



**RESEARCH,
INNOVATION AND
SCIENCE CENTER**

UNIVERSITY OF ZAGREB SCHOOL OF DENTAL MEDICINE

UNIVERSITY OF ZAGREB
SCHOOL OF DENTAL MEDICINE
10000 Zagreb, Gundulićeva 5

RESEARCH, INOVATION AND SCIENCE CENTER

DIGIT PROJECT

CATALOG OF ANALYTICAL METHODS AND RESEARCH SERVICES OF THE SCHOOL OF DENTAL MEDICINE, UNIVERSITY OF ZAGREB

Zagreb, 30.6.2026.

Version 1.0

Contents

1. Polymerization kinetics of dental resin composites (measured using a FTIR spectrometer).....	3
1a. Kinetika polimerizacije dentalnih smolastih kompozita (mjereno FTIR spektrometrom)	5
2. Mechanical properties (measured using a universal testing machine)	8
2a. Mehanička svojstva (mjereno pomoću univerzalnog ispitnog stroja)	9
3. Light transmittance through composite material (measured using a visible light spectrometer)	11
3a. Prolaz svjetlosti kroz kompozit (mjereno spektrometrom vidljivog područja).....	12
4. Temperature changes during composite polymerization (measured using a thermographic camera)	14
4a. Promjene temperature tijekom polimerizacije kompozita (mjereno korištenjem termografske kamere)	14
5. Surface roughness (measured using a profilometer)	16
5a. Hrapavost površine (mjereno korištenjem profilometra).....	16
6. Color changes on material surface (measured using a visible-light spectrophotometer)	18
6a. Promjene boje na površini materijala (mjereno spektrofotometrom vidljive svjetlosti)	18
7. Surface microhardness (measured using a Vickers microhardness tester).....	19
7a. Površinska mikro-tvrdoća (mjerena Vickersovim uređajem za ispitivanje mikro-tvrdoće).....	19
8. Composite material mixing (using a dual asymmetric mixer)	21
8a. Miješanje kompozitnih materijala (pomoću dualnog asimetričnog miksera)	21
9. Quantitative colorimetric analysis (using a UV-vis spectrometer)	23
9a. Kvantitativna analiza boje primjenom kolorimetrije (pomoću UV-Vis spektrofotometra)	23
10. Long-term mass changes + water sorption and solubility according to ISO 4049 (measured using an analytical balance)	25
10a. Dugoročne promjene mase + apsorpcija vode i topljivost prema ISO 4049 (mjereno analitičkom vagom)	25
11. Depth of cure of light-cured composite materials according to ISO 4049	27
11a. Dubina polimerizacije svjetlosno polimerizirajućih kompozitnih materijala prema ISO 4049	27
12. Artificial aging of dental materials (thermocycling and aggressive chemical media)	28
12a. Umjetno starenje dentalnih materijala (termocikliranje i agresivni kemijski mediji)	28

1. Polymerization kinetics of dental resin composites (measured using a FTIR spectrometer)

We evaluate how effectively a composite material hardens under curing light by monitoring its chemical transformation in real time.

A small sample of the material is placed directly on a highly sensitive infrared sensor and exposed to a clinically relevant curing light. As the material transitions from a soft, moldable state into a solid polymer, the instrument continuously tracks the concentration of specific chemical bonds that are responsible for this transformation. This allows us to measure **how fast and how completely the reaction occurs over time**.

We can test materials at **different layer thicknesses** (for example, very thin films versus clinically relevant 2 mm layers, or 4 mm layers for some specific materials). This enables us to assess how effectively light penetrates through the material and how curing performance changes with layer thickness. In practical terms, this simulates real clinical situations where insufficient light penetration can lead to incomplete curing in deeper regions.

The method provides several key outputs:

- **Extent of curing (degree of conversion):** how much of the material has chemically reacted
- **Curing speed:** how quickly the material reaches its hardened state
- **Reaction profile over time:** whether curing is smooth, delayed, or inhibited
- **Depth-dependent performance:** how curing efficiency changes between surface and deeper layers

Because the measurement is continuous over a desired time period (several minutes to several hours), we obtain a **full curing “profile”** rather than a single endpoint value. This makes it possible to detect subtle differences between materials.

The setup replicates clinical conditions, including realistic light intensity and exposure times, ensuring that the results are directly relevant to real-world use.

From a business and product development perspective, this method allows us to:

- Rapidly compare new formulations of experimental materials against benchmarks
- Identify materials that cure faster or more completely
- Demonstrate performance advantages linked to composition or technology
- Verify product claims related to curing efficiency, depth of cure, and clinical reliability

In addition to basic curing performance, this approach can be used to derive **indirect indicators of clinical behavior**. By analyzing how quickly the material reaches its peak reaction rate and how the reaction progresses over time, we can identify curing profiles that may be associated with higher or lower internal stress development, which is relevant for marginal integrity and long-term stability. This enables early-stage screening of formulations for potential performance risks before more complex mechanical testing is required.

The method can also be adapted to **simulate real-world clinical variability** by adjusting parameters such as layer thickness, exposure time, and distance or positioning of the curing light. This allows us to evaluate how sensitive a material is to suboptimal curing conditions and to



determine how reliably it performs in everyday clinical scenarios where ideal conditions are not always achieved. Beyond the initial light exposure, the system can be used to monitor **post-cure behavior**, capturing continued chemical reactions that occur after the light is switched off. This provides insight into how the material evolves over time, including whether additional conversion contributes to improved mechanical properties.

From a broader perspective, polymerization kinetics can be integrated with other measurements, such as light transmission or mechanical testing, to create a more comprehensive understanding of material performance. This enables a direct link between formulation, curing behavior, and functional outcomes, supporting both product optimization and differentiation.

Finally, the quantitative nature of this method makes it suitable for **supporting product claims and regulatory documentation**, such as demonstrating efficient curing at clinically relevant depths, high degree of conversion, or robust performance under varying conditions.

An infrared spectrometer equipped with a microscope allows us to map conversion across different regions of a specimen with high positional accuracy. For example, we can assess how curing efficiency changes with depth by measuring conversion at multiple points from the irradiated surface toward deeper layers, effectively visualizing curing gradients caused by light attenuation. In addition, the technique can be used to examine **localized effects at critical interfaces**, such as between adhesive layers and overlying composites, or in the vicinity of defects, voids, or inclusions, where curing may be compromised. This makes it possible to identify heterogeneities that are not detectable with bulk measurements. From a product development perspective, this provides a powerful tool for verifying uniformity of polymerization, optimizing layer thickness recommendations, and demonstrating reliable curing performance under simulated clinical conditions.



1a. Kinetika polimerizacije dentalnih smolastih kompozita (mjereno FTIR spektrometrom)

Procjenjujemo koliko učinkovito kompozitni materijal stvrdnjava pod svjetlom za stvrdnjavanje praćenjem njegove kemijske transformacije u stvarnom vremenu.

Mali uzorak materijala postavlja se izravno na visoko osjetljivi infracrveni senzor i izlaže se klinički relevantnom svjetlu za stvrdnjavanje. Dok se materijal pretvara iz mekog, plastičnog stanja u čvrsti polimer, instrument kontinuirano prati koncentraciju specifičnih kemijskih veza odgovornih za ovu transformaciju. Time **možemo izmjeriti brzinu i potpunost reakcije tijekom vremena**.

Možemo **testirati materijale na različitim debljinama slojeva** (npr. vrlo tanke filmove naspram klinički relevantnih 2 mm slojeva ili 4 mm slojeva za neke specifične materijale). time procjenjujemo koliko učinkovito svjetlo prodire kroz materijal i kako se učinkovitost stvrdnjavanja mijenja s debljinom sloja. U praksi, ovo simulira stvarne kliničke situacije gdje nedovoljno prodiranje svjetlosti može dovesti do nepotpunog stvrdnjavanja u dubljim područjima.

