	0,05	0,37	0,01	0,41	0,01	0,53	0,03	0,63	0,01
	Crni čaj	0,29	0,02	1,04	0,01	1,39	0,01	1,67	0,03	1,84	0,03
	Kava	0,28	0,07	1,19	0,02	1,54	0,03	1,97	0,02	2,07	0,04
	Crveno vino	0,29	0,05	1,65	0,03	1,93	0,03	2,35	0,04	2,57	0,01
VITA ENAMIC	Destilirana voda	0,29	0,02	0,26	0,03	0,33	0,03	0,42	0,03	0,56	0,02
	Crni čaj	0,26	0,04	0,91	0,06	1,22	0,01	1,46	0,03	1,66	0,03
	Kava	0,20	0,02	1,07	0,03	1,36	0,02	1,65	0,04	1,85	0,03
	Crveno vino	0,22	0,03	1,37	0,03	1,65	0,01	1,96	0,05	2,36	0,03



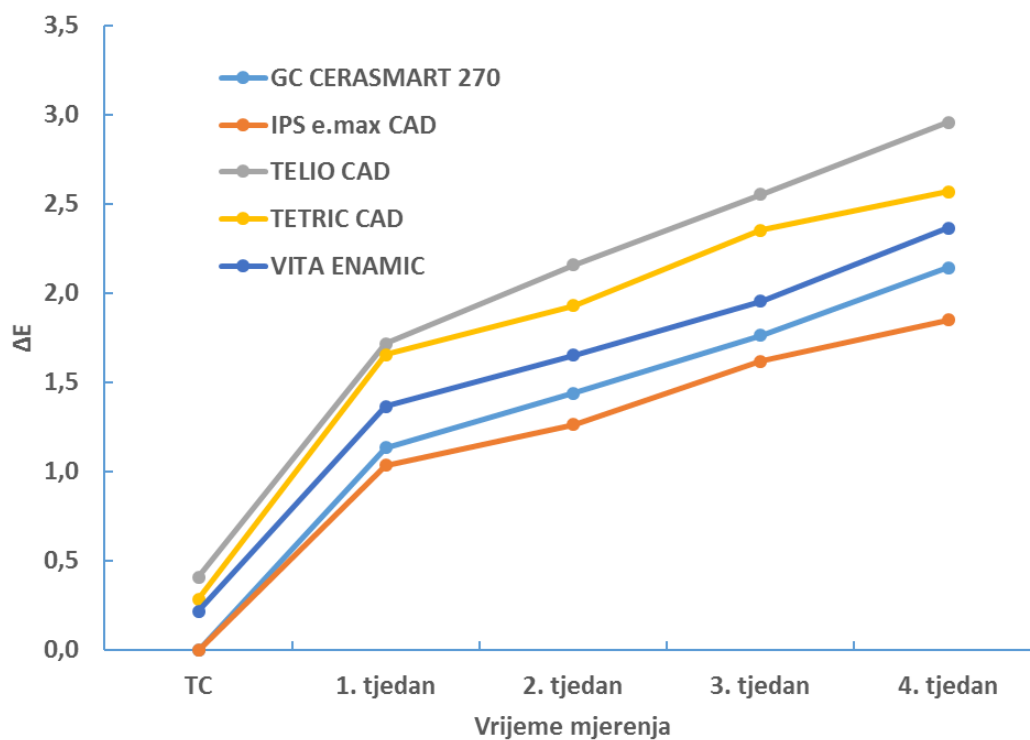
Slika 27a. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - bijela pozadina – Destilirana voda



Slika 27b. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - bijela pozadina – Crni čaj



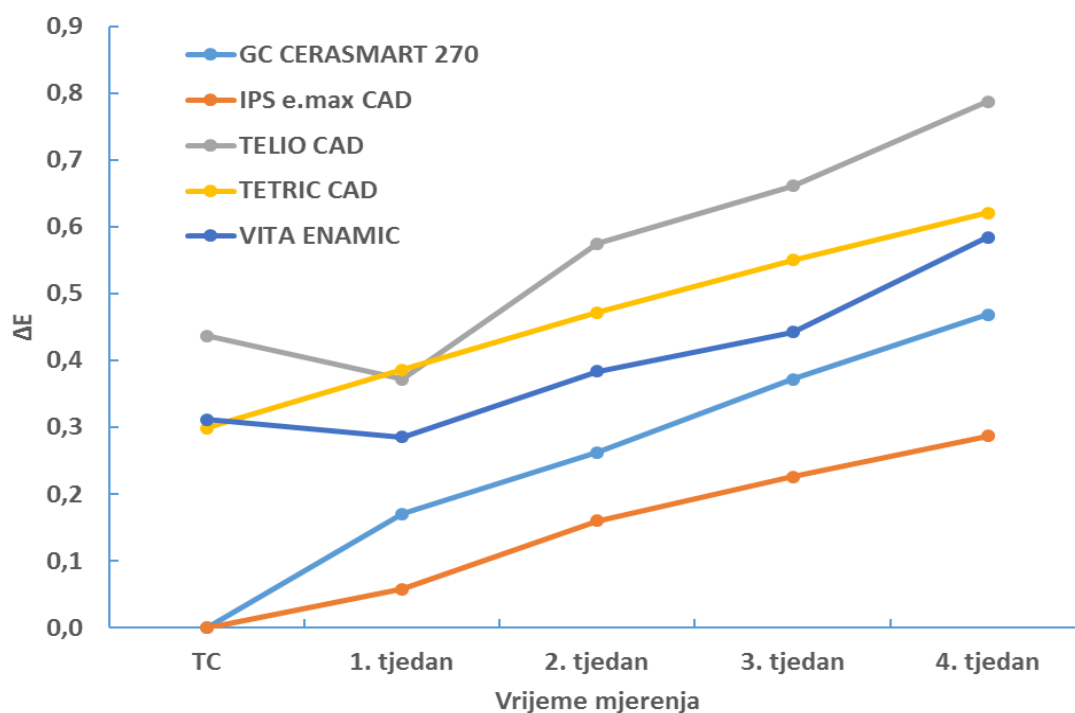
Slika 27c. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - bijela pozadina – Instant kava



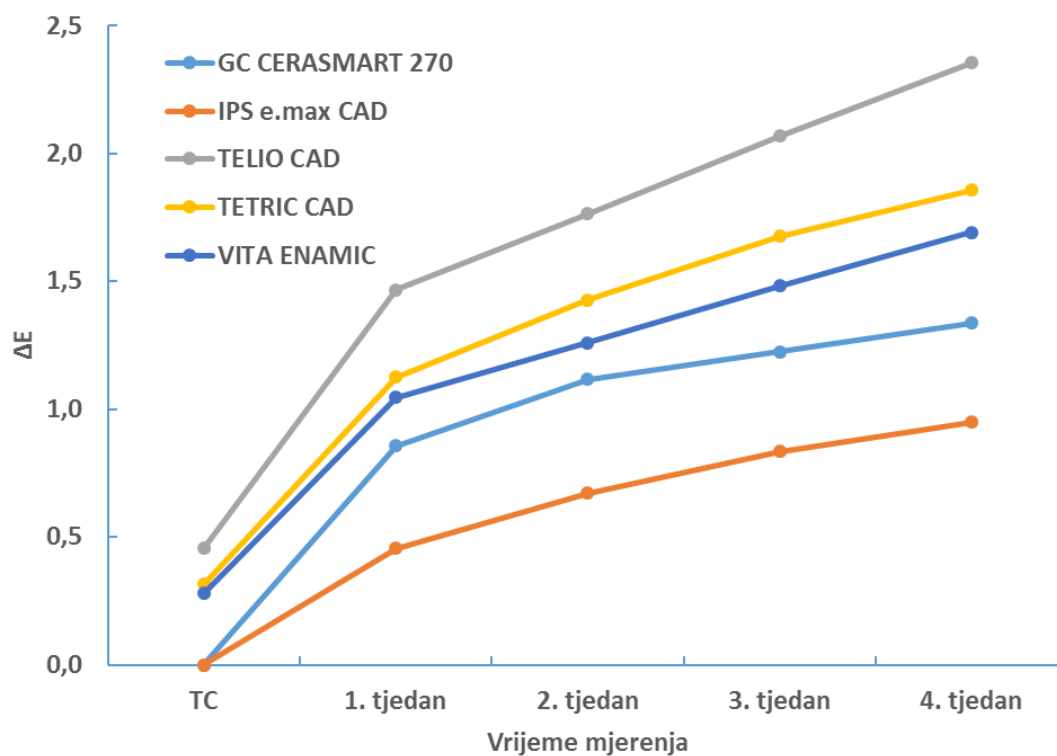
Slika 27d. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - bijela pozadina – Crveno vino

Tablica 5. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - crna pozadina

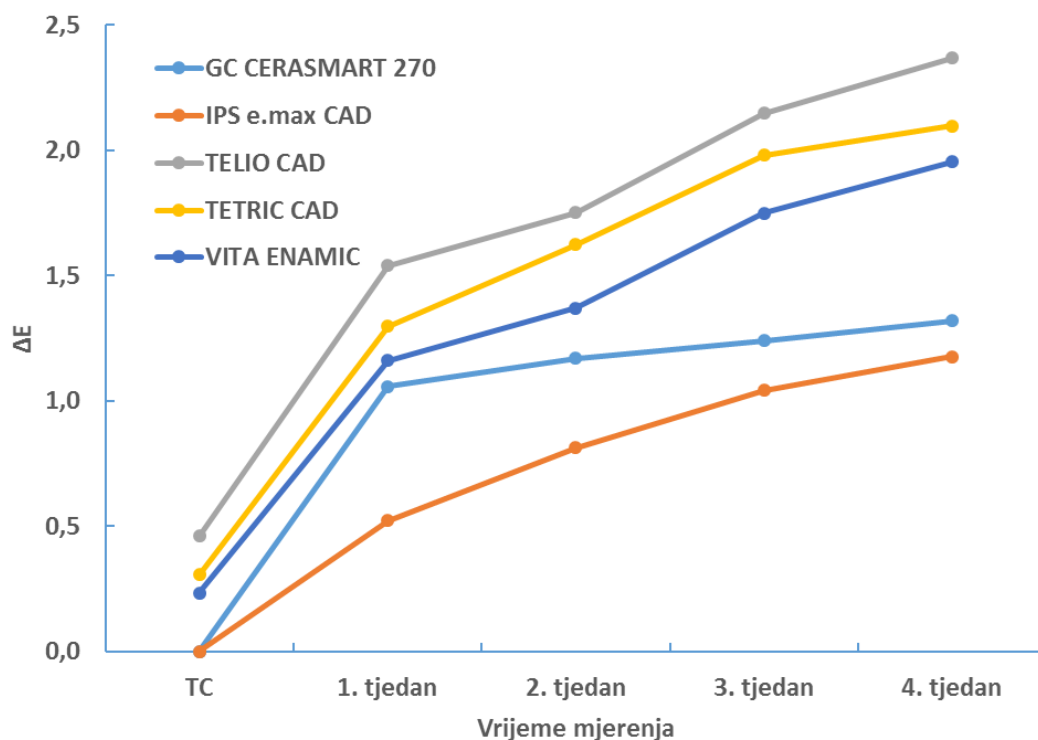
Materijal	Tekućina	TC		1. tjedan		2. tjedan		3. tjedan		4. tjedan	
		Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.
GC CERASMART 270	Destilirana voda	0,00	0,00	0,17	0,02	0,26	0,04	0,37	0,01	0,47	0,02
	Crni čaj	0,00	0,00	0,86	0,01	1,11	0,06	1,22	0,05	1,34	0,03
	Kava	0,00	0,00	1,06	0,01	1,17	0,05	1,24	0,10	1,32	0,10
	Crveno vino	0,00	0,00	1,16	0,03	1,46	0,02	1,78	0,02	2,16	0,03
IPS e.max CAD	Destilirana voda	0,00	0,00	0,06	0,02	0,16	0,03	0,23	0,07	0,29	0,08
	Crni čaj	0,00	0,00	0,46	0,07	0,67	0,04	0,83	0,04	0,95	0,04
	Kava	0,00	0,00	0,52	0,04	0,81	0,03	1,04	0,02	1,18	0,02
	Crveno vino	0,00	0,00	1,05	0,01	1,28	0,02	1,64	0,01	1,88	0,02
TELIO CAD	Destilirana voda	0,44	0,01	0,37	0,02	0,58	0,02	0,66	0,03	0,79	0,01
	Crni čaj	0,45	0,02	1,47	0,03	1,76	0,03	2,07	0,02	2,35	0,04
	Kava	0,46	0,03	1,54	0,01	1,75	0,03	2,15	0,01	2,37	0,03
	Crveno vino	0,43	0,01	1,76	0,03	2,19	0,01	2,58	0,04	3,05	0,02
TETRIC CAD	Destilirana voda	0,30	0,05	0,39	0,01	0,47	0,03	0,55	0,04	0,62	0,05
	Crni čaj	0,31	0,01	1,13	0,02	1,43	0,01	1,68	0,03	1,86	0,03
	Kava	0,31	0,06	1,30	0,08	1,62	0,01	1,98	0,02	2,10	0,04
	Crveno vino	0,32	0,06	1,67	0,03	1,94	0,03	2,37	0,04	2,59	0,01
VITA ENAMIC	Destilirana voda	0,31	0,02	0,29	0,02	0,38	0,01	0,44	0,03	0,58	0,01
	Crni čaj	0,28	0,04	1,04	0,02	1,26	0,03	1,48	0,02	1,69	0,01
	Kava	0,23	0,04	1,16	0,03	1,37	0,02	1,75	0,03	1,95	0,03
	Crveno vino	0,27	0,03	1,38	0,03	1,68	0,02	2,06	0,03	2,38	0,03



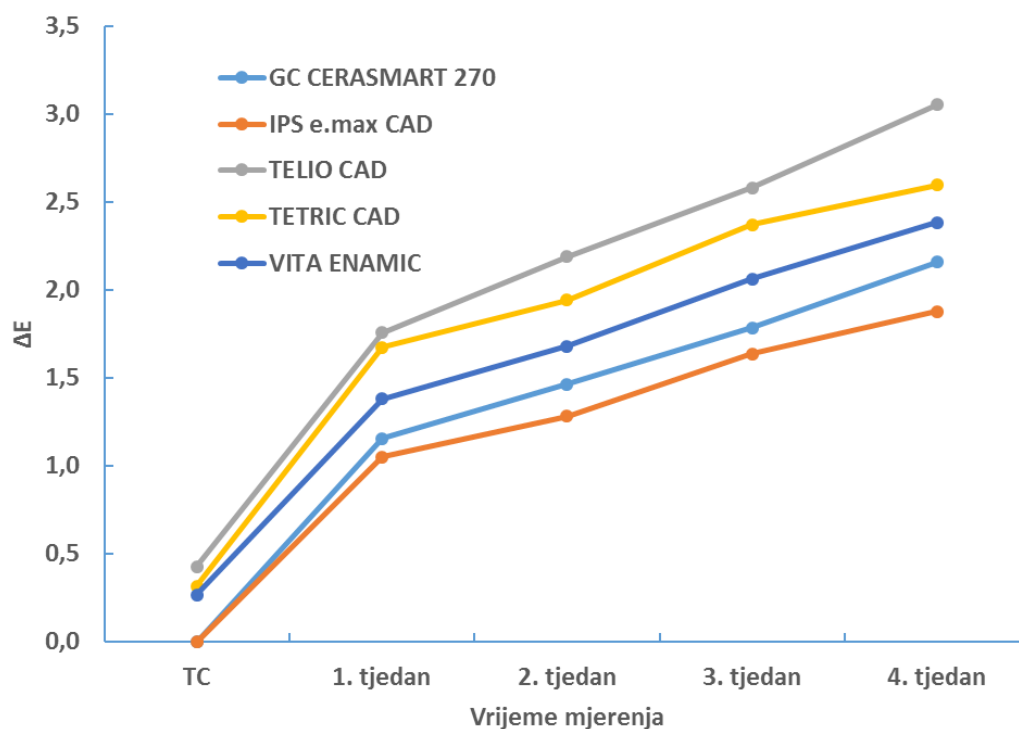
Slika 28a. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - crna pozadina – Destilirana voda



Slika 28b. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - crna pozadina – Crni čaj



Slika 28c. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - crna pozadina – Instant kava



Slika 28d. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - crna pozadina – Crveno vino

Promjena boje

Utjecaj na promjenu boje posebno je testiran za svaku kombinaciju debljine uzorka i boju pozadine.