Ključni rezultati metode:

Stupanj konverzije: koliko je materijala kemijski reagiralo

Brzina stvrdnjavanja: koliko brzo materijal dosegne očvrsnuto stanje

Profil reakcije tijekom vremena: glatko, odgođeno ili inhibirano stvrdnjavanje

Učinkovitost ovisna o dubini: razlike između površine i dubljih slojeva

Budući da je mjerenje kontinuirano tijekom željenog vremenskog razdoblja (nekoliko minuta do nekoliko sati), dobivamo potpuni "profil stvrdnjavanja" umjesto jedne krajnje vrijednosti. To omogućuje detekciju suptilnih razlika između materijala.

Postavka replicira kliničke uvjete, uključujući realnu intenzitet svjetlosti i vrijeme ekspozicije, osiguravajući da su rezultati izravno relevantni za stvarnu upotrebu.

S poslovnog i razvojnog aspekta, ova metoda omogućuje:

- Brzo uspoređivanje novih formulacija eksperimentalnih materijala s referentnim standardima
- Identifikaciju materijala koji stvrdnjavaju brže ili potpunije
- Dokazivanje performansi prednosti povezanih sa sastavom ili tehnologijom
- Verifikaciju proizvodnih tvrdnji vezanih za učinkovitost stvrdnjavanja, dubinu stvrdnjavanja i kliničku pouzdanost

Osim osnovnih performansi stvrdnjavanja, ovaj pristup može se koristiti **za izvođenje indirektnih indikatora kliničkog ponašanja**. Analizom brzine postizanja maksimalne reakcijske stope i tijeka reakcije tijekom vremena, možemo identificirati profile stvrdnjavanja povezane s većim/manjim razvojem unutarnjih naprezanja – ključno za marginalni integritet i dugoročnu stabilnost. To omogućuje rani screening formulacija za potencijalne performanse rizike prije složenijih mehaničkih ispitivanja.



Metoda se može prilagoditi za **simulaciju stvarnih kliničkih varijacija** podešavanjem parametara poput debljine sloja, vremena ekspozicije i udaljenosti/pozicioniranja svjetla za stvrdnjavanje. Time procjenjujemo osjetljivost materijala na suboptimalne uvjete stvrdnjavanja i pouzdanost u svakodnevnim kliničkim scenarijima gdje idealni uvjeti nisu uvijek dostupni.

Osim početne ekspozicije svjetlu, sustav se može koristiti za **praćenje post-stvrdnjavajućeg ponašanja**, registrirajući nastavljene kemijske reakcije nakon isključenja svjetla. To pruža uvid u evoluciju materijala tijekom vremena, uključujući doprinos dodatne konverzije poboljšanim mehaničkim svojstvima.

S šire perspektive, kinetika polimerizacije se može integrirati s drugim mjerenjima (propuštanje svjetlosti, mehanička ispitivanja) za sveobuhvatno razumijevanje performansi materijala. Time se uspostavlja izravna poveznica između formulacije, ponašanja stvrdnjavanja i funkcionalnih ishoda, podržavajući optimizaciju i diferencijaciju proizvoda.

Konačno, **kvantitativna priroda metode čini je idealnom za potvrdu proizvodnih tvrdnji i regulatorne dokumentacije** – npr. dokazivanje učinkovitog stvrdnjavanja na klinički relevantnim dubinama, visokog stupnja konverzije ili robusne izvedbe pod varijabilnim uvjetima.

Infracrveni spektrometar s mikroskopom omogućuje mapiranje konverzije kroz različita područja uzorka s visokom prostornom točnošću. Na primjer, možemo procijeniti kako se učinkovitost stvrdnjavanja mijenja s dubinom mjerenjem konverzije na više točaka od ozračene površine prema dubljim slojevima, efektivno vizualizirajući gradijente stvrdnjavanja uzrokovane slabljenjem svjetlosti.

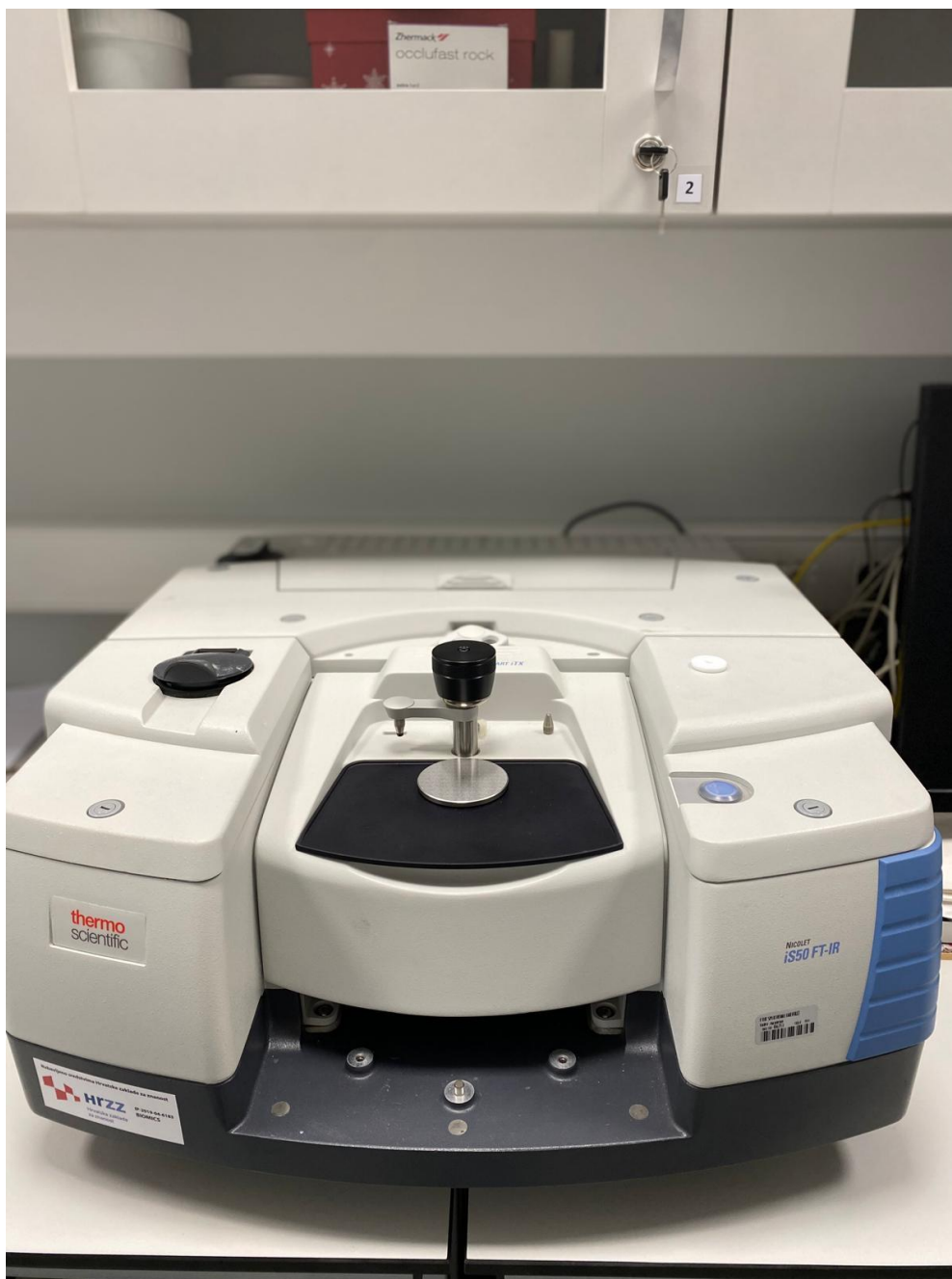
Osim toga, ova tehnika se može koristiti za **ispitivanje lokalnih efekata na kritičnim sučeljima** – poput onih između adhezivnih slojeva i nadgrađenih kompozita, ili u blizini defekata, šupljina i uključaka gdje stvrdnjavanje može biti kompromitirano. To omogućuje identificiranje heterogenosti koje standardna mjerenja ne mogu otkriti.

S razvojnog aspekta, ovo pruža moćan alat za: verifikaciju uniformnosti polimerizacije, optimizaciju preporuka debljine slojeva, dokazivanje pouzdane izvedbe pod simuliranim kliničkim uvjetima.



**RESEARCH,
INNOVATION AND
SCIENCE CENTER**

UNIVERSITY OF ZAGREB SCHOOL OF DENTAL MEDICINE



FTIR spektrometar/ FTIR spectrometer

2. Mechanical properties (measured using a universal testing machine)

Mechanical performance of dental materials (or any other material of similar mechanical behavior) can be evaluated using a universal testing machine, which enables controlled loading of specimens under different types of mechanical stress while continuously recording force and deformation. Our primary application is the measurement of flexural strength and flexural modulus of resin composites using three-point bending tests. In this setup, standardized bar-shaped specimens are loaded until fracture, allowing us to determine both the maximum load-bearing capacity of the material and its stiffness during deformation. The method can also be combined with artificial aging procedures, such as long-term water storage, storage in aggressive chemical media, or thermocycling, to evaluate how mechanical properties change over time and under artificial aging conditions.

Beyond flexural testing, the same instrument can be adapted for a broad range of additional mechanical measurements by using appropriate fixtures, jigs, and specimen geometries. This includes:

- Compressive strength testing, relevant for materials that are more sensitive to compressive loading, e.g., glass ionomers
- Tensile testing, used to assess resistance to stretching and crack initiation
- Shear bond strength testing, widely used to evaluate adhesion between restorative materials and tooth tissues (dentin or enamel)
- Elastic modulus measurements, describing material rigidity and deformation behavior under load

Depending on the selected configuration, the system can evaluate restorative composites, adhesives, cements, ceramics, polymers, fiber-reinforced materials, and additively manufactured ("3D printed") specimens. The instrument can further be used to investigate the effects of formulation changes, filler content, curing protocols, environmental aging, or storage conditions on mechanical durability.

Because the testing machine continuously records force-displacement behavior throughout the experiment, it provides mechanical profiles that can be used to investigate how materials deform before fracture, how brittle or ductile they behave, and how consistently they perform across repeated measurements.

The universal testing machine can also be adapted for fracture toughness testing, which evaluates a material's resistance to crack propagation and catastrophic failure. Using specially designed specimens containing predefined notches or defects, the system measures how much force is required for an existing crack to grow through the material. This provides insight beyond conventional strength measurements, as two materials with similar flexural strength may behave very differently once microscopic damage or flaws are present. Fracture toughness testing is particularly relevant for brittle or highly filled dental materials, where clinical failure often originates from crack formation under repeated chewing forces.



2a. Mehanička svojstva (mjereno pomoću univerzalnog ispitnog stroja)

Mehanička svojstva dentalnih materijala (ili bilo kojih drugih materijala sličnog mehaničkog ponašanja) mogu se procijeniti pomoću univerzalnog ispitnog stroja koji omogućuje kontrolirano opterećenje uzoraka različitim vrstama mehaničkog naprezanja uz kontinuirano bilježenje sile i deformacije. Naša primarna primjena je mjerenje savojne čvrstoće i modula savijanja kompozitnih smola primjenom trotočkastog savijanja. U toj postavci standardizirani uzorci u obliku šipki opterećuju se do loma, što omogućuje određivanje maksimalne nosivosti materijala i njegove krutosti tijekom deformacije. Metoda se može kombinirati i s postupcima umjetnog starenja, poput dugotrajnog skladištenja u vodi, izlaganja agresivnim kemijskim medijima ili termocikliranja, kako bi se procijenile promjene mehaničkih svojstava tijekom vremena i u uvjetima ubrzanog starenja.

Osim savojnih ispitivanja, isti se uređaj može prilagoditi za širok raspon dodatnih mehaničkih mjerenja korištenjem odgovarajućih držača, nastavaka i geometrijskih uzoraka. To uključuje:

- tlačnu čvrstoću, relevantnu za materijale osjetljivije na tlačno opterećenje (npr. staklenoionomerni cementi)
- vlačna ispitivanja za procjenu otpornosti na istezanje i inicijaciju pukotina
- ispitivanje smične čvrstoće veze, često korišteno za procjenu adhezije između restaurativnih materijala i zubnih tkiva (dentin ili caklina)
- modul elastičnosti, koji opisuje krutost materijala i njegovo ponašanje pri deformaciji pod opterećenjem

Ovisno o konfiguraciji, sustav može ispitivati kompozite, adhezive, cemente, keramiku, polimere, vlaknima ojačane materijale i aditivno proizvedene ("3D printane") uzorke. Također se može koristiti za proučavanje utjecaja promjena u formulaciji, udjela punila, protokola polimerizacije, okolišnog starenja ili uvjeta skladištenja na mehaničku trajnost.

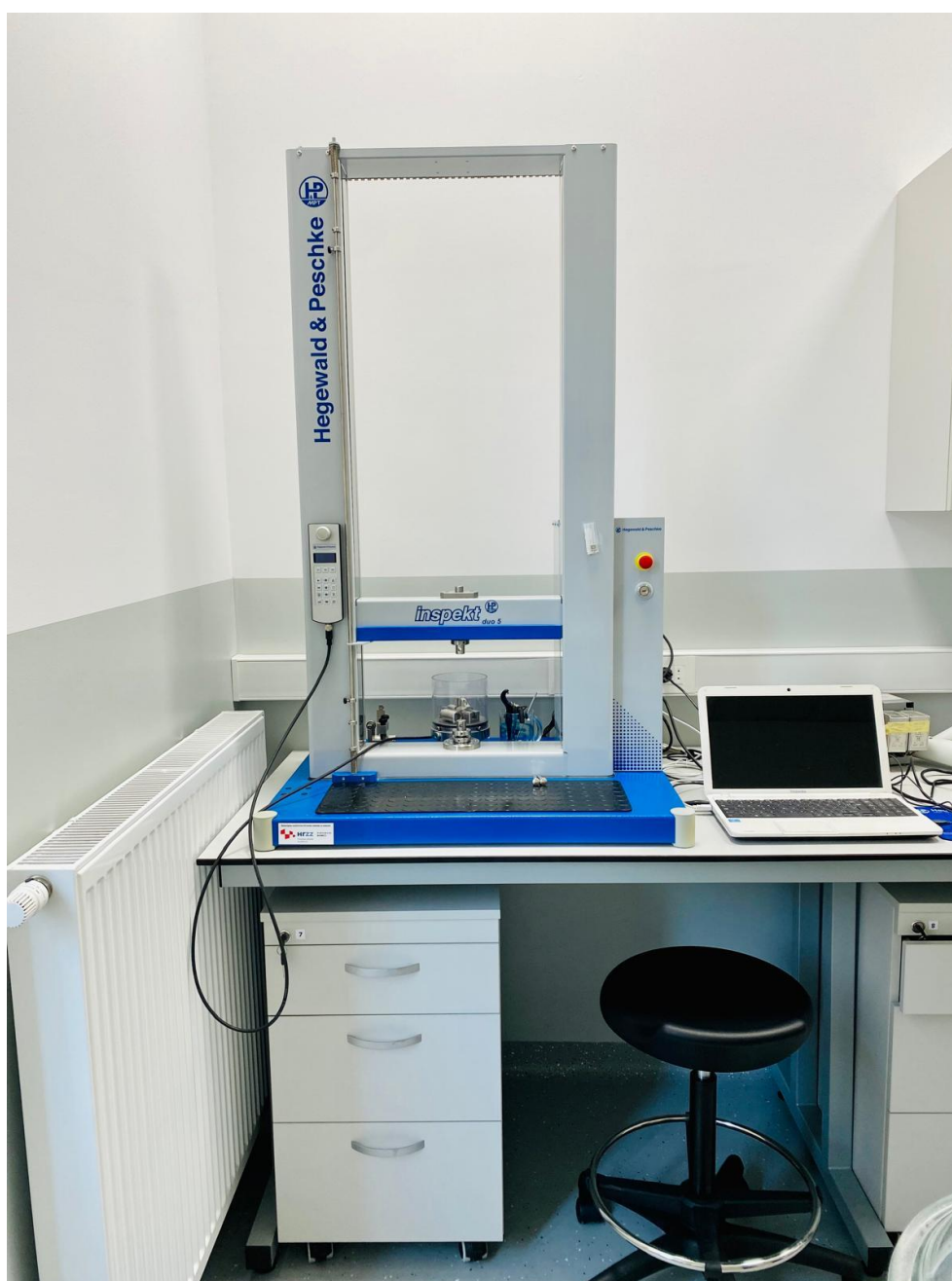
Budući da uređaj kontinuirano bilježi odnos sile i pomaka, omogućuje dobivanje mehaničkih profila koji otkrivaju kako se materijali deformiraju prije loma, koliko su kruti ili duktilni te koliko su rezultati ponovljivi.