Tablica 6. Utjecaj faktora na promjenu boje (ΔE_{00}) (ANOVA)

Izvor	Stupnjevi slobode	Suma kvadrata	Srednja suma kvadrata	F	p-vrijednost
Model	83	1047.25	12.62	183.74	<0.0001
Materijal	4	168.84	42.21	614.68	<0.0001
Tekućina	3	377.46	125.82	1832.24	<0.0001
Materijal*Tekućina	12	13.73	1.14	16.66	<0.0001
Debljina uzorka	1	5.64	5.64	82.19	<0.0001
Materijal*Debljina uzorka	4	0.20	0.05	0.72	0.57
Tekućina*Debljina uzorka	3	0.01	0.00	0.04	0.99
Materijal*Tekućina*Debljina uzorka	12	0.18	0.02	0.22	1.00
Boja pozadine	1	1.76	1.76	25.66	<0.0001
Materijal*Boja pozadine	4	0.21	0.05	0.76	0.55
Tekućina*Boja pozadine	3	0.27	0.09	1.30	0.27
Debljina uzorka*Boja pozadine	1	0.04	0.04	0.58	0.45
Materijal*Tekućina*Boja pozadine	12	0.75	0.06	0.92	0.53
Materijal*Debljina uzorka*Boja pozadine	4	0.02	0.00	0.07	0.99
Tekućina*Debljina uzorka*Boja pozadine	3	0.01	0.00	0.02	0.99
Materijal*Tekućina*Debljina uzorka*Boja pozadine	12	0.18	0.02	0.22	1.00
Vrijeme	4	477.95	119.49	1740.03	<0.0001
Pogreška	1916	131.57	0.07		
Ukupno	1999	1178.82			

ANOVA test je pokazao da su svi faktori značajni. Na izmjerenu promjenu boje utječu vrsta materijala, vrsta tekućine, debljina uzorka, boja pozadine i protok vremena (tablica 6). Od interakcija značajna je samo interakcija vrste materijala i vrste tekućine (materijal*tekućina), tj. veličina promjene ovisna je o kombinaciji vrste materijala i vrste tekućine.

Utjecaj vrste materijala i vrste tekućine na promjenu boje testirana je višestrukom usporedbom pomoću Tukeyevog testa. Uspoređena je promjena boje između materijala za svaku vrstu tekućine i promjena boje između tekućina za svaku vrstu materijala. Razlika između svih materijala te između svih tekućina je statistički značajna osim kod Telio CAD-a, gdje nije uočena razlika između crnog čaja i kave.

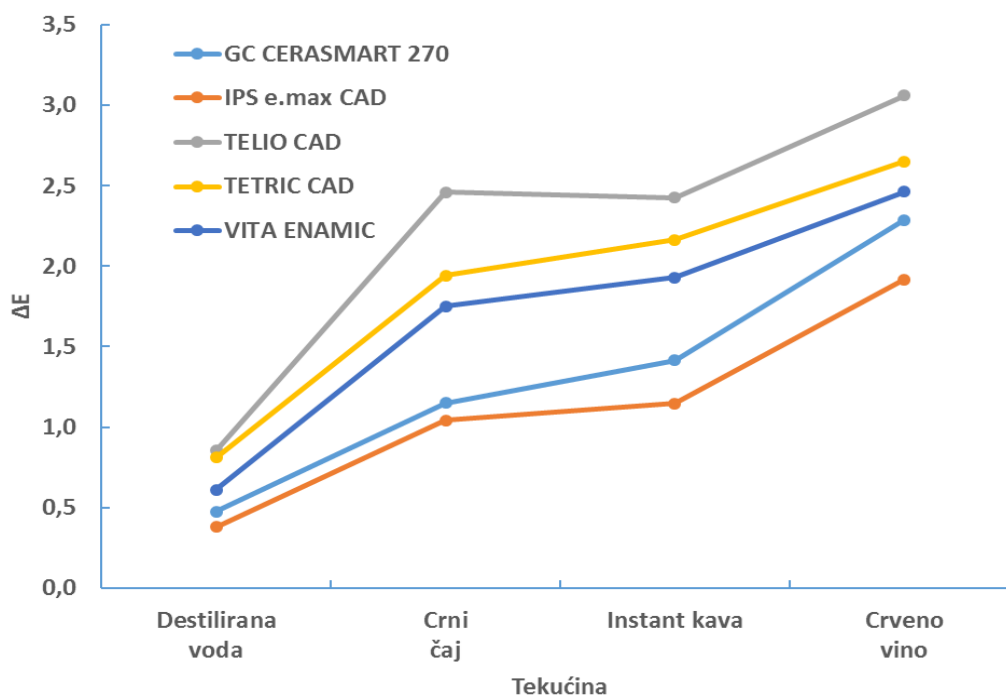
Detaljna usporedba utjecaja vrste materijala i vrste tekućine na promjenu boje prikazana je u tablicama 7, 8, 9 i 10 te slikama 29, 30, 31 i 32.

Tablica 7. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - bijela pozadina - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,47	1,15	1,41	2,29
IPS e.max CAD	0,38	1,04	1,15	1,92
TELIO CAD	0,86	2,46 ^a	2,43 ^a	3,06
TETRIC CAD	0,81	1,94	2,16	2,65
VITA ENAMIC	0,61	1,75	1,93	2,46

^a Tukeyev 'post-hoc' test, isto slovo označava tekućine koje se međusobno ne razlikuju

Iz tablice 7 vidi se da je promjena boje najveća za TELIO CAD iza kojeg redom slijede TETRIC CAD, VITA ENAMIC, GC CERASMART 270 te IPS e.max CAD. Usporedba tekućina pokazuje da je za sve materijale najveća promjena boje za crno vino, zatim za instant kavu, crni čaj i najmanja promjena boje je za destiliranu vodu.

Slika 29. ANOVA usporedba - Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - bijela pozadina - nakon 4. tjedna

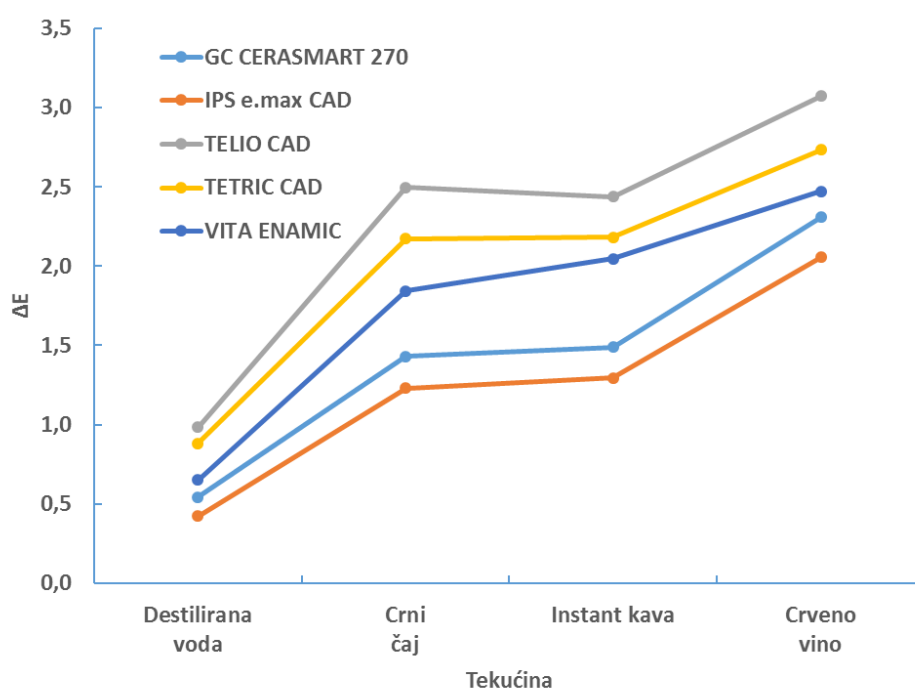
Usporedba promjene boje na crnoj pozadini daje iste rezultate kao i usporedba na bijeloj pozadini. Utjecaj materijala i tekućine na promjenu boje je značajan kao i interakcija materijala i tekućine (tablica 8).

I redoslijed materijala i tekućina obzirom na promjenu boje je nepromijenjen (tablica 8, slika 30).

Tablica 8. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - crna pozadina - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,54	1,43	1,49	2,31
IPS e.max CAD	0,42	1,23	1,30	2,05
TELIO CAD	0,98	2,49 ^a	2,44 ^a	3,07
TETRIC CAD	0,88	2,17	2,18	2,73
VITA ENAMIC	0,65	1,84	2,05	2,47

^a Tukeyev 'post-hoc' test, isto slovo označava tekućine koje se međusobno ne razlikuju



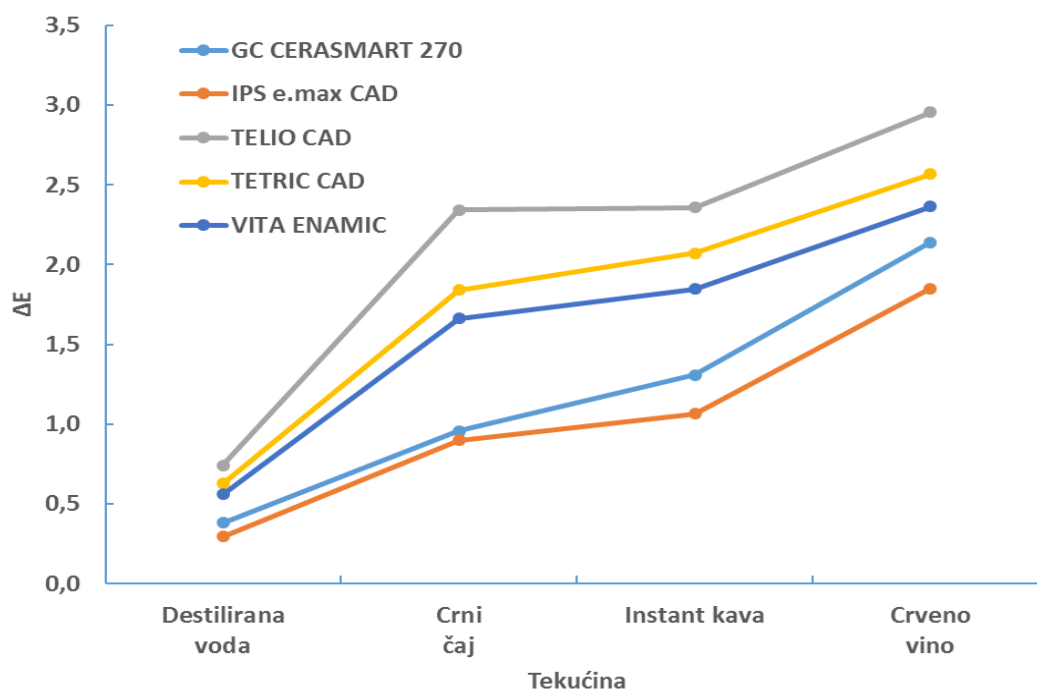
Slika 30. Promjena boje (ΔE_{00}) - 1 mm - crna pozadina - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Iste usporedbe su napravljene i na uzorcima debljine 2 mm. Rezultati su isti, redosljed materijala i tekućina je nepromijenjen (tablica 9 i slika 31 za bijeli pozadinu i tablica 10 i slika 32 za crnu pozadinu).

Tablica 9. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - bijela pozadina - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,38	0,96	1,31	2,14
IPS e.max CAD	0,29	0,90	1,07	1,85
TELIO CAD	0,74	2,34 ^a	2,36 ^a	2,96
TETRIC CAD	0,63	1,84	2,07	2,57
VITA ENAMIC	0,56	1,66	1,85	2,36

^a Tukeyev 'post-hoc' test, isto slovo označava tekućine koje se međusobno ne razlikuju

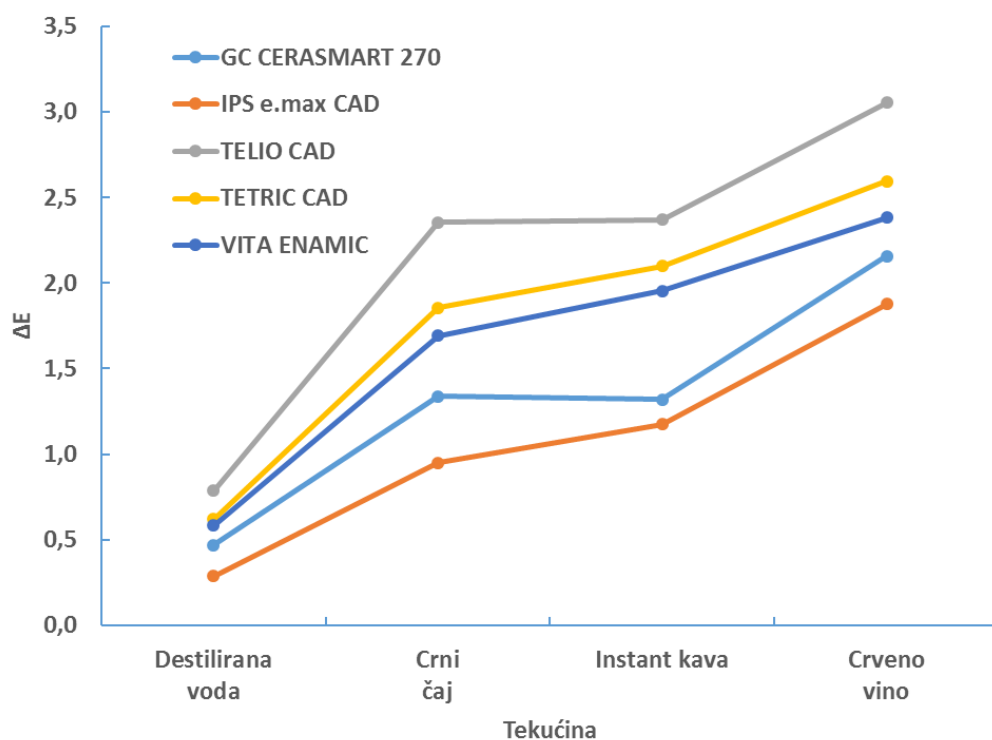


Slika 31. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - bijela pozadina - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Tablica 10. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - crna pozadina - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,47	1,34	1,32	2,16
IPS e.max CAD	0,29	0,95	1,18	1,88
TELIO CAD	0,79	2,35 ^a	2,37 ^a	3,05
TETRIC CAD	0,62	1,86	2,10	2,59
VITA ENAMIC	0,58	1,69	1,95	2,38

^a Tukeyev 'post-hoc' test, isto slovo označava tekućine koje se međusobno ne razlikuju

Slika 32. Promjena boje (ΔE_{00}) - 2 mm - crna pozadina - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Usporedba utjecaja vrste materijala na promjenu boje jasno pokazuje sljedeći redoslijed:

TELIO CAD > TETRIC CAD > VITA ENAMIC > GC CERASMART 270 > IPS E.MAX CAD

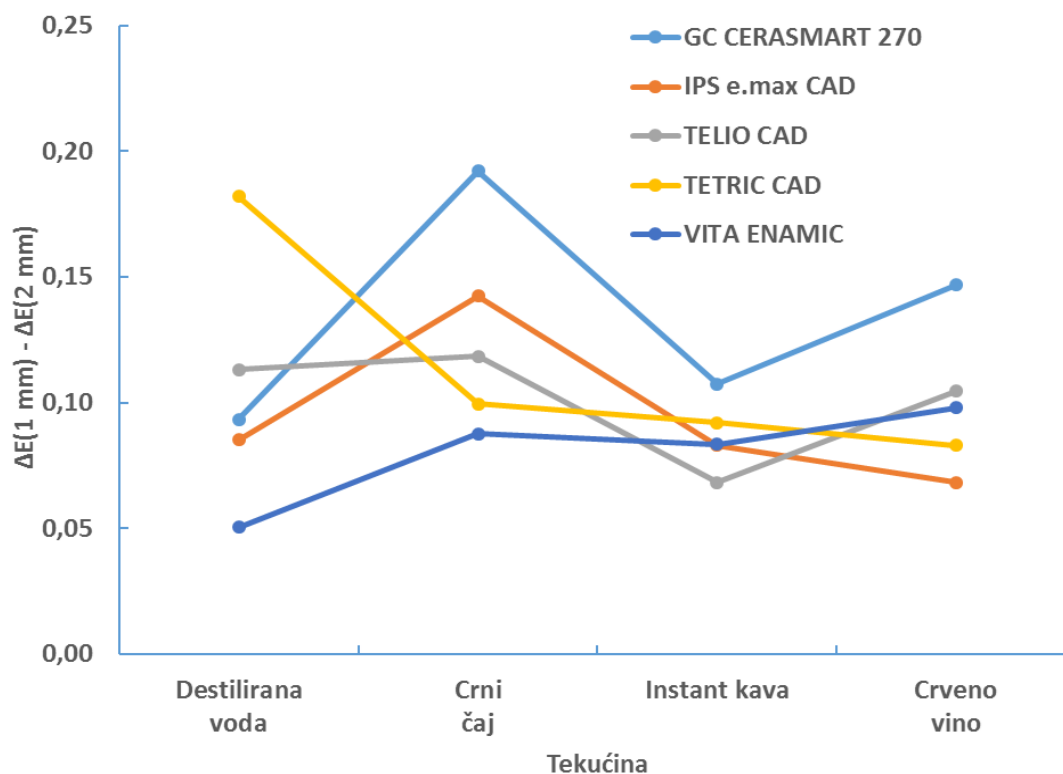
Usporedba utjecaja vrste tekućine na promjenu boje pokazuje redoslijed:

Crveno vino > Instant kava $\geq$ Crni čaj > Destilirana voda

Promjena boje za kavu i crni čaj ne razlikuje se samo kod materijala Telio CAD. Debljina uzorka značajno utječe na promjenu boje, bez obzira na vrstu materijala, vrstu tekućine i boju pozadine ($p < 0.0001$, ANOVA test; Tablica 6). Iz tablica 7, 8, 9 i 10 vidimo da je promjena boje veća za uzorke debljine 1 mm. Ova usporedba je sažeto prikazana u tablicama 11 i 12 te slikama 33 i 34. Prikazana je razlika promjene boje za uzorke debljine 1 mm i debljine 2 mm: $\Delta E_{00}(1 \text{ mm}) - \Delta E_{00}(2 \text{ mm})$. Razlika je pozitivna za sve kombinacije materijala, tekućine i boje pozadine.