Uređaj se također može prilagoditi za ispitivanje lomne žilavosti, kojom se procjenjuje otpornost materijala na širenje pukotina i katastrofalni lom. Korištenjem posebno dizajniranih uzoraka s unaprijed definiranim zarezima ili defektima mjeri se sila potrebna za rast postojeće pukotine kroz materijal. Time se dobiva uvid koji nadilazi klasična mjerenja čvrstoće, jer materijali slične savojne čvrstoće mogu pokazivati vrlo različito ponašanje u prisutnosti mikropukotina. Ovo je posebno važno za krte ili visoko punjene dentalne materijale, gdje klinički lom često započinje stvaranjem pukotina pod ponavljanim žvačnim opterećenjem.



RESEARCH,
INNOVATION AND
SCIENCE CENTER

UNIVERSITY OF ZAGREB SCHOOL OF DENTAL MEDICINE



Univerzalni ispitni stroj/ a universal testing machine

3. Light transmittance through composite material (measured using a visible light spectrometer)

Visible light transmittance through composite materials can be evaluated using a fiber-optic spectrometer system that measures how much curing light passes through a specimen in real time during light exposure. In this setup, the material is positioned between the curing light source and the detector, while the spectrometer continuously records the intensity and spectral distribution of transmitted light across the clinically relevant wavelength range used for light-curing. This enables precise assessment of how efficiently light penetrates through the material during polymerization.

The method is particularly useful for evaluating factors that influence curing efficiency, such as material composition, filler type, opacity, shade, and specimen thickness. By testing different layer thicknesses, we can determine how rapidly light intensity decreases with depth and estimate how effectively deeper regions of the material can be cured when increasing the layer thickness. This is especially important for bulk-fill materials and highly filled or more opaque composites, where insufficient light penetration may compromise polymerization in deeper layers. For experimental composite materials, sufficient light transmittance is essential for their potential clinical applicability because inadequate light penetration can result in incomplete curing and consequently compromise clinical usability. Therefore, this method can be used for confirming that newly developed materials allow reliable light-curing under clinically relevant conditions.

Because the system records the full light spectrum rather than only total intensity, it can also be used to investigate wavelength-dependent light transmission. For example, shorter wavelengths in the violet region typically scatter more strongly within composite materials and therefore penetrate less deeply than blue light. This allows us to compare how different materials interact with various components of the curing light spectrum and evaluate their compatibility with different curing lamps, which emit different wavelengths.

An additional advantage of the method is the ability to monitor how light transmission changes dynamically during curing. As the material polymerizes, its optical properties gradually change, often allowing greater light transmission over time due to refractive index changes within the resin matrix. However, the opposite behavior can also be intentionally designed into the material. Some modern composites are formulated to initially exhibit higher light transmittance, allowing deeper light penetration and more effective polymerization, followed by a gradual decrease in transmittance as the material sets. This reduction in translucency after curing can improve the final visual appearance by increasing opacity and better matching the optical properties of natural tooth structure. Because the present method monitors light transmission continuously throughout the curing process, it can detect and characterize such dynamic optical changes in real time. This enables targeted optimization of experimental materials in which optical behavior is deliberately adjusted depending on the intended clinical or aesthetic outcome.

From a product development perspective, light transmittance measurements enable optimization of translucency, curing efficiency, and depth-of-cure performance while balancing aesthetic requirements. It can also support comparative benchmarking and validation of curing recommendations.



3a. Prolaz svjetlosti kroz kompozit (mjereno spektrometrom vidljivog područja)

Prolaz svjetlosti kroz kompozitne materijale može se procijeniti pomoću optičkog vlaknastog spektrometra koji mjeri koliko svjetlosti za polimerizaciju prolazi kroz uzorak u stvarnom vremenu tijekom osvjetljavanja. Materijal se postavlja između izvora svjetlosti i detektora, a spektrometar kontinuirano bilježi intenzitet i spektralnu raspodjelu propuštene svjetlosti u klinički relevantnom rasponu valnih duljina. To omogućuje preciznu procjenu koliko učinkovito svjetlost prodire kroz materijal tijekom polimerizacije.

Metoda je posebno korisna za procjenu čimbenika koji utječu na učinkovitost polimerizacije, poput sastava materijala, vrste punila, opaciteta, nijanse i debljine uzorka. Ispitivanjem različitih debljina slojeva može se odrediti kako intenzitet svjetlosti opada s dubinom i koliko se učinkovito mogu polimerizirati dublji slojevi. To je posebno važno za bulk-fill materijale i opaknije kompozite, kod kojih nedovoljna penetracija svjetlosti može dovesti do nepotpune polimerizacije. Za eksperimentalne kompozitne materijale dovoljna propusnost svjetlosti ključna je za njihovu potencijalnu kliničku primjenu, jer nedovoljno prodiranje svjetlosti može dovesti do nepotpunog očvršćivanja i posljedično ugroziti kliničku uporabljivost. Stoga se ova metoda može koristiti za potvrdu da novorazvijeni materijali omogućuju pouzdano svjetlosno polimeriziranje u klinički relevantnim uvjetima.

Budući da sustav bilježi cijeli spektar svjetlosti, a ne samo ukupni intenzitet, može se koristiti i za istraživanje prijenosa svjetlosti ovisno o valnoj duljini. Primjerice, kraće valne duljine u ljubičastom području obično se jače raspršuju unutar kompozitnih materijala te stoga prodiru pliće od plave svjetlosti. To nam omogućuje usporedbu načina na koji različiti materijali interagiraju s pojedinim komponentama spektra svjetla za polimerizaciju te procjenu njihove kompatibilnosti s različitim lampama za polimerizaciju, koje emitiraju različite valne duljine.

Dodatna prednost ove metode je mogućnost praćenja kako se prijenos svjetlosti dinamički mijenja tijekom polimerizacije. Kako se materijal polimerizira, njegova se optička svojstva postupno mijenjaju, često omogućujući veći prijenos svjetlosti tijekom vremena zbog promjena indeksa loma unutar smolaste matrice. Međutim, može se namjerno dizajnirati i suprotno ponašanje materijala. Neki moderni kompoziti formulirani su tako da u početku pokazuju veću propusnost svjetlosti, što omogućuje dublje prodiranje svjetlosti i učinkovitiju polimerizaciju, nakon čega slijedi postupno smanjenje propusnosti kako se materijal stvrdnjava. Ovo smanjenje translucencije nakon polimerizacije može poboljšati konačni estetski izgled povećanjem opaciteta i boljim usklađivanjem optičkih svojstava s prirodnom strukturom zuba. Budući da ova metoda kontinuirano prati prijenos svjetlosti tijekom cijelog procesa polimerizacije, može u stvarnom vremenu detektirati i karakterizirati takve dinamičke optičke promjene. Time se omogućuje ciljano optimiranje eksperimentalnih materijala u kojima se optičko ponašanje namjerno prilagođava ovisno o željenom kliničkom ili estetskom ishodu.