Tablica 11. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između uzorka debljine 1 mm i 2 mm - bijela pozadina - nakon 4. tjedna

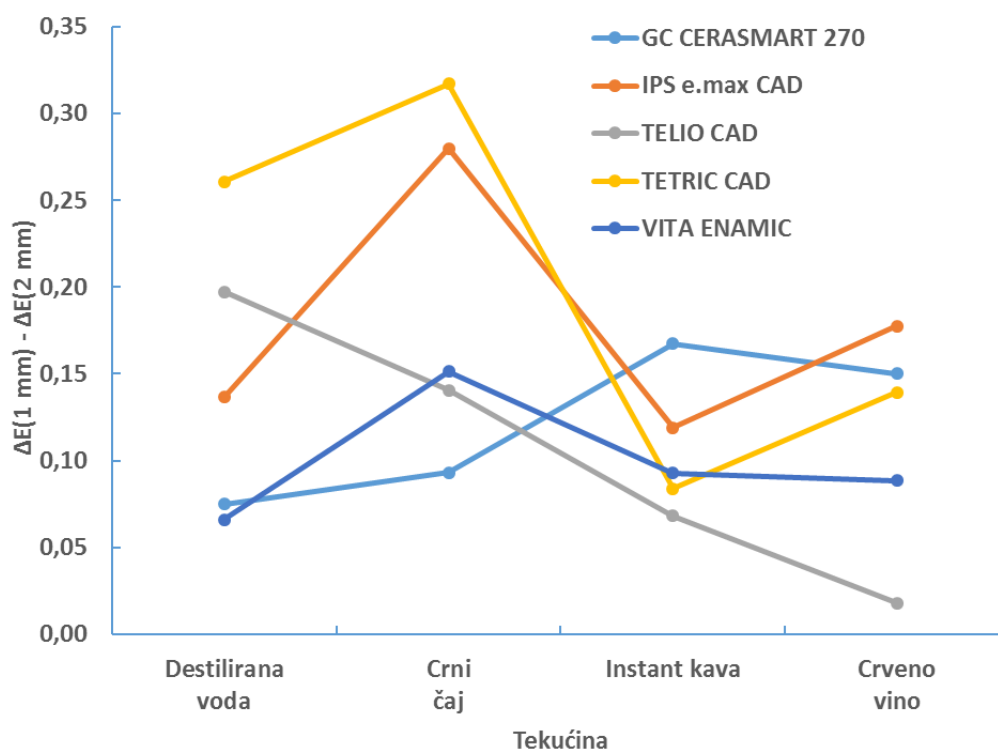
Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,09	0,19	0,11	0,15
IPS e.max CAD	0,09	0,14	0,08	0,07
TELIO CAD	0,11	0,12	0,07	0,10
TETRIC CAD	0,18	0,10	0,09	0,08
VITA ENAMIC	0,05	0,09	0,08	0,10



Slika 33. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između uzorka debljine 1 mm i 2 mm - bijela pozadina - nakon 4. tjedna

Tablica 12. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između uzorka debljine 1 mm i 2 mm - crna pozadina - nakon 4. tjedna

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,07	0,09	0,17	0,15
IPS e.max CAD	0,14	0,28	0,12	0,18
TELIO CAD	0,20	0,14	0,07	0,02
TETRIC CAD	0,26	0,32	0,08	0,14
VITA ENAMIC	0,07	0,15	0,09	0,09

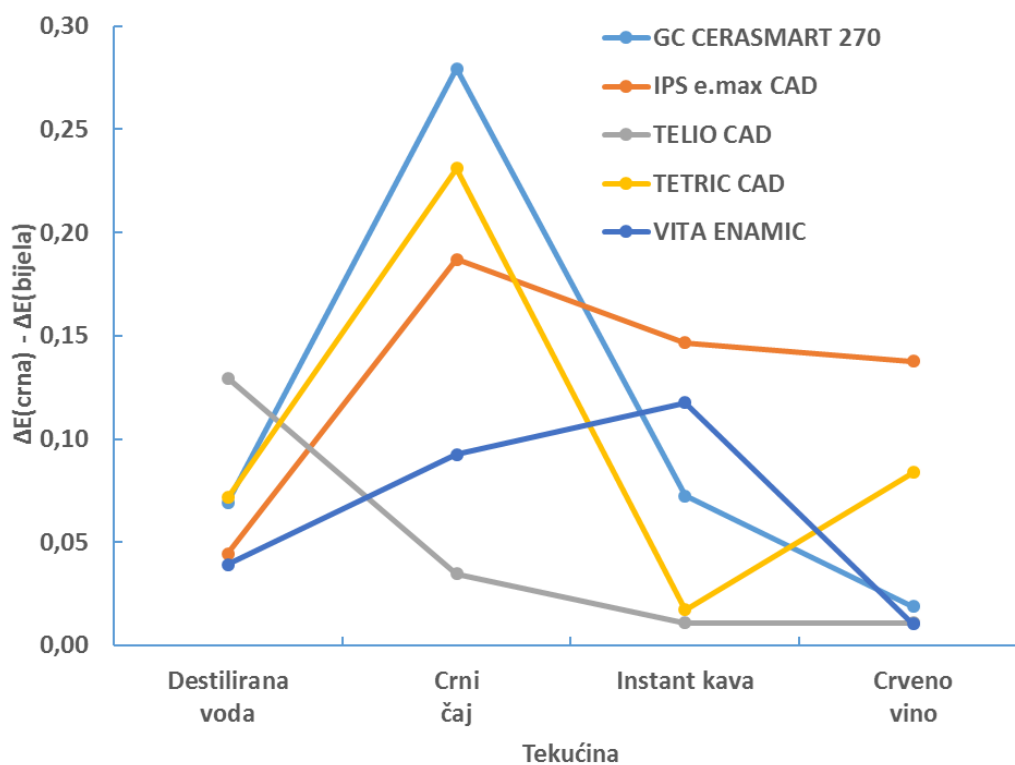


Slika 34. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između uzorka debljine 1 mm i 2 mm - crna pozadina - nakon 4. tjedna

Na isti način promatramo razliku u promjeni boje za bijelu i crnu pozadinu. Razlika između dviju pozadina je značajna ($p < 0.0001$, ANOVA test; Tablica 6). Iz tablica 7, 8, 9 i 10 vidimo da je promjena boje veća za crnu pozadinu. Ova usporedba je sažeto prikazana u tablicama 13 i 14 te slikama 35 i 36. Prikazana je razlika promjene boje za uzorke snimljene na crnoj pozadini i uzorke snimljene na bijeloj pozadini: $\Delta E^*_{00}(\text{crna}) - \Delta E^*_{00}(\text{bijela})$. Razlika je pozitivna za sve kombinacije materijala, tekućine i debljine uzorka osim za destiliranu vodu na uzorcima debljine 2 mm, a za materijale IPS e.max. CAD i TETRIC CAD gdje je promjena boje veća na bijeloj pozadini i to za minimalnu vrijednost od 0,01.

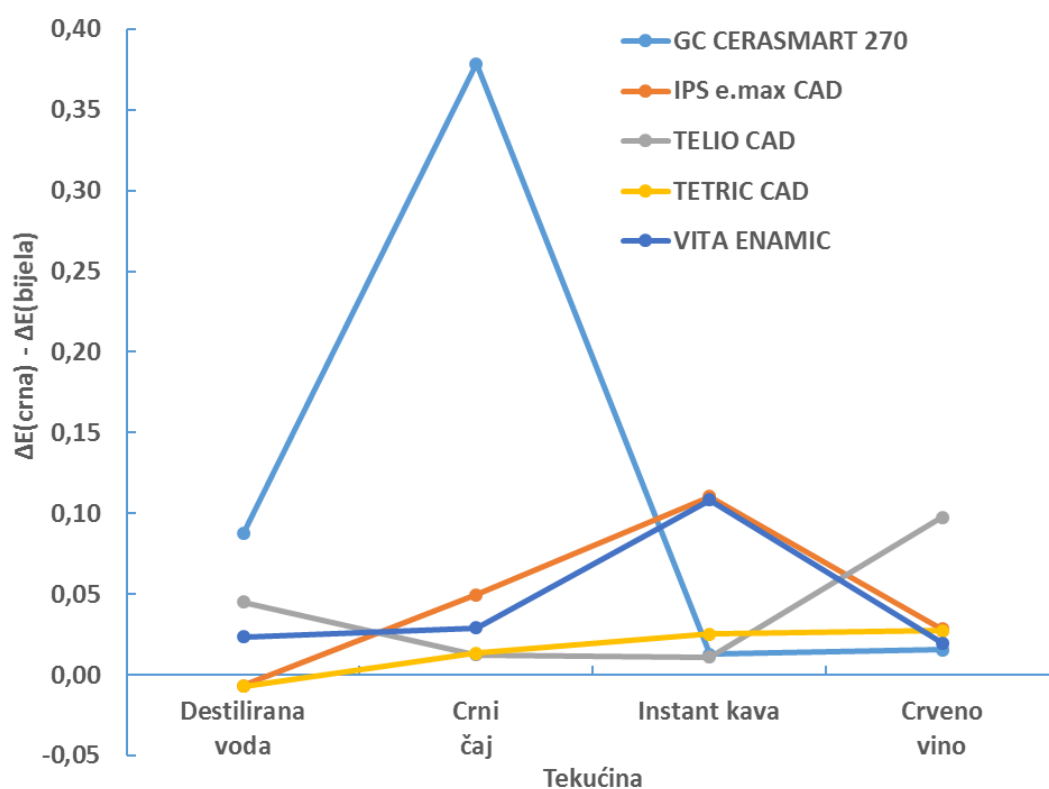
Tablica 13. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između crne i bijele pozadine - 1 mm - nakon 4. tjedna

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,07	0,28	0,07	0,02
IPS e.max CAD	0,04	0,19	0,15	0,14
TELIO CAD	0,13	0,03	0,01	0,01
TETRIC CAD	0,07	0,23	0,02	0,08
VITA ENAMIC	0,04	0,09	0,12	0,01

Slika 35. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između crne i bijele pozadine - 1 mm - nakon 4. tjedna

Tablica 14. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između crne i bijele pozadine - 2 mm - nakon 4. tjedna

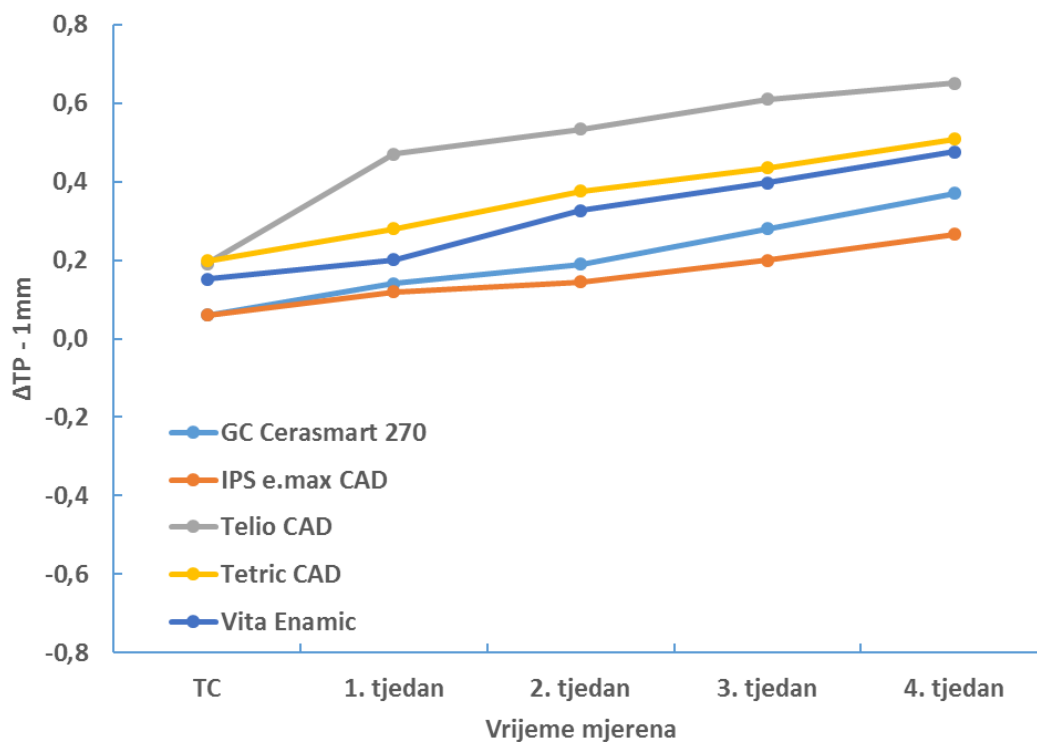
Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,09	0,38	0,01	0,02
IPS e.max CAD	-0,01	0,05	0,11	0,03
TELIO CAD	0,05	0,01	0,01	0,10
TETRIC CAD	-0,01	0,01	0,03	0,03
VITA ENAMIC	0,02	0,03	0,11	0,02

Slika 36. Razlika promjene boje (ΔE_{00}) između crne i bijele pozadine - 2 mm - nakon 4. tjedna

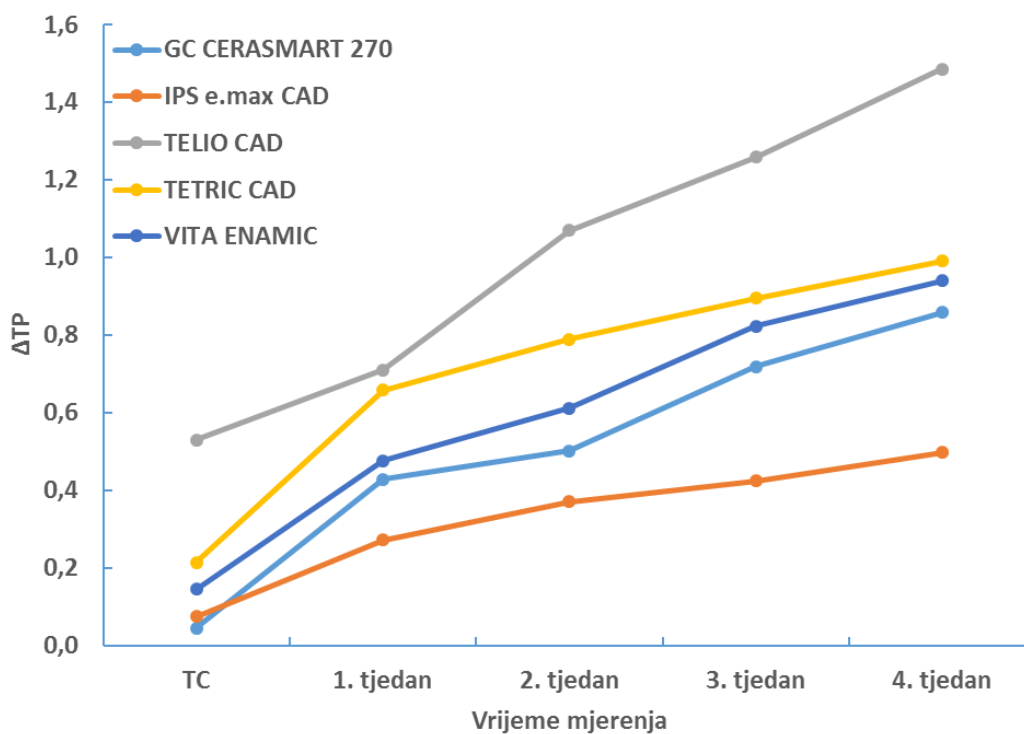
Proteklo vrijeme također značajno utječe na promjenu boje ($p < 0.0001$, ANOVA test; Tablica 7). Iz tablica 2, 3, 4 i 5 i slika 25a, 25b, 25c, 25d, 26a, 26b, 26c, 26d, 27a, 27b, 27c, 27d, 28a, 28b, 28c i 28d vidimo da se protekom vremena promjena boje povećava.