Iz perspektive razvoja proizvoda, mjerenja propusnosti svjetlosti omogućuju optimizaciju translucencije, učinkovitosti polimerizacije i dubine polimerizacije uz istodobno usklađivanje estetskih zahtjeva. Također mogu podržati komparativno vrednovanje i validaciju preporuka za polimerizaciju.



Spektrometar vidljivog područja/ Visible light spectrometer



4. Temperature changes during composite polymerization (measured using a thermographic camera)

A thermographic camera can be used for real-time monitoring of temperature changes during light-curing of composite materials. In this method, the camera continuously records the surface temperature of the specimen while it is exposed to the curing light, allowing detailed evaluation of both the maximum temperature reached and the dynamics of temperature development during illumination with the curing lamp. Because dental composites generate heat both from the curing lamp and from the exothermic polymerization reaction itself, the method provides indirect information on curing behavior and reaction kinetics.

The technique is particularly useful for comparing how different material compositions influence thermal behavior during curing. For example, changes in filler type, particle size, filler loading, optical properties, or photoinitiator systems may alter how rapidly heat develops and dissipates within the composite. The method can therefore help identify formulations that exhibit unusually rapid or excessive temperature rise, which may be relevant for evaluating potential thermal risks for pulp tissue.

Because measurements are performed in real time, the system can also characterize the full thermal profile of the curing process rather than only a single endpoint temperature. This enables comparison of the time required to reach maximum temperature, the dynamics of heat development, and post-curing cooling behavior. In experimental materials research, thermographic analysis can be combined with polymerization kinetics and light transmittance measurements to better understand how optical, chemical, and thermal processes interact during curing.

4a. Promjene temperature tijekom polimerizacije kompozita (mjerenje korištenjem termografske kamere)

Termografska kamera može se koristiti za praćenje promjena temperature u stvarnom vremenu tijekom svjetlosne polimerizacije kompozitnih materijala. U ovoj metodi kamera kontinuirano bilježi površinsku temperaturu uzorka tijekom izlaganja svjetlu lampe za polimerizaciju, što omogućuje detaljnu procjenu maksimalne postignute temperature kao i dinamike razvoja temperature tijekom osvjetljavanja. Budući da dentalni kompoziti generiraju toplinu i od lampe za polimerizaciju i iz egzotermne reakcije same polimerizacije, metoda pruža neizravne informacije o ponašanju tijekom polimerizacije i kinetici reakcije.

Ova tehnika je osobito korisna za usporedbu utjecaja različitih sastava materijala na toplinsko ponašanje tijekom polimerizacije. Primjerice, promjene u vrsti punila, veličini čestica, udjelu punila, optičkim svojstvima ili sustavu fotoinicijatora mogu utjecati na brzinu nastajanja i disipacije topline unutar kompozita. Stoga metoda može pomoći u identifikaciji formulacija koje pokazuju neuobičajeno brz ili prekomjeran porast temperature, što može biti relevantno za procjenu potencijalnih toplinskih rizika za pulpno tkivo.



Budući da se mjerenja provode u stvarnom vremenu, sustav može karakterizirati i cjelokupni toplinski profil procesa polimerizacije, a ne samo jednu krajnju temperaturu. Time se omogućuje usporedba vremena potrebnog za postizanje maksimalne temperature, dinamike razvoja topline i ponašanja hlađenja nakon polimerizacije. U istraživanjima eksperimentalnih materijala termografska analiza može se kombinirati s mjerenjima kinetike polimerizacije i propusnosti svjetlosti kako bi se bolje razumjela međudjelovanja optičkih, kemijskih i toplinskih procesa tijekom polimerizacije.



Termografska kamera / Thermographic camera

5. Surface roughness (measured using a profilometer)

Surface roughness measurements are used to evaluate how smooth or irregular the surface of a dental material is after different treatments, aging procedures, or environmental exposures. In this method, a surface profilometer moves a highly sensitive probe across the material surface and records microscopic height variations, allowing quantitative determination of roughness parameters such as Ra, which represents the average surface irregularity.

This technique is useful for investigating the surface degradation of dental restorative materials caused by water exposure, acidic beverages, toothbrushing, polishing procedures, chemical aging, or wear simulation. Because surface roughness strongly influences plaque accumulation, staining susceptibility, gloss retention, and long-term esthetics, the method provides clinically relevant information about material durability and surface stability.

The system can be used to compare how different resin matrices, filler types, filler particle sizes, filler loading, or bioactive additives influence surface degradation over time. It is also useful for evaluating the effectiveness of polishing protocols, surface coatings, or protective treatments, as well as for studying how experimental materials respond to acidic or abrasive conditions intended to simulate the oral environment.

5a. Hrapavost površine (mjerenje korištenjem profilometra)

Mjerenja hrapavosti površine koriste se za procjenu koliko je površina dentalnog materijala glatka ili nepravilna nakon različitih tretmana, postupaka starenja ili izloženosti okolišnim uvjetima. U ovoj metodi profilometar prelazi vrlo osjetljivom sondom preko površine materijala i bilježi mikroskopske varijacije visine, čime omogućuje kvantitativno određivanje parametara hrapavosti, poput Ra, koji predstavlja prosječnu nepravilnost površine.

Ova tehnika je korisna za istraživanje površinske degradacije restaurativnih dentalnih materijala uzrokovane izlaganjem vodi, kiselim napitcima, četkanjem zubi, postupcima poliranja, kemijskim starenjem ili simulacijom trošenja. Budući da hrapavost površine snažno utječe na nakupljanje plaka, sklonost obojenju, zadržavanje sjaja i dugoročnu estetiku, metoda pruža klinički relevantne informacije o trajnosti materijala i stabilnosti njegove površine.

Sustav se može koristiti za usporedbu utjecaja različitih smolastih matrica, vrsta punila, veličine čestica punila, udjela punila ili bioaktivnih dodataka na degradaciju površine tijekom vremena. Također je koristan za procjenu učinkovitosti protokola poliranja, površinskih premaza ili zaštitnih tretmana, kao i za proučavanje kako eksperimentalni materijali reagiraju na kisele ili abrazivne uvjete koji simuliraju oralno okruženje.



RESEARCH,
INNOVATION AND
SCIENCE CENTER

UNIVERSITY OF ZAGREB SCHOOL OF DENTAL MEDICINE



Profilometar/ Profilometer

6. Color changes on material surface (measured using a visible-light spectrophotometer)

Color measurements are used to quantitatively evaluate the optical appearance and color stability of dental restorative materials before and after aging, staining, or environmental exposure. In this method, a spectrophotometric device measures the reflected light from the material surface and determines its position within the CIE Lab* color space, which describes brightness (L^*), red-green balance (a^*), and yellow-blue balance (b^*). By comparing measurements obtained at different time points, the overall color change (ΔE) can be calculated and related to clinically perceptible discoloration.

This technique is important for evaluating the esthetic stability of restorative materials exposed to beverages, food pigments, water aging, or other environmental factors that may affect long-term appearance. Because modern restorative dentistry places strong emphasis on esthetics, color stability is a critical parameter for assessing the long-term clinical acceptability of composite materials, especially in anterior restorations.

The method can be used to investigate how material composition influences staining susceptibility and optical stability. In addition to measuring overall color change, analysis of individual L^* , a^* , and b^* components can provide more detailed insight into the direction and mechanism of optical changes occurring during aging or degradation.

6a. Promjene boje na površini materijala (mjereno spektrofotometrom vidljive svjetlosti)

Mjerenja boje koriste se za kvantitativnu procjenu optičkog izgleda i stabilnosti boje dentalnih restaurativnih materijala prije i nakon starenja, obojenja ili izloženosti okolišnim uvjetima. U ovoj metodi spektrofotometrijski uređaj mjeri reflektiranu svjetlost s površine materijala i određuje njegov položaj unutar CIE Lab* prostora boja, koji opisuje svjetlinu (L^*), ravnotežu crveno–zeleno (a^*) i ravnotežu žuto–plavo (b^*). Usporedbom mjerenja dobivenih u različitim vremenskim točkama može se izračunati ukupna promjena boje (ΔE) i povezati s klinički uočljivim promjenama boje.

Ova tehnika je važna za procjenu estetske stabilnosti restaurativnih materijala izloženih napitcima, pigmentima iz hrane, starenju u vodi ili drugim okolišnim čimbenicima koji mogu utjecati na dugoročni izgled. Budući da suvremena restaurativna stomatologija stavlja snažan naglasak na estetiku, stabilnost boje predstavlja ključan parametar za procjenu dugoročne kliničke prihvatljivosti kompozitnih materijala, osobito u frontalnim restauracijama.

Metoda se može koristiti za istraživanje utjecaja sastava materijala na sklonost obojenju i optičku stabilnost. Osim mjerenja ukupne promjene boje, analiza pojedinačnih komponenti L^* , a^* i b^* može pružiti detaljniji uvid u smjer i mehanizam optičkih promjena koje nastaju tijekom starenja ili degradacije.

7. Surface microhardness (measured using a Vickers microhardness tester)

Surface microhardness measurements are used to evaluate the resistance of dental materials to localized surface deformation and are commonly applied as an indirect indicator of surface mechanical integrity, degree of conversion, and degradation resistance. In this method, a microhardness tester presses a diamond indenter into the material surface under a controlled load for a defined period of time, after which the size of the resulting indentation is measured to calculate the hardness value.

The technique is useful for investigating how different environmental conditions, aging procedures, or material compositions influence surface properties over time. For example, exposure to water, acidic beverages, chemical agents, thermal cycling, or mechanical wear may soften the material surface and reduce its hardness. Conversely, some materials may continue undergoing post-cure reactions after initial setting, resulting in gradual hardening over time. Because of this sensitivity, microhardness measurements provide insight into the balance between material maturation and degradation processes.

From a clinical perspective, surface hardness is relevant because it is associated with wear resistance, scratch resistance, and long-term surface stability of restorations.

7a. Površinska mikro-tvrdoća (mjerena Vickersovim uređajem za ispitivanje mikro-tvrdoće)

Mjerenja površinske mikro-tvrdoće koriste se za procjenu otpornosti dentalnih materijala na lokaliziranu površinsku deformaciju te se često primjenjuju kao neizravni pokazatelj površinskog mehaničkog integriteta, stupnja konverzije i otpornosti na degradaciju. U ovoj metodi uređaj za mjerenje mikro-tvrdoće utiskuje dijamantni indenter u površinu materijala pod kontroliranim opterećenjem tijekom određenog vremenskog razdoblja, nakon čega se mjeri veličina nastalog otiska kako bi se izračunala vrijednost tvrdoće.

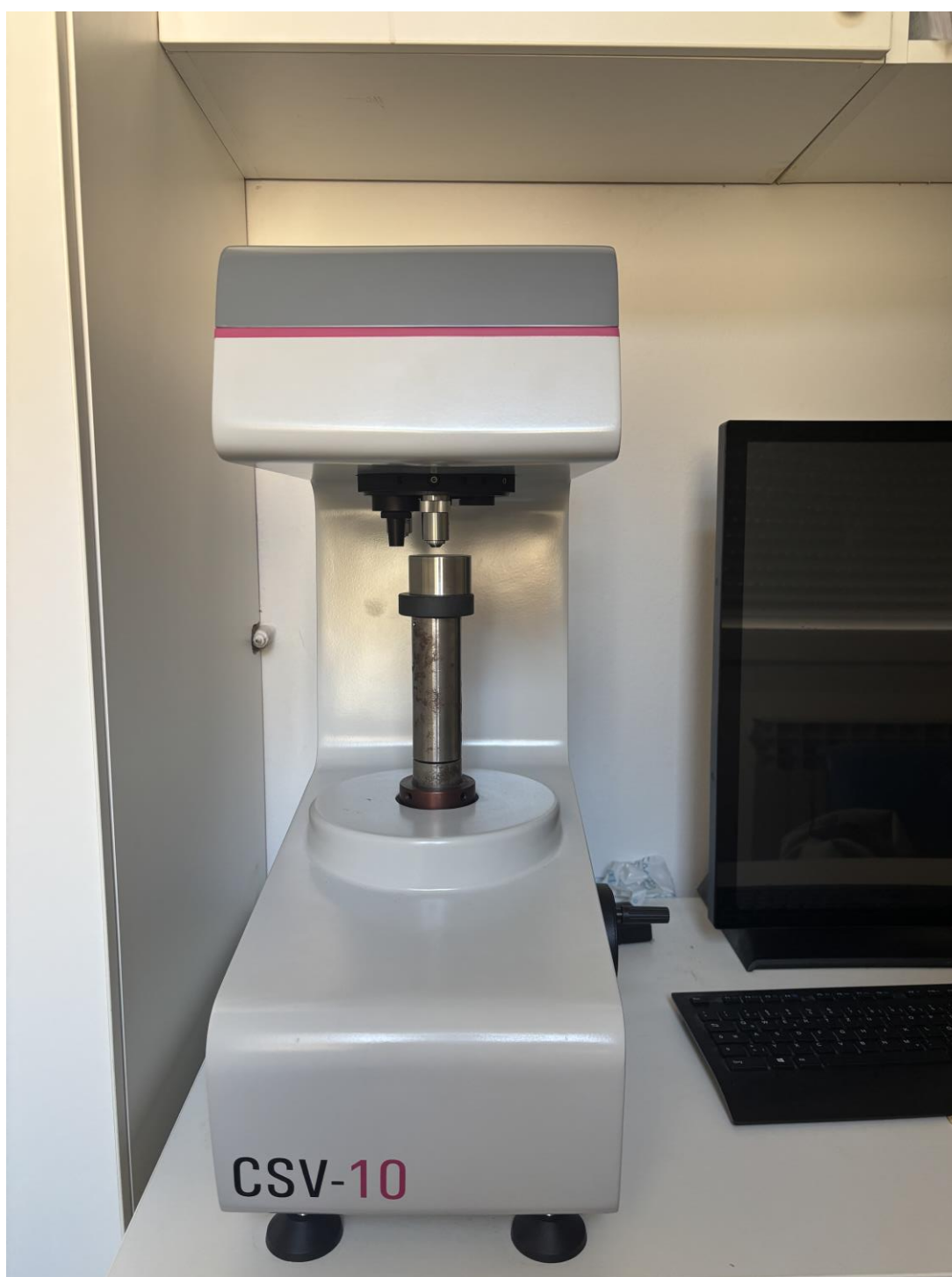
Ova tehnika korisna je za istraživanje utjecaja različitih okolišnih uvjeta, postupaka starenja ili sastava materijala na površinska svojstva tijekom vremena. Primjerice, izloženost vodi, kiselim napitcima, kemijskim sredstvima, termičkom cikliranju ili mehaničkom trošenju može omekšati površinu materijala i smanjiti njegovu tvrdoću. S druge strane, neki materijali mogu nastaviti prolaziti post-polimerizacijske reakcije nakon početnog stvrdnjavanja, što rezultira postupnim povećanjem tvrdoće tijekom vremena. Zbog te osjetljivosti, mjerenja mikro-tvrdoće pružaju uvid u ravnotežu između sazrijevanja materijala i procesa degradacije.

S kliničkog gledišta, površinska tvrdoća važna je jer je povezana s otpornošću na trošenje, na ogrebotine i dugoročnom stabilnošću površine restauracija.