Tablica 15. Promjena translucencije (ΔTP) - 1 mm

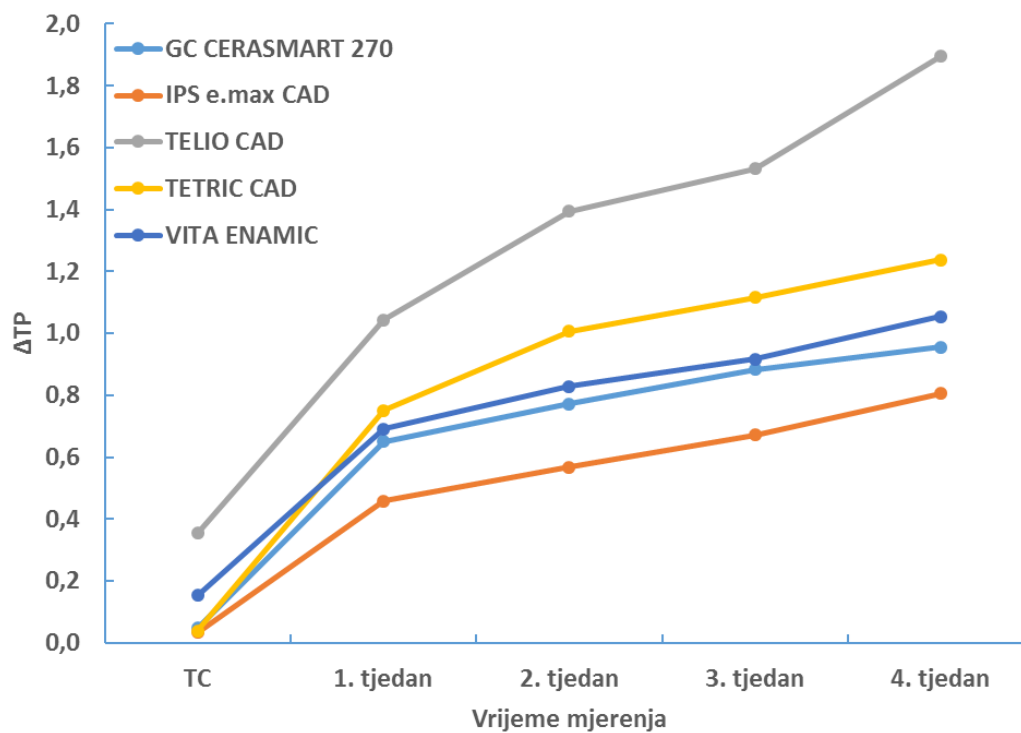
Materijal	Tekućina	TC		1. tjedan		2. tjedan		3. tjedan		4. tjedan	
		Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.
GC CERASMART 270	Destilirana voda	0,06	0,05	0,14	0,01	0,19	0,01	0,28	0,02	0,37	0,01
	Crni čaj	0,04	0,02	0,43	0,02	0,50	0,01	0,72	0,02	0,86	0,03
	Instant kava	0,05	0,02	0,65	0,02	0,77	0,01	0,88	0,01	0,96	0,02
	Crveno vino	0,11	0,07	0,93	0,01	1,33	0,04	1,67	0,03	2,04	0,03
IPS e.max CAD	Destilirana voda	0,06	0,04	0,12	0,02	0,14	0,01	0,20	0,00	0,27	0,01
	Crni čaj	0,07	0,04	0,27	0,01	0,37	0,02	0,42	0,01	0,50	0,01
	Instant kava	0,03	0,02	0,46	0,03	0,57	0,02	0,67	0,01	0,81	0,01
	Crveno vino	0,06	0,04	0,94	0,02	1,23	0,03	1,62	0,08	1,93	0,03
TELIO CAD	Destilirana voda	0,19	0,17	0,47	0,09	0,53	0,08	0,61	0,09	0,65	0,14
	Crni čaj	0,53	0,23	0,71	0,07	1,07	0,06	1,26	0,04	1,49	0,06
	Instant kava	0,35	0,17	1,04	0,02	1,39	0,07	1,53	0,03	1,89	0,04
	Crveno vino	0,41	0,12	1,27	0,03	1,58	0,07	2,36	0,03	3,07	0,05
TETRIC CAD	Destilirana voda	0,20	0,06	0,28	0,05	0,38	0,04	0,43	0,04	0,51	0,04
	Crni čaj	0,21	0,05	0,66	0,03	0,79	0,06	0,89	0,05	0,99	0,06
	Instant kava	0,04	0,14	0,75	0,02	1,01	0,06	1,12	0,04	1,24	0,02
	Crveno vino	0,18	0,05	1,09	0,06	1,21	0,03	1,84	0,02	2,29	0,03
VITA ENAMIC	Destilirana voda	0,15	0,03	0,20	0,03	0,33	0,02	0,40	0,02	0,48	0,02
	Crni čaj	0,14	0,03	0,48	0,02	0,61	0,02	0,82	0,01	0,94	0,03
	Instant kava	0,15	0,03	0,69	0,02	0,83	0,01	0,92	0,01	1,05	0,02
	Crveno vino	0,17	0,03	1,03	0,03	1,24	0,04	1,55	0,03	2,04	0,04



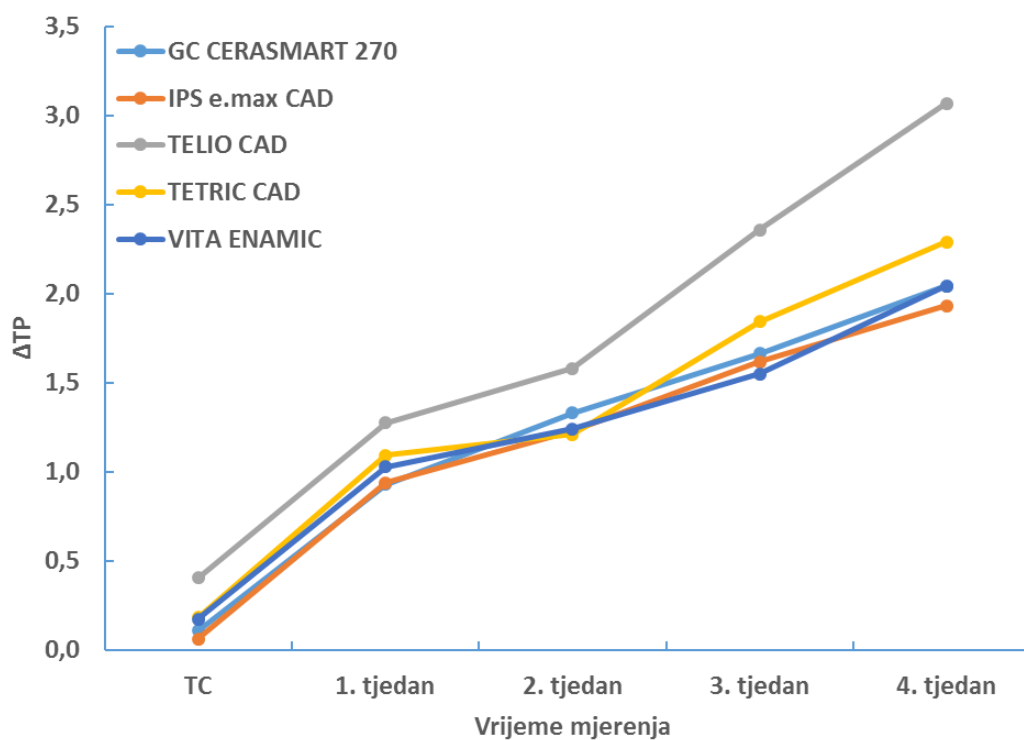
Slika 37a. Promjena translucencije (ΔTP) - 1 mm – Destilirana voda



Slika 37b. Promjena translucencije (ΔTP) - 1 mm – Crni čaj



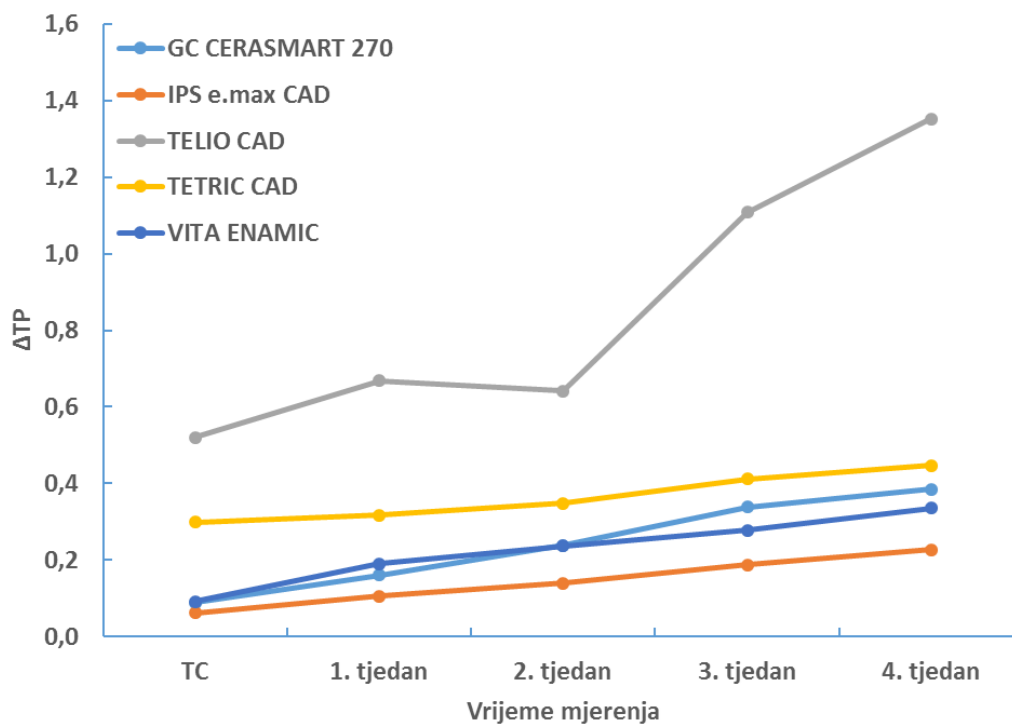
Slika 37c. Promjena translucencije (ΔTP) - 1 mm – Instant kava

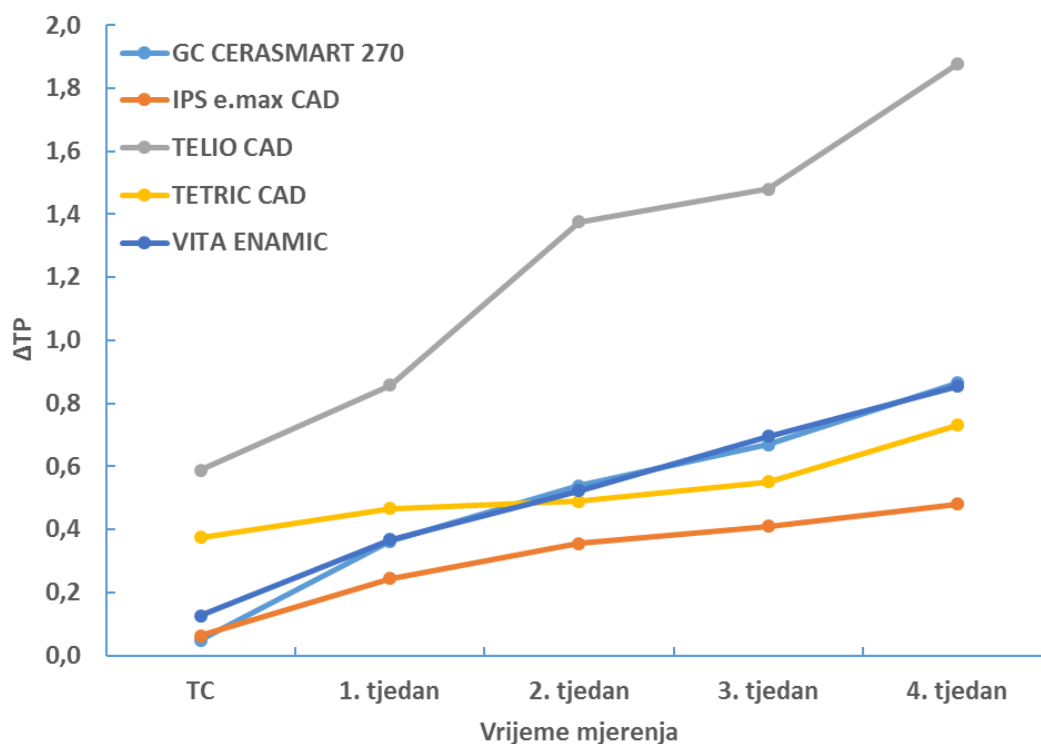


Slika 37d. Promjena translucencije (ΔTP) - 1 mm – Crveno vino

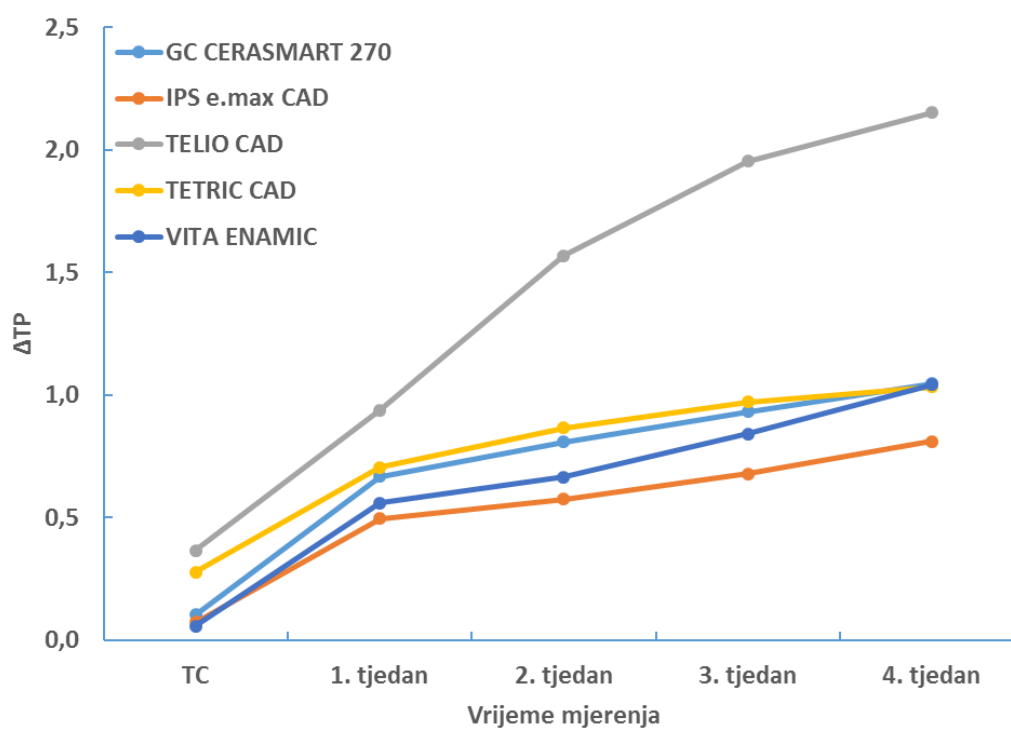
Tablica 16. Promjena translucencije (ΔTP) - 2 mm

Materijal	Tekućina	TC		1. tjedan		2. tjedan		3. tjedan		4. tjedan	
		Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.	Sr.vr.	St.dev.
GC CERASMART 270	Destilirana voda	0,09	0,05	0,16	0,02	0,24	0,02	0,34	0,02	0,38	0,02
	Crni čaj	0,05	0,02	0,36	0,01	0,54	0,01	0,67	0,02	0,86	0,04
	Instant kava	0,10	0,05	0,67	0,02	0,81	0,02	0,93	0,02	1,05	0,04
	Crveno vino	0,11	0,04	0,97	0,02	1,30	0,01	1,69	0,04	2,06	0,05
IPS e.max CAD	Destilirana voda	0,06	0,02	0,11	0,00	0,14	0,01	0,19	0,01	0,23	0,00
	Crni čaj	0,06	0,01	0,24	0,02	0,36	0,01	0,41	0,01	0,48	0,01
	Instant kava	0,07	0,02	0,50	0,01	0,57	0,01	0,68	0,01	0,81	0,02
	Crveno vino	0,06	0,03	0,91	0,01	1,19	0,01	1,35	0,03	1,96	0,03
TELIO CAD	Destilirana voda	0,52	0,11	0,67	0,09	0,64	0,09	1,11	0,08	1,35	0,04
	Crni čaj	0,59	0,16	0,86	0,02	1,38	0,07	1,48	0,04	1,88	0,03
	Instant kava	0,37	0,14	0,94	0,03	1,57	0,02	1,95	0,03	2,15	0,08
	Crveno vino	0,48	0,12	1,52	0,07	1,97	0,02	2,16	0,04	2,46	0,03
TETRIC CAD	Destilirana voda	0,30	0,02	0,32	0,01	0,35	0,02	0,41	0,02	0,45	0,01
	Crni čaj	0,38	0,03	0,47	0,02	0,49	0,02	0,55	0,03	0,73	0,02
	Instant kava	0,28	0,07	0,70	0,05	0,87	0,01	0,97	0,02	1,03	0,02
	Crveno vino	0,33	0,03	1,03	0,03	1,52	0,03	1,86	0,03	2,07	0,03
VITA ENAMIC	Destilirana voda	0,09	0,04	0,19	0,02	0,24	0,02	0,28	0,03	0,34	0,01
	Crni čaj	0,13	0,05	0,37	0,02	0,52	0,02	0,70	0,03	0,85	0,03
	Instant kava	0,06	0,05	0,56	0,03	0,67	0,02	0,84	0,02	1,04	0,04
	Crveno vino	0,06	0,07	1,03	0,03	1,28	0,05	1,47	0,06	2,06	0,02

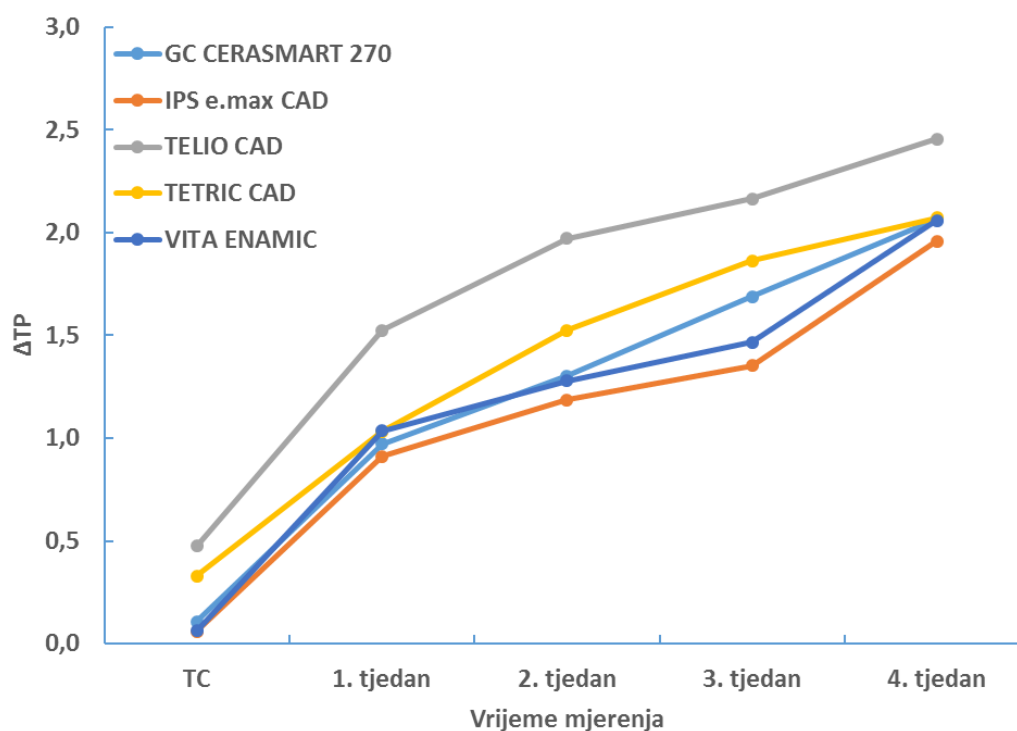
Slika 38a. Promjena translucencije (ΔTP) - 2 mm – Destilirana voda



Slika 38b. Promjena translucencije (ΔTP) - 2 mm – Crni čaj



Slika 38c. Promjena translucencije (ΔTP) - 2 mm – Instant kava

Slika 38d. Promjena translucencije (ΔTP) - 2 mm – Crveno vino

Utjecaj materijala i vrste tekućine na promjenu boje i promjenu translucencije testirana je na podacima mjerenja nakon 4. tjedna. Utjecaj na promjenu translucencije posebno je testiran za uzorke debljine 1 mm i posebno za uzorke debljine 2mm.

Promjena translucencije

ANOVA test za promjenu translucencije dao je iste rezultate kao i za promjenu boje. Svi faktori (vrsta materijala, vrsta tekućine, debljina uzorka i vrijeme) su značajni isto kao što su sve interakcije značajne (tablica 17).

Tablica 17. Utjecaj faktora na promjenu translucencije (ΔTP) (ANOVA)

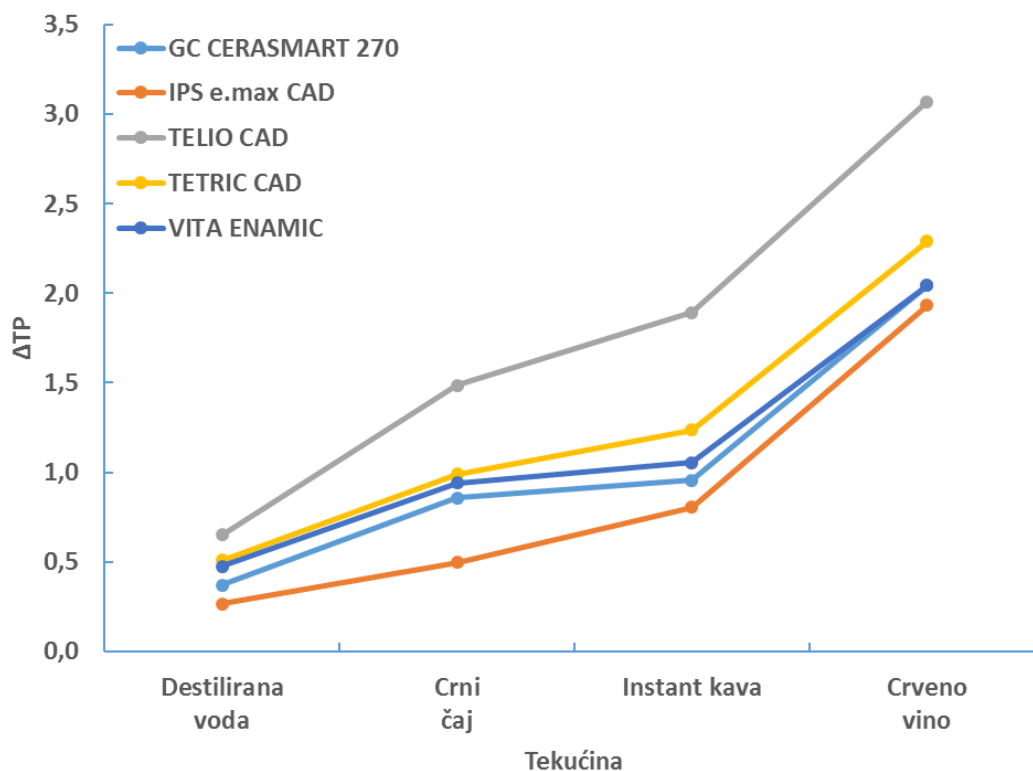
Izvor	Stupnjevi slobode	Suma kvadrata	Srednja suma kvadrata	F	p-vrijednost
Model	43	312,85	7,28	120,17	<0.0001
Materijal	4	54,93	13,73	226,82	<0.0001
Tekućina	3	129,03	43,01	710,42	<0.0001
Materijal*Tekućina	12	1,82	0,15	2,50	0,0031
Debljina uzorka	1	0,04	0,04	0,60	0,44
Materijal*Debljina uzorka	4	2,03	0,51	8,39	<0.0001
Tekućina*Debljina uzorka	3	0,24	0,08	1,32	0,27
Materijal*Tekućina*Debljina uzorka	12	1,21	0,10	1,66	0,07
Vrijeme	4	123,55	30,89	510,19	<0.0001
Pogreška	956	57,88	0,06		
Ukupno	999	370,73			

Prvo je ispitan utjecaj vrste materijala i vrste tekućine na promjenu translucencije. Tukeyev 'post-hoc' test je pokazao da između GC CERASMART-a 270 i VITA ENAMIC-a nema razlike u promjeni translucencije za sve vrste tekućina. Nadalje, od ova dva materijala se ne razlikuje niti TETRIC CAD ukoliko je korišten crni čaj. Ostale razlike između materijala su statistički značajne kao i razlike između svih vrsta tekućina za svih pet vrsta materijala. Detaljna usporedba utjecaja vrste materijala i vrste tekućine na promjenu translucencije prikazana je u tablicama 18 i 19 te slikama 39 i 40

Tablica 18. Promjena translucencije (ΔTP) - 1 mm - nakon 4. tjedna (ANOVA)

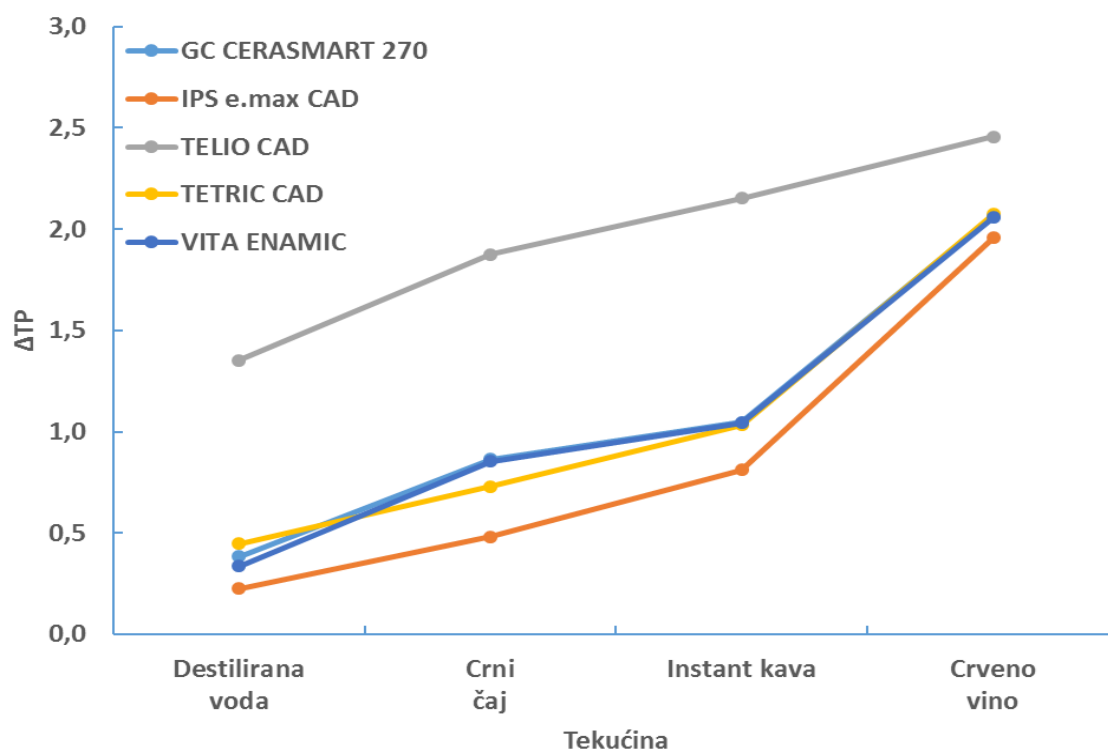
Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,37 ^a	0,86 ^b	0,96 ^c	2,04 ^d
IPS e.max CAD	0,27	0,50	0,81	1,93
TELIO CAD	0,65	1,49	1,89	3,07
TETRIC CAD	0,51	0,99 ^b	1,24	2,29
VITA ENAMIC	0,48 ^a	0,94 ^b	1,05 ^c	2,04 ^d

^{a,b,c,d} Tukeyev 'post-hoc' test, isto slovo označava materijale koji se međusobno ne razlikuju

Slika 39. Promjena translucencije (ΔTP) - 1 mm - nakon 4. tjedna (ANOVA)Tablica 19. Promjena translucencije (ΔTP) - 2 mm - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,38 ^a	0,86 ^b	1,05 ^c	2,06 ^d
IPS e.max CAD	0,23	0,48	0,81	1,96
TELIO CAD	1,35	1,88	2,15	2,46
TETRIC CAD	0,45	0,73 ^b	1,03	2,07
VITA ENAMIC	0,34 ^a	0,85 ^b	1,04 ^c	2,06 ^d

^{a,b,c,d} Tukeyev 'post-hoc' test, isto slovo označava materijale koji se međusobno ne razlikuju



Slika 40. Promjena translucencije (ΔTP) - 2 mm - nakon 4. tjedna (ANOVA)

Usporedba utjecaja vrste materijala na promjenu translucencije jasno pokazuje sljedeći redoslijed:

$$\text{TELIO CAD} > \text{TETRIC CAD} \geq \text{VITA ENAMIC} = \text{GC CERASMART 270} > \text{IPS E.MAX CAD}$$

Usporedba utjecaja vrste tekućine na promjenu translucencije pokazuje redoslijed:

$$\text{Crveno vino} > \text{Instant kava} > \text{Crni čaj} > \text{Destilirana voda}$$

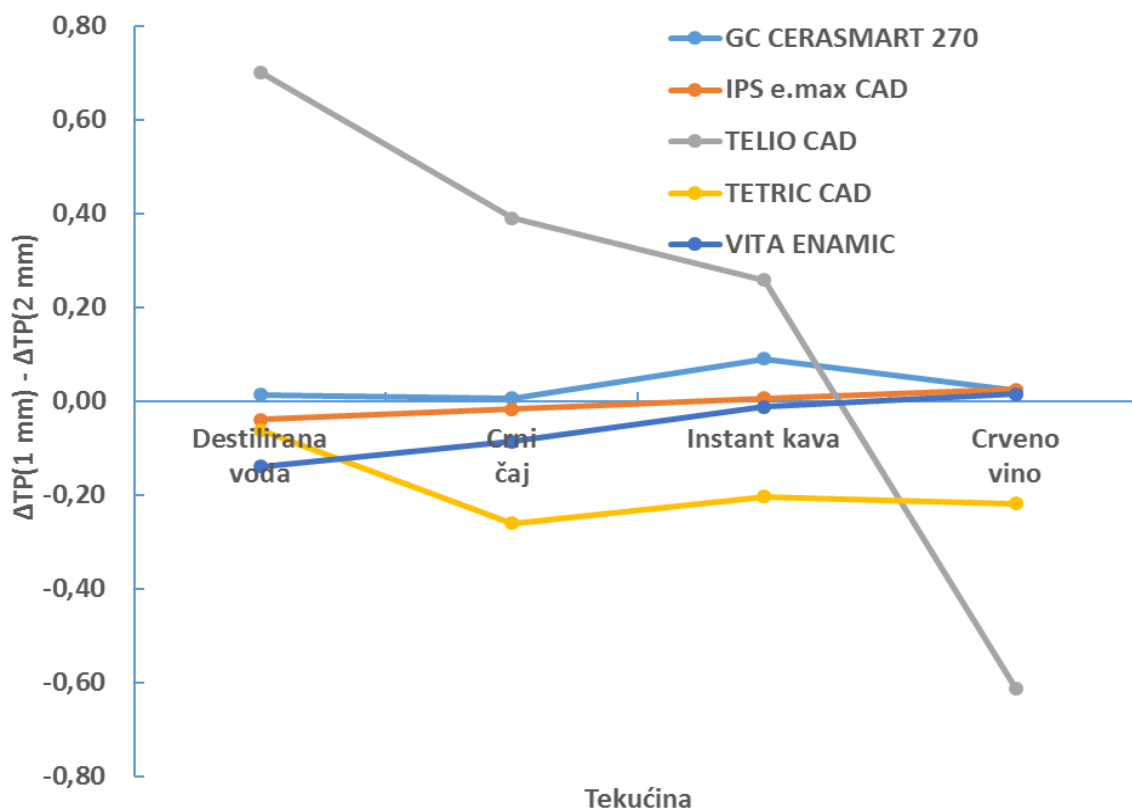
Promjena translucencije za TETRIC CAD ne razlikuje se od GC CERASMART-a 270 i VITA ENAMIC-a ukoliko je kao tekućina korišten crni čaj.

Debljina uzorka značajno utječe na promjenu translucencije, bez obzira na vrstu materijala i vrstu tekućine ($p < 0.0001$, ANOVA test; Tablica 17). Razlika u promjeni translucencije između uzoraka debljine 1 mm i debljine 2 mm dobije se usporedbom tablica 18 i 19. Sažeti prikaz dan je u tablici 20 i slici 41. Prikazana je razlika promjene translucencije za uzorke debljine 1 mm

i debljine 2 mm: $\Delta TP(2 \text{ mm}) - \Delta TP(1 \text{ mm})$. Jer je promjena translucencije negativna, pozitivna razlika znači da je translucencija veća za uzorke debljine 1 mm. U tablici 20 vidimo da je za polovicu kombinacija materijala i tekućina promjena translucencije veća za uzorke debljine 1 mm (za 10 slučajeva je razlika pozitivna). Za TETRIC CAD je promjena translucencije znatno veća za uzorke debljine 1 mm za sve tekućine dok je za TELIO CAD promjena translucencije znatno veća za uzorke debljine 2 mm kod tri tekućine a za uzorke debljine 1 mm samo za crveno vino. Budući da su u ANOVA testu (tablica 17) sve interakcije koje uključuju faktor debljina uzorka nesignifikantne, nemamo osnove reći da je ovo ponašanje posljedica različitih materijala ili vrste tekućine. Aritmetička sredina razlika iz tablice 19 je negativna (-0,12) te možemo zaključiti da je promjena translucencije veća na uzorcima debljine 1 mm.

Tablica 20. Razlika promjene translucencije (ΔTP) između uzorka debljine 1 mm i 2 mm - nakon 4. tjedna

Materijal	Tekućina			
	Destilirana voda	Crni čaj	Instant kava	Crveno vino
GC CERASMART 270	0,01	0,01	0,09	0,02
IPS e.max CAD	-0,04	-0,02	0,01	0,02
TELIO CAD	0,70	0,39	0,26	-0,61
TETRIC CAD	-0,06	-0,26	-0,20	-0,22
VITA ENAMIC	-0,14	-0,09	-0,01	0,02



Slika 41. Razlika promjene translucencije (ΔTP) između uzorka debljine 1 mm i 2 mm - nakon 4. tjedna

Utjecaj proteklog vremena značajno utječe na promjenu translucencije ($p < 0.0001$, ANOVA test; Tablica 17). Iz tablica 15 i 16 i slika 37a, 37b, 37c, 37d, 38a, 38b, 38c i 38d vidimo da se protekom vremena promjena translucencije povećava.