**RESEARCH,
INNOVATION AND
SCIENCE CENTER**

UNIVERSITY OF ZAGREB SCHOOL OF DENTAL MEDICINE



Vickersov uređaj za ispitivanje mikro-tvrdoće/ Vickers microhardness tester



8. Composite material mixing (using a dual asymmetric mixer)

A dual asymmetric centrifugal mixer is used for rapid and highly homogeneous preparation of experimental dental materials, particularly resin composites. The system mixes materials through simultaneous rotation around two axes, generating strong internal shear forces without the use of mixing blades. This enables efficient incorporation of all composite components (fillers, resins, photoinitiators, and other additives) while minimizing air entrapment and improving material homogeneity.

An important advantage of the method is the ability to achieve simultaneous mixing and degassing, resulting in more uniform and bubble-free materials, which is particularly important for reliable mechanical, optical, and polymerization properties of dental composites. Because the process is highly reproducible and programmable, it is also useful for standardized preparation of experimental formulations during product development and comparative testing.

In our work, the dual asymmetric mixer is primarily used for the preparation of experimental resin composites with precisely controlled compositions. Starting from individual raw components, such as resin monomers, reinforcing fillers, photoinitiators, and various functional additives, we can systematically vary material composition depending on the investigated research question. For example, functional fillers such as bioactive glasses can be incorporated in different amounts to create composites capable of releasing therapeutic ions. This controlled preparation approach allows us to directly investigate how specific formulation changes influence properties such as polymerization behavior, mechanical performance, optical properties, or ion release, enabling structure-property relationship studies.

8a. Miješanje kompozitnih materijala (pomoću dualnog asimetričnog miksera)

Dualni asimetrični centrifugalni mikser koristi se za brzo i vrlo homogeno pripremanje eksperimentalnih dentalnih materijala, posebno smolastih kompozita. Sustav miješa materijale istodobnom rotacijom oko dviju osi, stvarajući snažne unutarnje smične sile bez upotrebe lopatica za miješanje. Time se omogućuje učinkovito uključivanje svih komponenti kompozita (punila, smola, fotoinicijatora i drugih aditiva) uz minimalno zadržavanje zraka i poboljšanu homogenost materijala.

Važna prednost ove metode jest mogućnost istodobnog miješanja i otplinjavanja, što rezultira ujednačenijim materijalima bez mjehurića zraka, što je osobito važno za pouzdana mehanička, optička i polimerizacijska svojstva dentalnih kompozita. Budući da je proces vrlo ponovljiv i podložan preciznom programiranju, metoda je također korisna za standardiziranu pripremu eksperimentalnih formulacija tijekom razvoja proizvoda i usporednih ispitivanja.

U našem radu dualni asimetrični mikser prvenstveno se koristi za pripremu eksperimentalnih smolastih kompozita s precizno kontroliranim sastavom. Polazeći od pojedinačnih sirovinskih komponenti, poput smolastih monomera, ojačavajućih punila, fotoinicijatora i različitih funkcionalnih aditiva, moguće je sustavno varirati sastav materijala u skladu s istraživačkim pitanjem koje se razmatra. Primjerice, funkcionalna punila poput bioaktivnih stakala mogu se



uključiti u različitim količinama kako bi se dobili kompoziti sposobni za otpuštanje terapijskih iona. Ovakav kontrolirani pristup pripremi omogućuje nam izravno istraživanje utjecaja specifičnih promjena formulacije na svojstva poput ponašanja tijekom polimerizacije, mehaničkih svojstava, optičkih svojstava ili otpuštanja iona, čime se omogućuju istraživanja odnosa između strukture i svojstava materijala.



Dualni asimetrični mikser/ Dual asymmetric mixer

9. Quantitative colorimetric analysis (using a UV-vis spectrometer)

A UV-visible spectrophotometer can be used for quantitative colorimetric analysis of liquid samples by measuring how strongly a solution absorbs light at specific wavelengths. In a typical measurement, the sample is placed in a transparent cuvette and exposed to ultraviolet or visible light, while the instrument records the amount of light absorbed by the solution. Because many chemical reactions produce characteristic color changes, the measured absorbance can be directly related to the concentration of a target substance in the sample.

The method is highly versatile and can be adapted to a wide range of analytical applications using appropriate reagents and reaction protocols. For example, assays such as Arsenazo III or malachite green can be used for determining calcium or phosphate ion concentrations, while numerous additional colorimetric methods are available for analyzing dissolved compounds, released ions, reaction products, or degradation processes. In essence, whenever a substance can be converted into a measurable color signal, it can potentially be quantified using this approach.

9a. Kvantitativna analiza boje primjenom kolorimetrije (pomoću UV-Vis spektrofotometra)

UV-Vis spektrofotometar može se koristiti za kvantitativnu kolorimetrijsku analizu tekućih uzoraka mjerenjem intenziteta apsorpcije svjetlosti otopine pri određenim valnim duljinama. Tijekom tipičnog mjerenja uzorak se stavlja u prozirnu kivetu i izlaže ultraljubičastom ili vidljivom svjetlu, dok uređaj bilježi količinu svjetlosti koju otopina apsorbira. Budući da mnoge kemijske reakcije uzrokuju karakteristične promjene boje, izmjerena apsorbancija može se izravno povezati s koncentracijom ciljane tvari u uzorku.

Metoda je vrlo svestrana i može se prilagoditi širokom rasponu analitičkih primjena korištenjem odgovarajućih reagensa i reakcijskih protokola. Primjerice, metode poput Arsenazo III ili malahitno zelenog testa mogu se koristiti za određivanje koncentracije kalcijevih ili fosfatnih iona, dok su dostupne i brojne druge kolorimetrijske metode za analizu otopljenih spojeva, otpuštenih iona, produkata reakcija ili procesa degradacije. U osnovi, svaka tvar koja se može pretvoriti u mjerljiv signal boje potencijalno se može kvantificirati ovim pristupom.



**RESEARCH,
INNOVATION AND
SCIENCE CENTER**

UNIVERSITY OF ZAGREB SCHOOL OF DENTAL MEDICINE



UV-Vis spektrofotometar/ UV-vis spectrometer



10. Long-term mass changes + water sorption and solubility according to ISO 4049 (measured using an analytical balance)

Water sorption and solubility measurements are used to evaluate how restorative materials interact with aqueous environments over time, which is relevant because these materials are continuously exposed to saliva in the oral cavity. According to the ISO 4049 methodology, specimens are immersed in water for a defined period, weighed, dried, and then weighed again. From the measured mass changes, it is possible to determine how much water the material absorbs (water sorption) and how much material is lost through dissolution or leaching processes (solubility).

These measurements are particularly important because excessive water sorption may degrade the material, while high solubility may indicate leaching of potentially toxic components. Both water sorption and solubility can affect long-term mechanical stability, dimensional stability, esthetics, and clinical durability of restorative materials. At the same time, controlled solubility may be desirable for certain functional materials, especially bioactive composites designed to release therapeutic ions.

In addition to standard ISO 4049 measurements of water sorption and solubility, the method can be expanded through long-term monitoring of specimen mass during prolonged water immersion. By repeatedly measuring mass changes over weeks or months, it becomes possible to characterize the kinetics of water uptake, dissolution, and long-term material stability. This approach is particularly useful for experimental bioactive materials containing reactive fillers, such as bioactive glasses, where ion release is expected to occur over extended periods. In such systems, long-term mass monitoring can provide indirect insight into degradation behavior, ion-release dynamics, and the balance between functional activity and structural stability.

10a. Dugoročne promjene mase + apsorpcija vode i topljivost prema ISO 4049 (mjereno analitičkom vagom)

Mjerenja apsorpcije vode i topljivosti koriste se za procjenu načina na koji restaurativni materijali međudjeluju s vodenim okruženjem tijekom vremena, što je važno jer su ti materijali kontinuirano izloženi slini u usnoj šupljini. Prema metodologiji ISO 4049, uzorci se uranjaju u vodu tijekom definiranog razdoblja, zatim važu, suše i ponovno važu. Na temelju izmjerenih promjena mase moguće je odrediti koliko vode materijal apsorbira (apsorpcija vode) te koliko se materijala gubi otapanjem ili procesima ispiranja (topljivost).