5. RASPRAVA

Moderno doba donijelo je brojne nove tehnologije i materijale u stomatologiju. Značajni napreci u stomatološkim materijalima i tehnologiji poboljšali su trajnost i čvrstoću zubnih restauracija te proširili opseg stomatološke protetike kako bi se zadovoljila rastuća estetska očekivanja i zahtjevi pacijenata. Sve veća potražnja za vrhunskom estetikom, dovela je do povećane upotrebe estetskih materijala. Razvojem CAD/CAM tehnologije, područje protetskih restauracija bez metala značajno je prošireno i poboljšano. Ključni cilj u estetskoj stomatologiji je stvaranje restauracija koje što vjernije oponašaju izgled prirodnih zuba. Estetski materijali karakterizirani su dobrim optičkim svojstvima i biokompatibilnošću, što ih čini posebno prikladnima za visoko estetske restauracije (44, 88, 89). Unatoč napretku estetskih dentalnih materijala, uključujući poboljšanja u biokompatibilnosti te poboljšanje mehaničkih i optičkih svojstava, uspjeh estetskih restauracija prvenstveno ovisi o odabiru odgovarajućeg materijala. Stabilnost boje i translucencije, ključna je klinička karakteristika za sve dentalne materijale. Svako odstupanje ukazuje na starenje ili propadanje materijala. Promjena boje i translucencije, tijekom dugotrajne kliničke uporabe pripisuje se raznim čimbenicima, uključujući nakupljanje mrlja, otapanje komponenti materijala, apsorpciju vode i hrapavost površine. Pića poput čaja, kave, vina, kiselih gaziranih napitaka i drugih umjetnih boja za hranu, mogu utjecati na te promjene. Isto kao neprikladna oralna higijena i upotreba sredstava za oralnu higijenu na bazi klorheksidina (90 – 93).

Kako bi zadovoljili rastuće estetske zahtjeve pacijenata, stomatolozi moraju bolje razumjeti optičke osobine stomatoloških materijala.

Boja se obično opisuje korištenjem Munsellovog sustava boja, koji se opisuje kao trodimenzionalni fenomen, koji se sastoji od nijanse, svjetline i zasićenosti. U Munsellovom sustavu, proces počinje određivanjem svjetline boje, zatim njezine zasićenosti, a na kraju se nijansa identificira usporedbom boje s odgovarajućim tablicama nijansi na temelju prethodno određene svjetline i zasićenosti (94, 95). Kada svjetlost dolazi u kontakt s površinom materijala, prolazi kroz refleksiju, refrakciju i apsorpciju. Podpovršinsko raspršivanje je optički efekt pri kojem svjetlost ulazi u površinu materijala, raspršuje se unutar njega i zatim izlazi uglavnom kroz površinu. Ovaj fenomen podpovršinskog raspršivanja ključan je za restorativne materijale kako bi pokazivali prozirnost i oponašali izgled prirodnih zuba (57). Translucencija, koja se odnosi na sposobnost svjetlosti da prolazi kroz materijal, zauzima stanje između potpune neprozirnosti i prozirnosti i ima značajnu kliničku važnost iz nekoliko razloga: omogućuje

usklađivanje optičkih svojstava zubnih tkiva; pomaže u maskiranju nepoželjnih boja podloge; i pomaže u prijenosu svjetlosti za materijale koji se stvrdnjavaju svjetlom (58). U estetskoj stomatologiji, translucencija se izražava pomoću parametra translucencije (TP) definirano od strane internacionalne komisije za osvjetljenje (CIE). Kvantitativno procjenjuje prozirnost mjerenjem razlike u boji u odnosu na bijele i crne pozadine. Više vrijednosti TP ukazuju na veću prozirnost, dok niže vrijednosti TP označavaju manju prozirnost (59, 60). Translucencija je ovisna o sastavu materijala, prvenstveno zbog razlike u refrakciji između punila i organske matrice, količinom punila te veličinom punila (62). Razvoj CAD/CAM tehnologije značajno je proširio i poboljšao područje bezmetalnih protetskih restauracija. Primarna prednost ove tehnologije je mogućnost korištenja homogenih CAD/CAM blokova za izradu estetskih restauracija u okviru jedne posjete. U monokromatske CAD/CAM materijale trenutno ubrajamo staklokeramiku, nanokeramiku, kompozite, polimere i hibridne keramike (96). Restauracije napravljene od litij – disilikatne keramike, prvo se obrađuju u djelomično kristaliziranom obliku, a zatim prolaze kroz proces kristalizacije pečenja kako bi postigle svoju konačnu čvrstoću i estetski potencijal. Mala silikatna kristalića unutar staklenog matriksa litijevog silikata, pokazala su da poboljšavaju prozirnost materijala. Alternativni pristup postizanju optimalnih svojstava u CAD/CAM restaurativnim materijalima—kao što su odgovarajuća prozirnost, lakoća poliranja i visoka otpornost na lom—uključuje kombiniranje prednosti keramike i smola. To je dovelo do razvoja nanokeramika i polimerom infiltriranih keramika, tzv. hibridnih keramika, koje posjeduju zadovoljavajuća mehanička i estetska svojstva (64). Isto tako je određivanje boje, odnosno usklađivanje boje zuba sa protetskim nadomjeskom, jedan od ključnih faktora uspjeha protetske terapije. Točno repliciranje boje prirodnog zuba pomoću restaurativnih materijala predstavlja izazovan zadatak. Odabir odgovarajuće nijanse pod utjecajem je brojnih faktora, a bilo kakve razlike mogu dovesti do nezadovoljavajućih rezultata. Postoje razne digitalne metode određivanja boje poput intraoralni skeneri, digitalne kamere, kolorimetri i spektrofotometri. U ovom istraživanju korišten je spektrofotometar za određivanje boje, kako bi što preciznije bila prikazana promjena u boji i translucenciji nakon termocikliranja i izlaganju obojenim tekućinama.

Spektrofotometri mogu odrediti boju objekta analizom njegove krivulje propusnosti ili spektralne refleksije. Svjetlost u rasponu valnih duljina od 400 do 700 nm emitiraju iz bijelog izvora svjetlosti, koji može biti LED lamp. Svjetlost zatim prolazi kroz prizmu kako bi se

stvorio spektar valnih duljina, obično u rasponu od 10 do 20 nm. Nakon toga, svjetlost se usmjerava na objekt, gdje može doći do raspršenja, prolaska ili refleksije. Spektrofotometar mjeri količinu svjetlosti koju objekt emitira ili propušta za svaku valnu duljinu unutar vidljivog spektra (95). Jedan od najreprezentativnijih dentalnih spektrofotometara je SpectroShade, koji je korišten u ovom istraživanju, precizan i jednostavan je za korištenje. SpectroShade Micro kombinira digitalno snimanje boja i spektrofotometriju baziranu na LED tehnologiji. Memorija uređaja pohranjuje podatke, omogućujući usporedbu dobivenih slika s različitim nijansama. Njegov program može izvršiti mapiranje boja, slati podatke putem e-pošte u laboratorije. SpectroShade Micro može uspoređivati dvije izmjerene nijanse, mapirati nehomogenosti na površini zuba, procjenjivati stanje zuba prije i nakon tretmana, te osigurati da restauracija bude točna replika izvornog zuba. S obzirom da osvjetljenje u prostoriji može značajno utjecati na određivanje boje, zbog svoje promjenjivosti u intenzitetu, vrsti i kutu upada, glavna karakteristika i najveća prednost spektrofotometra je otpornost na promjene uvjeta osvjetljenja.

Iz rezultata prikazanih u ovom istraživanju, jasno je da crno vino uzrokuje najjaču promjenu boje. Međutim, cilj ove studije je odrediti stupanj promjene boje, posebice je li promjena boje klinički prihvatljiva. Stoga su u ovom istraživanju ispitivani stabilnost boje i trajnost najnovijih CAD/CAM materijala. Zbog svog prirodnog i estetskog izgleda, dobrih higijenskih svojstava i otpornosti na trošenje, dentalna keramika je među najpopularnijim restaurativnim materijalima u protetici. Kompoziti su još jedan široko korišten estetski restaurativni materijal u stomatologiji. U usporedbi s keramikom, kompoziti su manje lomljivi, ali imaju nižu stabilnost boje i veću stopu trošenja, što ograničava njihovu upotrebu. Nedostaci ovih popularnih dentalnih restaurativnih materijala doveli su do razvoja novih biomaterijala koji oponašaju fizikalna svojstva prirodnih zuba. Materijali infiltrirani polimerom u keramičkoj mreži (PICN), poznati i kao hibridna keramika, razvijeni su kako bi nadoknadili nedostatke keramike i kompozita. Očekuje se da će PICN materijali biti manje lomljivi, imati veću savojnu čvrstoću i krutost, visoku čvrstoću te da će se lako obrađivati CAD/CAM sustavima. Osim toga, njihova fizikalna svojstva slična su onima prirodnih zuba i uzrokuju manje abrazije na suprotnim zubima u usporedbi s dentalnom keramikom. Dugoročni cilj PICN materijala je potpuno replicirati fizikalna svojstva prirodnih zuba. U skladu s tim ciljem, novi PICN materijali dostupni su na dentalnom tržištu. Znanje o optičkim svojstvima PICN materijala je ograničeno

i malo je izvora u specijaliziranoj literaturi. Osim toga, CAD/CAM blokovi nude višu kvalitetu zbog standardiziranog industrijskog proizvodnog procesa (66, 97).

Ovaj rad istražuje: učinke umjetnog starenja (termocikliranja), utjecaj obojenih tekućina i vremena izloženosti na stabilnost boje, pet različitih monokromatskih CAD/CAM materijala, uključujući CAD/CAM hibridnu keramiku, CAD/CAM kompozit, CAD/CAM litij - disilikatnu keramiku i CAD/CAM polimer. Utvrđene su statistički značajne razlike. Nulta hipoteza je odbijena u ovom istraživanju, jer je izloženost različitim obojenim tekućinama pokazala značajan učinak na promjenu boje određenih CAD/CAM materijala, što je značajno ovisilo o vrsti obojene tekućine, korištenim materijalima i vremenu izlaganja. Pri odabiru restaurativnog materijala mora se uzeti u obzir i dugoročna stabilnost boje, posebno u slučaju novo razvijenih dentalnih materijala (98). Obojene tekućine korištene u ovom istraživanju su: crni čaj, instant kava i crno vino, dok je destilirana voda korištena kao kontrolna tekućina. Debljina uzoraka bila je 1 mm i 2 mm, a boja i translucencija svih odabranih CAD/CAM materijala bila je A2/2M2 – HT, dok se Telio CAD razlikovao u translucenciji A2 – LT.

Mjerenje boje svakog uzorka provedeno je na bijeloj i crnoj podlozi pod D65 izvorom svjetla (6503 K). Promjene boje (ΔE_{00}) svakog uzorka izračunate su na temelju dobivenih $L^*C^*h^*$ vrijednosti. Analiza ΔE_{00} napravljena je u smislu praga percepcije i prihvatljivosti. Sukladno tome, CIEDE2000 prag percepcije (PT) iznosi 0,8, a prag prihvatljivosti (AT) iznosi 1,8 (77, 79).

IPS e.max CAD je tek nakon četiri tjedna izlaganja crvenom vinu, pokazao veću vrijednost od prihvatljive, i to $\Delta E_{00} = 2$ za uzorke debljine 1mm i 2mm. Po stabilnosti slijede hibridni materijali, koji su također tek nakon četiri tjedna izlaganja crvenom vinu pokazala veću ΔE vrijednost od prihvatljive. Za GC Cerasmart 270 $\Delta E_{00} = 2,3$ za uzorke debljine 1mm i 2mm, dok je Vita Enamic pokazao $\Delta E_{00} = 2,4$ za uzorke debljine 1mm i 2mm. Tetric CAD, kao kompozitni CAD/CAM materijal, pokazao je nakon tri tjedna izlaganja instant kavi i crvenom vinu veću vrijednost od 1,8. ΔE_{00} za instant kavu za uzorke debljine 1mm i 2mm iznosio je 2, dok je za crveno vino iznosio 2,4. Telio CAD, koji je sastavljen isključivo od polimetilmetakrilata, je nakon tri tjedna izlaganja crnom čaju, instant kavi i crvenom vinu pokazao veće vrijednosti od prihvatljive. ΔE_{00} za crni čaj iznosio je 2,1, ΔE_{00} za instant kavu 2,2, a vrijednost za crveno vino $\Delta E_{00} = 2,6$. Vrijednosti se odnose na uzorke debljine

1mm i 2mm. Budući da su vrijednosti promjene boje u ovom istraživanju za neke testirane materijale tek prošle prag tolerancije nakon 3 tjedna, a za neke materijale tek nakon četiri tjedna, s napomenom da je u svim slučajevima crveno vino uzrokovalo najveću promjenu, rezultati se mogu smatrati zadovoljavajućima.

Mjerenje svakog uzorka provedeno je na bijeloj i crnoj podlozi pod D65 izvorom svjetla (6503 K). Parametar translucencije (TP) svakog uzorka izračunat je na temelju dobivenih $L^*C^*h^*$ vrijednosti. Analiza promjene u translucenciji (ΔTP) napravljena je u smislu praga percepcije i prihvatljivosti. Sukladno tome, CIEDE2000 prag percepcije (PT) iznosi 0,6, a prag prihvatljivosti (AT) iznosi 2,6 (99).

Rezultati istraživanja pokazali su da su vrijednosti za sve materijale ispod 2,6. Tako da i za promjenu translucencije, rezultate možemo smatrati zadovoljavajućima.

Stabilnost boje svih testiranih materijala može se pripisati činjenici da se CAD/CAM materijali mogu bolje polirati, nemaju poroznu strukturu i upijaju manje vode kao na primjer PMMA smole. Vita Enamic i GC Cerasmart 270 kategorizirani su kao materijali na bazi smole, čija se matrica sastoji od mreže keramike infiltrirane polimerom. Ova keramička jezgra i njena otpornost na apsorpciju vode vjerojatno objašnjavaju nedostatak promjene boje kod ovih materijala. Nasuprot tome, Telio CAD ima matricu na bazi PMMA, koja je relativno hidrofila i potiče veću razinu apsorpcije vode. Osjetljivost CAD/CAM kompozita kao što je Tetric CAD na promjenu boje može biti pod utjecajem čimbenika kao što su stupanj apsorpcije vode i hidrofilnost kompozitne matrice (100). Općenito, CAD/CAM materijali na bazi kompozita ili hibridnih materijala pokazali su manju stabilnost boje od materijala na bazi staklokeramike. Općenito se pretpostavlja da staklokeramički CAD/CAM materijali imaju veću stabilnost boje od materijala na bazi kompozita. Ovo je u skladu s našim rezultatima, budući da IPS e.max CAD pokazuje bolju stabilnost boje u usporedbi s materijalima na bazi kompozita.

Stabilnost boje staklokeramičkih materijala može biti pod utjecajem različitih čimbenika, uključujući kristalnu strukturu, veličinu zrna i poroznost (96, 101). Ovo istraživanje potvrđuje ranije rezultate istraživanja da crveno vino uzrokuje najveću promjenu boje CAD/CAM materijala. Seyidaliyeva i suradnici usporedili su stabilnost boje polimernih infiltriranih keramika s litijevim disilikatnim keramikama i kompozitima. Najveća promjena boje uočena je kod uzoraka uronjenih u crveno vino. Utvrđeno je da je promjena boje hibridne keramike bila

srednja između litijevih disilikata i kompozita. Osim toga, termocikliranje je imalo utjecaj na promjenu boje, ali je bio ispod granice vidljivosti. Zaključak studije Seyidaliyeye bio je da svi ispitivani čimbenici, kao što su materijal, obojene tekućine i termocikliranje, utječu na promjenu boje (102). Quek i suradnici usporedili su promjene boje direktnih kompozita, indirektnih kompozita, CAD/CAM kompozita i hibridnih keramičkih materijala. Direktni, indirektni i CAD/CAM kompoziti mogu se do određene mjere promijeniti nakon kontakta s obojenim napicima. Čini se da su se CAD/CAM kompoziti bolje ponašali u crnom vinu u usporedbi s direktnim i indirektnim kompozitima, iako su promjene još uvijek bile klinički uočljive (66). Lauvahutanon i suradnici istraživali su razliku u boji različitih CAD/CAM materijala nakon uranjanja u kavu. Vrijednosti ΔE nakon uranjanja u vodu nisu se značajno promijenile, dok su se vrijednosti ΔE nakon uranjanja u kavu značajno povećale s povećanjem vremena uranjanja. Vrijednosti ΔE za tipove materijala nakon uranjanja u kavu bile su značajno različite. Najviše vrijednosti ΔE izmjerene su za CAD/CAM polimer, a slijedi ga hibridni keramički blok (103). Peñate i suradnici odredili su slične vrijednosti ΔE za CAD/CAM polimer kao u ovoj studiji. CAD/CAM polimer bio je uronjen u crveno vino, instant kavu i crni čaj tijekom 30 dana. Promjena boje bila je značajna kod crvenog vina, a slijedile su kava i crni čaj (104). Studija Kula i suradnika, u kojoj je CAD/CAM polimer bio uronjen u čaj i kavu, također je pokazala visoke vrijednosti ΔE nakon 21 dana u obojenim tekućinama (105). Stamenković i sur. procjenjuju učinke bojenja i starenja na promjene boje CAD/CAM nanokeramike, CAD/CAM polimerom infiltriranih keramičkih mreža (PICN) i CAD/CAM litij-disilikatne keramike. Rezultati ove studije sugeriraju da je litij-disilikatna keramika stabilnija u boji od smolne nanokeramike i PICN materijala kada su obojeni kavom i crnim vinom. Osim toga, rezultati promjene boje nakon ubrzanog starenja slični su rezultatima u ovoj studiji (106).

Bojenje uzrokovano kavom i vinom može se objasniti apsorpcijom njihovih pigmenata u organske komponente materijala (107). Crveno vino sadrži alkohol, kiseline, kromogene i tanine, dok je čaj bogat taninima, a kava kromogenima. Promjene boje vjerojatno su uzrokovane kombinacijom faktora, uključujući razgradnju matrice alkoholom i kiselinama, infiltraciju i apsorpciju boja u materijal te površinsko prijanjanje boja zbog povećane hrapavosti površine nakon uranjanja u obojene tekućine. Čaj sadrži oksalnu kiselinu, jabučnu kiselinu i limunsku kiselinu, dok kava sadrži približno 22 različite kiseline. Od tih kiselina, limunska kiselina, octena kiselina, jabučna kiselina i druge kiseline visoke molekularne težine najviše doprinose

ukupnom kiselinskom sadržaju kave (66). Studije su pokazale da popularna pića poput kave, čaja i crnog vina mogu značajno promijeniti mikrostrukturu materijala (108 - 112). Nakon uranjanja u crveno vino, instant kavu i crni čaj, uzorci su pokazali sve veće tamnjenje boje s produljenim uranjanjem. Iz svega ovoga je jasno da kemijski sastav dentalnog materijala ima najveći utjecaj na stabilnost boje u različitim obojanim tekućinama. Staklokeramika je otpornija na obojena sredstva nego smolna keramika (113). Rezultati ovog istraživanja pokazuju da keramički materijal IPS e.max CAD ima najveću stabilnost boje, dok polimer Telio CAD pokazuje najnižu. Rezultati su prikazani koristeći CIEDE2000 formulu razlike u boji (ΔE_{00}), koja ima bolju korelaciju s ljudskom percepcijom boje u usporedbi s CIELab formulom (78). Gomez-Polo i autori navode opravdanu uporabu CIEDE2000 formule, jer se pokazalo kako je korelacija između izmjerenih i percipiranih razlika u boji bila jača kada je korištena formula CIEDE2000 (ΔE_{00}) umjesto CIELab formule (ΔE^*ab) (114). U ovom istraživanju, tumačenja ΔE_{00} napravljena su u smislu praga percepcije i prihvatljivosti. Sukladno tome, CIEDE2000 prag percepcije (PT) iznosi 0,8, a prag prihvatljivosti (AT) iznosi 1,8. Ove vrijednosti su uključene u ISO/TR 28642:201623 i trebale bi se primjenjivati na sva pitanja vezana za kvalitetu usklađivanja boja zuba u stomatologiji. Ovi pragovi mogu poslužiti kao mjera za procjenu kvalitete i mogu pomoći u odabiru estetskih dentalnih materijala, u procjeni njihove učinkovitosti u kliničkoj primjeni te u tumačenju vizualnih i instrumentalnih opažanja, kako u dentalnim istraživanjima tako i u kasnijim procesima standardizacije (77, 79).

Glavno ograničenje ovog istraživanja jest što se oralno okruženje ne može u potpunosti replicirati. Posljedično, rezultati možda ne odražavaju točno kliničku varijabilnost, budući da na stabilnost boje restauracija u ustima mogu utjecati različiti čimbenici poput oralne higijene, konzumacije različitih napitaka i navika poput pušenja. Osim toga, strukture ispod zuba mogu značajno utjecati na estetski ishod korištenja ovih restaurativnih materijala. Čak i u kliničkoj upotrebi, samo je vanjska površina izložena vanjskim utjecajima, dok je unutarnja površina vezana za podlogu. Ipak, istraživanje predstavlja temeljitu istragu čimbenika koji utječu na promjenu boje dentalnih materijala i pruža vrijedne uvide za istraživače i praktičare u ovom području. Stoga, ograničenje ovog istraživanja je, što kliničko okruženje i njegovi učinci na diskoloraciju materijala korištenih u ovom radu nisu u potpunosti simulirani. Naime, promjena boje određena je s obje strane uzoraka, za razliku od kliničke situacije, gdje je jedna strana

pričvršćena za zubnu površinu, što rezultira intenzivnijom diskoloracijom. Uzimajući u obzir važnost boje i optičkih svojstava u dentalnoj medicini, buduća istraživanja trebala bi istražiti ova svojstva u funkciji mikrostrukture i kemijskog sastava materijala, koristeći višeslojne strukture na različitim podlogama. Osim toga, trebalo bi istražiti učinke obojanih tekućina na mikrostrukturu i mehanička svojstva proučavanih materijala.

6. ZAKLJUČCI

Uz ograničavajuće faktore ovog istraživanja zaključeno je da promjena boje i translucencije ovisi o vrsti materijala, obojenoj tekućini, debljini uzorka te proteklog vremena. Različiti estetski monolitni monokromatski CAD/CAM materijali pokazuju statistički značajne razlike u stabilnosti boje i translucenciji nakon termocikliranja i izlaganja obojenim tekućinama:

1. Najveću promjenu boje i translucencije pokazao je TELIO CAD, dok je IPS e.max CAD pokazao najveću stabilnost boje i translucencije među ispitivanim materijalima.
2. Vrsta obojene tekućine značajno utječe na promjenu boje materijala, pri čemu je crveno vino uzrokovalo najveće promjene, zatim instant kava te crni čaj, dok je destilirana voda imala najmanje značajan utjecaj.
3. Debljina uzorka ima statistički značajan utjecaj na promjenu boje i translucencije u svim promatranim uvjetima ($p < 0,0001$). Uzorci debljine 1mm pokazali su veću promjenu od uzoraka debljine 2mm.
4. Promjena boje i translucencije povećava se s vremenom za sve ispitivane materijale ($p < 0,0001$). Nakon tjedan dana izlaganja obojenim tekućinama uzorci su pokazali manje promjene, dok su najveće promjene uočene nakon četiri tjedna.

Promjene boje (ΔE_{00}) svakog uzorka izračunate su na temelju dobivenih $L^*C^*h^*$ vrijednosti. Analiza ΔE_{00} napravljena je u smislu praga percepcije i prihvatljivosti. Sukladno tome, CIEDE2000 prag percepcije (PT) iznosi 0,8, a prag prihvatljivosti (AT) iznosi 1,8. IPS e.max CAD je tek nakon četiri tjedna izlaganja crvenom vinu, pokazao veću vrijednost od prihvatljive, i to $\Delta E_{00} = 2$ za uzorke debljine 1mm i 2mm. Po stabilnosti slijede hibridni materijali, koji su također tek nakon četiri tjedna izlaganja crvenom vinu pokazala veću ΔE vrijednost od prihvatljive. a GC Cerasmart 270 $\Delta E_{00} = 2,3$ za uzorke debljine 1mm i 2mm, dok je Vita Enamic pokazao $\Delta E_{00} = 2,4$ za uzorke debljine 1mm i 2mm. Tetric CAD, kao kompozitni CAD/CAM materijal, pokazao je nakon tri tjedna izlaganja instant kavi i crvenom vinu veću vrijednost od 1,8. ΔE_{00} za instant kavu za uzorke debljine 1mm i 2mm iznosio je 2, dok je za crveno vino iznosio 2,4.

Telio CAD, koji je sastavljen isključivo od polimetilmetakrilata, je nakon tri tjedna izlaganja crnom čaju, instant kavi i crvenom vinu pokazao veće vrijednosti od prihvatljive. ΔE_{00} za crni čaj iznosio je 2,1, ΔE_{00} za instant kavu 2,2, a vrijednost za crveno vino $\Delta E_{00} = 2,6$.

Vrijednosti se odnose na uzorke debljine 1mm i 2mm. Budući da su vrijednosti promjene boje u ovom istraživanju za neke testirane materijale tek prošle prag tolerancije nakon 3 tjedna, a za neke materijale tek nakon četiri tjedna, s napomenom da je u svim slučajevima crveno vino uzrokovalo najveću promjenu, rezultati se mogu smatrati zadovoljavajućima. Parametar translucencije (TP) svakog uzorka izračunat je na temelju dobivenih $L^*C^*h^*$ vrijednosti. Analiza promjene u translucenciji (ΔTP) napravljena je u smislu praga percepcije i prihvatljivosti. Sukladno tome, CIEDE2000 prag percepcije (PT) iznosi 0,6, a prag prihvatljivosti (AT) iznosi 2,6. Rezultati istraživanja pokazali su da su vrijednosti za sve materijale ispod 2,6. Tako da i za promjenu translucencije, rezultate možemo smatrati zadovoljavajućima.

7. LITERATURA

1. Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J.* 2009;28:44-56.
2. Suganna M, Kausher H, Tarek Ahmed S, Sultan Alharbi H, Faraj Alsubaie B, Ds A, Haleem S, Meer Rownaq Ali AB. Contemporary Evidence of CAD-CAM in Dentistry: A Systematic Review. *Cureus.* 2022;14:e31687.
3. Ardila CM, González-Arroyave D. Efficacy of CAD/CAM technology in dental procedures performed by students: A systematic scoping review of randomized clinical trials. *Heliyon.* 2023;9:e15322.
4. Irfan UB, Aslam K, Nadim R. A review on cad cam in dentistry. *J Pak Dent Assoc.* 2015;24:112-116.
5. Amudhalakshmi K, Sethalakhsmi A, Biswas KP. A REVIEW OF CAD -CAM IN DENTISTRY. *J. Indra Gandhi Inst. Med. Sci.* 2016;2:16-21.
6. Patil M, Kambale S, Patil A, Mujawar K. Digitalization in Dentistry: CAD/CAM - A Review. *Acta sci. dent. sci.* 2018;2:12-6.
7. AlRashdi Ak, Mutairi FMA, Aldubaikhi AH, Zaylaee LY, Alharbi AD, Mossa HM. Dental CAD/CAM: a brief review. *IJMDC.* 2020;4:1975-9.
8. Abdullah A, Muhammed F, Zheng B, Liu Y. An Overview of Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM) in Restorative Dentistry. *J Dent Mater Tech.* 2018;7:1-10.
9. Nassani MZ, Ibraheem S, Shamsy E, Darwish M, Faden A, Kujan O. A Survey of Dentists' Perception of Chair-Side CAD/CAM Technology. *Healthcare.* 2021;9:68.
10. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J.* 2008;204:505–11.
11. Uzun G. An Overview of Dental CAD/CAM Systems. *Biotechnol. Equip.* 2004;22:530-5.
12. Kurbad A, Reichel K. Potpuno keramičke krunice za lateralne zube izrađene CAD/CAM tehnikom. In: Baltzer A, Kaufmann – Jinoian V, Kurbad A, Reichel K./ Seifert D, editor. *CAD/CAM i potpuna keramika.* Zagreb: Quintessence; 2009. p. 61.
13. Kurbad A, Reichel K. Potpuno keramičke krunice za lateralne zube izrađene CAD/CAM tehnikom. In: Baltzer A, Kaufmann – Jinoian V, Kurbad A, Reichel K./ Seifert D, editor. *CAD/CAM i potpuna keramika.* Zagreb: Quintessence; 2009. p. 95.

14. Kurbad A, Reichel K. Potpuno keramičke krunice za lateralne zube izrađene CAD/CAM tehnikom. In: Baltzer A, Kaufmann – Jinoian V, Kurbad A, Reichel K./ Seifert D, editor. CAD/CAM i potpuna keramika. Zagreb: Quintessence; 2009. p. 155.
15. Sadowsky SJ. An overview of treatment considerations for esthetic restorations: a review of the literature. *J Prosthet Dent.* 2006;96:433-42.
16. Zarone F, Di Mauro MI, Ausiello P, Ruggiero G, Sorrentino R. Current status on lithium disilicate and zirconia: a narrative review. *BMC Oral Health.* 2019;19:134.
17. Pereira RM, Ribas RG, Montanheiro TLDA, Schatkoski VM, Rodrigues KF, Kito LT, Kobo LK, Campos TMB, Bonfante EA, Gierthmuehlen PC, Spitznagel FA, Thim GP. An engineering perspective of ceramics applied in dental reconstructions. *J Appl Oral Sci.* 2023;31:e20220421.
18. Elmoselhy HAS, Hassanien OES, Haridy MF, Salam El Baz MAE, Saber S. Two-year clinical performance of indirect restorations fabricated from CAD/CAM nano hybrid composite versus lithium disilicate in mutilated vital teeth. A randomized controlled trial. *BMC Oral Health* 2024;24:101.
19. Marchesi G, Camurri Piloni A, Nicolin V, Turco G, Di Lenarda R. Chairside CAD/CAM Materials: Current Trends of Clinical Uses. *Biology (Basel).* 2021;10:1170.
20. Rexhepi I, Santilli M, D'Addazio G, Tafuri G, Manciocchi E, Caputi S, Sinjari B. Clinical Applications and Mechanical Properties of CAD-CAM Materials in Restorative and Prosthetic Dentistry: A Systematic Review. *J. Funct. Biomater.* 2023;14:431.
21. Grzebieluch W, Mikulewicz M, Kaczmarek U. Resin Composite Materials for Chairside CAD/CAM Restorations: A Comparison of Selected Mechanical Properties. *J Healthc Eng.* 2021;2021:1 - 8.
22. Aswal GS, Rawat R, Dwivedi D, Prabhakar N, Kumar V. Clinical Outcomes of CAD/CAM (Lithium disilicate and Zirconia) Based and Conventional Full Crowns and Fixed Partial Dentures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cureus.* 2023;15:e37888.
23. Tribst JPM, Valandro LF, Dal Piva AMO. Brittle dental ceramics: A challenge in dentistry. *Dent Med Probl.* 2024;61:319–21.

24. Floriani F, Abuhammoud S, Rojas-Rueda S, Unnadkat A, Fischer NG, Fu CC, Jurado CA. The Influence of Thickness on Light Transmission for Pre- and Fully Crystallized Chairside CAD/CAM Lithium Disilicate Ceramics. *Materials (Basel)*. 2024;17:2045.
25. Hallmann L, Ulmer P, Kern M. Effect of microstructure on the mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramics. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2018;82:355–70.
26. Pecho OE, Alvarez-Lloret P, Ionescu AM, Cardona JC, Ghinea R, Sánchez-Sánchez P, et al. Influence of microstructure on optical properties of CAD-CAM lithium disilicate glass-ceramics. *Dent Mater*. 2024;40:1927-36.
27. De F Vallerini B, Silva LD, De OC Villas-Bôas M, Peitl O, Zanotto ED, Pinelli LAP. Microstructure and mechanical properties of an experimental lithium disilicate dental glass-ceramic. *Ceram Int*. 2024;50:188–96.
28. Solís Pinargote NW, Yanushevich O, Krikheli N, Smirnov A, Savilkin S, Grigoriev SN, Peretyagin P. Materials and Methods for All-Ceramic Dental Restorations Using Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Manufacturing (CAM) Technologies-A Brief Review. *Dent J (Basel)*. 2024;12:47.
29. Hassan A, Hamdi K, Ali AI, Al-Zordk W, Mahmoud SH. Clinical performance comparison between lithium disilicate and hybrid resin nano-ceramic CAD/CAM onlay restorations: a two-year randomized clinical split-mouth study. *Odontology*. 2024;112:601-15.
30. Solís Pinargote NW, Yanushevich O, Krikheli N, Smirnov A, Savilkin S, Grigoriev SN, Peretyagin P. Materials and Methods for All-Ceramic Dental Restorations Using Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Manufacturing (CAM) Technologies-A Brief Review. *Dent J (Basel)*. 2024;12:47.
31. Mavriqi L, Valente F, Murmura G, Sinjari B, Macrì M, Trubiani O, Caputi S, Traini T. Lithium Disilicate and Zirconia Reinforced Lithium Silicate Glass-Ceramics for CAD/CAM Dental Restorations: Biocompatibility, Mechanical and Microstructural Properties after Crystallization. *J. Dent*. 2022;119:104054.
32. Li C-Y, Jeong K-S, Shin J-S, Shim J-S, Ryu J-J. Translucency and Strength of Lithium Disilicate for Computer-Aided Design and Manufacturing at Different Thermal Temperatures and Thicknesses: An In Vitro Study. *Materials*. 2024; 17:396.

33. Selak A. Kompozitni materijali 2021.-e [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Stomatološki fakultet; 2021 [pristupljeno 03.10.2024.] Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:127:155803>
34. Tarle Z. Kompozitni materijali. Sonda [Internet]. 2004 [pristupljeno 21.10.2024.];10:29-34. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/307953>
35. Vervack V, De Coster P, Vandeweghe S. Clinical Evaluation of Resin Composite CAD/CAM Restorations Placed by Undergraduate Students. *J Clin Med*. 2021;10:3269.
36. Paolone G, Mandurino M, De Palma F, Mazzitelli C, Scotti N, Breschi L, Gherlone E, Cantatore G, Vichi A. Color Stability of Polymer-Based Composite CAD/CAM Blocks: A Systematic Review. *Polymers*. 2023;15:464.
37. Eldafrawy M, Karevan Y, Nguyen JF, Mainjot A. Interblock and intrablock homogeneity of CAD-CAM composites mechanical properties. *Dent Mater J*. 2023;42:780-90.
38. Schmohl L, Roesner AJ, Fuchs F, Wagner M, Schmidt MB, Hahnel S, Rauch A, Koenig A. Acid Resistance of CAD/CAM Resin Composites. *Biomedicines*. 2022;10:1383.
39. Ruse ND, Sadoun MJ. Resin-composite blocks for dental CAD/CAM applications. *J Dent Res*. 2014;93:1232-4.
40. Yamaguchi S, Li H, Sakai T, Lee C, Kitagawa H, Imazato S. CAD-CAM resin composites: Effective components for further development. *Dent Mater*. 2024;40:527-30.
41. Yamaguchi S, Inoue S, Sakai T, Abe T, Kitagawa H, Imazato S. Multi-scale analysis of the effect of nano-filler particle diameter on the physical properties of CAD/CAM composite resin blocks. *Comput Methods Biomech Biomed Eng*. 2017;20:714-9.
42. Tejaswi M, Mahadevan V, Jayakrishnakumar S, Ramakrishnan H, Jeyapalan V, Azhagarasan NS. Comparative evaluation of the flexural strength of two different CAD/CAM-milled PMMA for long-term fixed provisional restorations. *BOHR Int. J. Curr. Res. Dent*. 2023;2:52-9.
43. Hada T, Kanazawa M, Iwaki M, Katheng A, Minakuchi S. Comparison of Mechanical Properties of PMMA Disks for Digitally Designed Dentures. *Polymers (Basel)*. 2021;13:1745.

44. Jain S, Sayed ME, Shetty M, Alqahtani SM, Al Wadei MHD, Gupta SG, Othman AAA, Alshehri AH, Alqarni H, Mobarki AH, Motlaq K, Bakmani HF, Zain AA, Hakami AJ, Sheayria MF. Physical and Mechanical Properties of 3D-Printed Provisional Crowns and Fixed Dental Prosthesis Resins Compared to CAD/CAM Milled and Conventional Provisional Resins: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Polymers (Basel)*. 2022;14:2691.
45. Zafar MS. Prosthodontic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update. *Polymers (Basel)*. 2020;12:2299.
46. Duarte S, Sartori N, Phark JH. Ceramic-Reinforced Polymers: CAD/CAM Hybrid Restorative Materials. *Curr Oral Health Rep*. 2016;3:198–202.
47. Facenda JC, Borba M, Corazza PH. A literature review on the new polymer-infiltrated ceramic-network material (PICN). *J Esthet Restor Dent*. 2018;30:281-6.
48. Jorquera G, Mahn E, Sanchez JP, Berrera S, Prado MJ, Bernasconi V. Hybrid Ceramics in Dentistry: A Literature Review. *J Clin Res Dent*. 2018;1:1-5.
49. Coldea A, Swain MV, Thiel N. Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials. *Dent Mater*. 2013;29:419-26.
50. Ceren N, Turp V, Emir F, Akgüngör G, Ayyildiz S, Şen D. Nanoceramics and hybrid materials used in CAD/CAM systems. *Aydin Dental*. 2016;2:55-62.
51. Al Amri MD, Labban N, Alhijji S, Alamri H, Iskandar M, Platt JA. In Vitro Evaluation of Translucency and Color Stability of CAD/CAM Polymer-Infiltrated Ceramic Materials after Accelerated Aging. *J. Prosthodont*. 2021;30:318–28.
52. Kim SY, Bae HJ, Lee HH, Lee J, Kim YJ, Choi YS, Lee JH, Shin SY. The Effects of Thermocycling on the Physical Properties and Biocompatibilities of Various CAD/CAM Restorative Materials. *Pharmaceutics*. 2023;15:2122.
53. Ongun S, Kurtulmus-Yilmaz S, Meriç G, Ulusoy M. A Comparative Study on the Mechanical Properties of a Polymer-Infiltrated Ceramic-Network Material Used for the Fabrication of Hybrid Abutment. *Materials (Basel)*. 2018;11:1681.
54. Jaiswal S, Vagarali H, Pujar M, Kapshe N. Recent advances and research in aesthetic restorative materials. *Int J Oral Health Dent*. 2020;6:98-102.
55. Oivanen M, Keulemans F, Garoushi S, Vallittu PK, Lassila L. The effect of refractive index of fillers and polymer matrix on translucency and color matching of dental resin composite. *Biomater. Investig. Dent*. 2021;8:48–53.

56. Baby P, Mathew J, Joy J, Hari K. Indirect Aesthetic Restorations in Anterior Dentition- A Review. *Int J Sci Res.* 2020;11:580-4.
57. Cho JH, Han JS, Yoon HI. Effect of translucency of CAD-CAM ceramic restorative materials and scanning aid conditions on the accuracy of intraoral scans. *J Dent Sci.* 2023;18:1212–8.
58. Vichi A, Balestra A, Scotti N, Louca C, Paolone G. Translucency of CAD/CAM and 3D Printable Composite Materials for Permanent Dental Restorations. *Polymers.* 2023;15:1443.
59. Wu Z, Tian J, Wei D, Zhang Y, Lin Y, Di P. Effects of thickness and polishing treatment on the translucency and opalescence of six dental CAD-CAM monolithic restorative materials: an in vitro study. *BMC Oral Health.* 2023;23:1–12.
60. Tango RN, Todorović A, Stamenković D, Karasan DN, Sailer I, Paravina RD. Effect of staining and aging on translucency parameter of CAD-CAM materials. *Acta Stomatol Croat.* 2021;55:2–9.
61. Bauer K, Carek A, Slokar Benić L, Badel T. Determination of the Color Change of Various Esthetic Monolithic Monochromatic Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing Materials. *Materials.* 2024;17:3160.
62. Gasparik C, Culic B, Varvara MA, Grecu A, Burde A, Dudea D. Effect of accelerated staining and bleaching on chairside CAD/CAM materials with high and low translucency. *Dent Mater J.* 2019;38:987–93.
63. Sen N, Us YO. Mechanical and optical properties of monolithic CAD-CAM restorative materials. *J Prosthet Dent.* 2018;119:593-9.
64. Kang SH, Chang J, Son HH. Flexural strength and microstructure of two lithium disilicate glass ceramics for CAD/CAM restoration in the dental clinic. *Restor Dent Endod.* 2013;38:134.
65. Tejaswi M, Mahadevan V, Sampathkumar J, Ramakrishnan H, Vidhya J. Comparative evaluation of the flexural strength of two different CAD/CAM-milled PMMA for long-term fixed provisional restorations. *BOHR Int J Cur. Res Dent.* 2024;2:52-9.
66. Quek SHQ. Ya, AUJ, Rosa V, Tan KBC, Teoh KH. Effect of staining beverages on color and translucency of CAD/CAM composites. *J Esthet Restor Dent.* 2018;30:E9–E17.

67. Shamey R. Newton,(Sir) Isaac. In Encyclopedia of Color Science and Technology. Cham: Springer International Publishing 2023;pp. 1225-30.
68. Stokley SR. Historic look on color theory. Honors Theses – Providence Campus Johnson & Wales University 2018.
69. Adams CR. *Tuning the Rainbow: Science, Imagination, and Color in the Age of Newton*. University Park (PA): Pennsylvania State University Press; 2016.
70. Ragain JC. A Review of Color Science in Dentistry: The Process of Color Vision. J Dent Oral Disord Ther. 2015;3:1-4.
71. Ragain JC. A Review of Color Science in Dentistry: Colorimetry and Color Space. J Dent Oral Disord Ther. 2016;4: 1-5.
72. Vadher R, Parmar G, Kanodia S, Chaudhary A, Kaur M, Savadhariya T. (2014). Basics of color in dentistry: A review. IOSR J Dent Med Sci. 2014;13:78-85.
73. Komugović A. Prostor boja [Završni rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu: Grafički fakultet; 2015.
74. Koschan A, Abidi MA. Color spaces and color distances. In Digital Color Image Processing. 2008;1:37-44
75. Ledić K. Ispitivanje optičkih svojstava zubnih keramika [Disertacija]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu: Stomatološki fakultet; 2015.
76. ISO/CIE 11664-4:2019 - Colorimetry – Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space .
77. ISO/CIE 11664-6:2014 - Colorimetry – Part 6: CIEDE2000 Colour-difference formula.
78. CIE 15:2004 Colorimetry, 3rd ed. International Commission on Illumination: Wiena, Austria, 2004.
79. Paravina RD, Pérez MM, Ghinea R. Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry: A comprehensive review of clinical and research applications. J Esthet Restor Dent. 2019;31:103–12.
80. Dudkiewicz K, Łacinik S, Jedliński M, Janiszewska-Olszowska J, Grocholewicz K. A Clinician's Perspective on the Accuracy of the Shade Determination of Dental Ceramics-A Systematic Review. J Pers Med. 2024;14:252.
81. Chu SJ, Trushkowsky RD, Paravina RD. Dental color matching instruments and systems. Review of clinical and research aspects. J Dent. 2010;38(2):e2-16.
82. <https://www.vita-zahnfabrik.com/en/VITA-classical-A1-D4-shade-guide-39699,27568.html>.

83. Alnusayri MO, Sghaireen MG, Mathew M, Alzarea B, Bandela V. Shade Selection in Esthetic Dentistry: A Review. *Cureus*. 2022;14:e23331.
84. Jouhar R, Ahmed MA, Khurshid Z. An Overview of Shade Selection in Clinical Dentistry *Appl Sci*. 2022;12:6841.
85. Burkinshaw SM. Colour in relation to dentistry. *Fundamentals of colour science*. Br Dent J. 2004;196:33-41.
86. Odaira C, Itoh S, Ishibashi K. Clinical evaluation of a dental color analysis system: The Crystaleye Spectrophotometer®. *J Prosthodont Res*. 2011;55:199-205.
87. VITA Easyshade LITE: Precise tooth shade determination is just a click away. *Br Dent J*. 2023;234:769.
88. Baltzer A, Kurbad A. CAD/CAM und Vollkeramik—Ästhetische Restaurationen; Quintessenz Verlags-GmbH: Berlin, Germany, 2007; pp.1–327.
89. Fidan M, Tuncdemir MT. Investigation of the Effect of Whitening Mouthwashes on the Translucency of Resin Composites at Different Times. *Eng Proc*. 2023;31:6.
90. Guler S, Unal M. The Evaluation of Color and Surface Roughness Changes in Resin based Restorative Materials with Different Contents After Waiting in Various Liquids: An SEM and AFM study. *Microsc Res Tech*. 2018;81:1422–33.
91. Yerliyurt K, Sarikaya I. Color stability of hybrid ceramics exposed to beverages in different combinations. *BMC Oral Health*. 2022;22:180.
92. Abdou A, Takagaki T, Alghamdi A, Tichy A, Nikaido T, Tagami J. Bonding performance of dispersed filler resin composite CAD/CAM blocks with different surface treatment protocols. *Dent Mater J*. 2021;40:209–19.
93. Skorulska A, Piszko P, Rybak Z, Szymonowicz M, Dobrzyński M. Review on polymer, ceramic and composite materials for CAD/CAM indirect restorations in dentistry-application, mechanical characteristics and comparison. *Materials*. 2021;14(7):1592.
94. Sikri VK. Color: Implications in dentistry. *J Conserv Dent*. 2010;13:249-55.
95. Thejashree N, Vanamala N, Keshava Prasad BS. The Importance of color In Dentistry: A Review. *Asian J Den Sci*. 2024;6:376-84.
96. Eldwakhly E, Ahmed DRM, Soliman M, Abbas MM, Badrawy W. Color and translucency stability of novel restorative CAD/CAM materials. *Dent Med Probl*. 2019;56:349-56.

97. Özarslan MM, Büyükkaplan U,S, Barutçigil Ç, Arslan M, Türker N, Barutçigil K. Effects of different surface finishing procedures on the change in surface roughness and color of a polymer infiltrated ceramic network material. *J Adv Prosthodont*. 2016;8:16–20.
98. Eftekhari Ashtiani R, Beyabanaki E, Razmgah M, Salazar A, Revilla-León M, Zandinejad A. Color Stability of Resin Hybrid Ceramic Materials in Comparison to Zirconia-Reinforced Lithium Silicate Ceramic. *Front Dent*. 2023;20:37.
99. Salas M, Lucena C, Herrera LJ, Yebra A, Della Bona A, Pérez MM. Translucency thresholds for dental materials. *Dent Mater*. 2018;34:1168-74.
100. Sulaiman TA, Suliman AA, Mohamed EA, Rodgers B, Alta KA, Johnston WM. Optical properties of bisacryl-, composite-,ceramic- resin restorative materials: An aging simulation study. *J Esthet Restor Dent*. 2021;33:913–8.
101. Choi SH, Shim HW, Lee HH, Ahn JS, Kim YJ, Shin SY, Lee JH, Choi YS. Effects of ultraviolet weathering aging on the color stability and biocompatibility of various computer-aided design and computer-aided manufacturing glass-ceramic materials. *J Dent*. 2023;139:104746.
102. Seydaliyeva A, Rues S, Evagorou Z, Hassel AJ, Rammelsberg P, Zenthöfer A. Color stability of polymer-infiltrated-ceramics compared with lithium. *J Esthet Restor Dent*. 2020;32:43–50.
103. Lauvahutanon S, Shiozawa M, Takahashi H, Iwasaki,N, Oki M, Finger WJ, Arksornnukit M. Discoloration of various CAD/CAM blocks after immersion in coffee. *Restor Dent Endod*. 2017;42:9–18.
104. Peñate L, Mercade M, Arregui M, Roig M, Basilio J, Cedeño R. Color Stability of CAD/CAM Interim Material for Long-Term Fixed Dental Prostheses vs. Conventional Materials after Immersion in Different Staining Solutions. *J Compos Sci*. 2021;5:106.
105. Kul E, Abdulrahim R, Bayındır F, Matori KA, Gül P. Evaluation of the color stability of temporary materials produced with CAD/CAM. *Dent Med Probl*. 2021;58:187–91.

106. Stamenković DD, Tango RN, Todorović A, Karasan D, Sailer I, Paravina RD. Staining and aging-dependent changes in color of CAD-CAM materials. *J Prosthet Dent.* 2021;126:672–8.
107. Guler AU, Yilmaz F, Kulunk T, Guler E, Kurt S. Effects of different drinks on stainability of resin composite provisional restorative materials. *J Prosthet Dent.* 2005;94:118–24.
108. Brito MG, Amaral FL, Turssi CP, Hofling RT, França FM. Effect of chemical or mechanical finishing/polishing and immersion in staining solutions on the roughness, microhardness, and color stability of CAD-CAM monolithic ceramics. *Acta Odontol Latinoam.* 2023;36:86–95.
109. Saba DA, Salama RA, Haridy R. Effect of different beverages on the colorstability and microhardness of CAD/CAM hybrid versus feldspathic ceramic blocks: An in-vitro study. *Futur Dent J.* 2017;3:61–6.
110. Sudani H, Agha M. Influence of aging, beverages, and mouth wash solutions on the microstructural and color stability of different dental ceramics: An in vitro study. *Georgian Med News.* 2024;346:135–9.
111. Bagheri R, Burrow MF, Tyas M. Influence of food-simulating solutions and surface finish on susceptibility to staining of aesthetic restorative materials. *J Dent.* 2005;33:389–98.
112. Kang YA, Lee HA, Chang J, Moon W, Chung SH, Lim BS. Color Stability of Dental Reinforced CAD/CAM Hybrid Composite Blocks Compared to Regular Blocks. *Materials.* 2020;13:4722.
113. Naffah N, Ounsi H, Ozcan M, Salameh Z. Evaluation of the Color Stability of Three Resin-Ceramic Materials Using a Spectrophotometer and a Digital Photography Software. *Contemp Clin Dent.* 2024;15:44–50.
114. Gómez-Polo C, Muñoz M P, Lorenzo Luengo MC, Vicente P, Galindo P, Martín Casado A M. Comparison of the CIELab and CIEDE2000 color difference formulas. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 2016;115:65–70.

8. ŽIVOTOPIS

Katarina Bauer (rođ. Šturman) rođena je 10. travnja 1988. godine u Zaboku. Osnovnu školu upisala i završila je u Münchenu. Nakon osnovne škole pohađala je opći smjer Gimnazije u Münchenu, te je maturirala 2007. Iste godine upisala je školu smjera „Dentalni asistent“ u Münchenu i završila je 2009. Stomatološki fakultet upisala je 2009., te je isti apsolvirala 2017. godine i započela je rad kao doktor dentalne medicine u Domu Zdravlja u Bedekovčini. Područja njezinog interesa su fiksna protetika i estetska stomatologija. Poslijediplomski doktorski studij upisala je 2020. godine.

**i) Radovi objavljeni u časopisima u WoS Science Citation Indexu Expanded (WoS SCIE)
- kvartil prema Journal Citation Reports (JCR)**

1. **Bauer K**, Carek A, Slokar Benić L, Badel T. Determination of the Color Change of Various Esthetic Monolithic Monochromatic Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing Materials. *Materials*. 2024;17:3160. (Q2) *rad proizašao iz doktorskog istraživanja*

ii) Radovi objavljeni u časopisima u drugim bazama (WoS ESCI, Scopus itd.)

1. Slokar Benić L, Benković A, Blažević F, **Bauer K**, Carek A. Femtosecond lasers in dental medicine: Applications and enviromental benefits. Rad prihvaćen za objavu u časopisu „The Holistic Approach to Enviroment” u broju 3, 2026.

iii) Sažetci s međunarodnih i domaćih kongresa

1. **Bauer K**, Carek A. Procjena promjene boje različitih estetskih CAD/CAM materijala pomoću spektrofotometra – prikaz metodologije. 8. međunarodni kongres Stomatološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 8. - 9. travnja 2022 (*međunarodni, oralna prezentacija rezultata doktorata*)
2. **Bauer K**, Carek A, Slokar Benić L, Kranjčić J. Time-dependent translucency changes of dental materials after exposure to common beverages. 12. međunarodni kongres Stomatološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 20. - 21. ožujka 2026 (*međunarodni, oralna prezentacija rezultata doktorata*)