Ova mjerenja su osobito važna jer prekomjerna apsorpcija vode može dovesti do degradacije materijala, dok visoka topljivost može ukazivati na ispiranje potencijalno toksičnih komponenti. I apsorpcija vode i topljivost mogu utjecati na dugoročnu mehaničku stabilnost, dimenzijsku stabilnost, estetiku i kliničku trajnost restaurativnih materijala. S druge strane, kontrolirana topljivost može biti poželjna kod određenih funkcionalnih materijala, osobito bioaktivnih kompozita dizajniranih za otpuštanje terapijskih iona.

Osim standardnih ISO 4049 mjerenja apsorpcije vode i topljivosti, metoda se može proširiti dugoročnim praćenjem mase uzoraka tijekom produljenog uranjanja u vodu. Ponovljenim mjerenjem promjena mase tijekom tjedana ili mjeseci moguće je okarakterizirati kinetiku upijanja



vode, otapanja i dugoročnu stabilnost materijala. Ovaj pristup je osobito koristan za eksperimentalne bioaktivne materijale koji sadrže reaktivna punila, poput bioaktivnih stakala, kod kojih se očekuje dugotrajno otpuštanje iona. U takvim sustavima, dugoročno praćenje mase može pružiti neizravni uvid u ponašanje degradacije, dinamiku otpuštanja iona te ravnotežu između funkcionalne aktivnosti i strukturne stabilnosti.



Analitička vaga/ Analytical balance



11. Depth of cure of light-cured composite materials according to ISO 4049

Depth of cure measurements according to the ISO 4049 “scraping method” are used to evaluate how deeply a composite material can be effectively polymerized by a curing light under standardized conditions. In this method, a long cylindrical specimen is illuminated with a curing light from one side, after which the uncured material is mechanically removed and the length of the remaining hardened portion is measured. The reported depth of cure is calculated from the remaining cured length and serves as a practical indicator of the material’s curing capability.

This technique is important for assessing whether experimental or commercial materials can achieve sufficient polymerization in deeper regions of a restoration, where light intensity is reduced as light passes through the composite. Factors such as filler type, filler loading, particle size, opacity, photoinitiator system, and curing protocol may all influence the attainable depth of cure. The method is therefore widely used for evaluating bulk-fill capability, optimizing curing recommendations, and screening new formulations for adequate clinical performance. Because inadequate depth of cure may negatively affect mechanical properties, biocompatibility, and long-term durability, the method serves as an important screening tool for determining the clinical applicability of experimental restorative materials.

Although the ISO 4049 scraping test provides a relatively simple and standardized measurement, it can be combined with more advanced analyses, such as degree of conversion or microhardness measurements at different depths, to obtain a more detailed understanding of curing efficiency throughout the material.

11a. Dubina polimerizacije svjetlosno polimerizirajućih kompozitnih materijala prema ISO 4049

Mjerenja dubine polimerizacije prema ISO 4049 „metodi struganja” koriste se za procjenu koliko duboko se kompozitni materijal može učinkovito polimerizirati pomoću svjetlosne lampe u standardiziranim uvjetima. U ovoj metodi izrađuje se dugi cilindrični uzorak koji se osvjetljava s jedne strane, nakon čega se nepolimerizirani materijal mehanički uklanja, a duljina preostalog očvrnutog dijela se mjeri. Prijavljena dubina polimerizacije izračunava se iz duljine očvrnutog dijela i predstavlja praktičan pokazatelj sposobnosti polimerizacije materijala.

Ova tehnika je važna za procjenu mogu li eksperimentalni ili komercijalni materijali postići dovoljnu polimerizaciju u dubljim dijelovima restauracije, gdje intenzitet svjetlosti opada prolaskom kroz kompozit. Čimbenici poput vrste punila, udjela punila, veličine čestica, opaciteta, sustava fotoinicijatora i protokola polimerizacije mogu utjecati na postignutu dubinu polimerizacije. Stoga se ova metoda široko koristi za procjenu „bulk-fill” sposobnosti, optimizaciju preporuka za polimerizaciju i preliminarno ispitivanje novih formulacija s obzirom na adekvatnu kliničku učinkovitost. Budući da nedovoljna dubina polimerizacije može negativno utjecati na mehanička svojstva, biokompatibilnost i dugoročnu trajnost, metoda predstavlja važan alat za procjenu kliničke primjenjivosti eksperimentalnih restaurativnih materijala.

Iako ISO 4049 test struganja pruža relativno jednostavno i standardizirano mjerenje, može se kombinirati s naprednijim analizama, poput određivanja stupnja konverzije (FTIR spektrometar) ili mjerenja mikrotvrdoće (Vickersovim uređajem za ispitivanje mikro-tvrdoće) na različitim dubinama, kako bi se dobio detaljniji uvid u učinkovitost polimerizacije kroz cijeli materijal.



12. Artificial aging of dental materials (thermocycling and aggressive chemical media)

Artificial aging procedures are widely used to evaluate the long-term stability and degradation behavior of experimental and commercial dental composites under accelerated laboratory conditions. These protocols are designed to simulate chemical, thermal, and hydrolytic challenges encountered in the oral environment and to assess how material properties change over time. Among the most commonly used methods, thermocycling exposes composite specimens to repeated temperature changes, typically between cold and hot water baths, thereby generating stresses due to differences in thermal expansion between the resin matrix and filler particles. This process can promote water ingress, filler/matrix interfacial degradation, and microcrack formation, making thermocycling a clinically relevant model for evaluating the durability of restorative materials. Thermocycling is commonly performed between 5 and 55 °C with repeated cycles intended to approximate intraoral thermal fluctuations.

In addition to thermocycling, chemical aging protocols can be used to accelerate specific degradation mechanisms. Immersion in aqueous media such as simulated body fluid or acidic solutions can model hydrolytic degradation and cariogenic conditions, while ethanol-water solutions are commonly used to induce rapid softening of the methacrylate network. Strongly alkaline solutions may further accelerate hydrolytic degradation of the resin matrix and filler/matrix interface.

Artificial aging can be combined with measurements of numerous material properties before and after aging to comprehensively evaluate material stability. Frequently investigated outcomes include macromechanical properties such as flexural strength and flexural modulus, micromechanical properties such as microhardness, and surface-related properties including roughness and color stability. Aging protocols are also commonly used in studies evaluating aesthetic stability, including color change, translucency, gloss retention, and staining susceptibility.

12a. Umjetno starenje dentalnih materijala (termocikliranje i agresivni kemijski mediji)

Postupci umjetnog starenja široko se koriste za procjenu dugoročne stabilnosti i ponašanja degradacije eksperimentalnih i komercijalnih dentalnih kompozita u ubrzanim laboratorijskim uvjetima. Ovi protokoli osmišljeni su kako bi simulirali kemijske, toplinske i hidrolitičke izazove prisutne u oralnom okruženju te kako bi se procijenilo kako se svojstva materijala mijenjaju tijekom vremena. Među najčešće korištenim metodama, termocikliranje izlaže uzorke kompozita ponavljanim promjenama temperature, obično između kupelji hladne i tople vode, čime se stvaraju naprezanja zbog razlika u toplinskom širenju između smolaste matrice i čestica punila. Ovaj proces može potaknuti prodor vode, degradaciju sučelja punilo/matrica i stvaranje mikropukotina, što termocikliranje čini klinički relevantnim modelom za procjenu trajnosti restaurativnih materijala. Termocikliranje se najčešće provodi u rasponu od 5 do 55 °C, uz ponavljane cikluse koji simuliraju temperaturne promjene u usnoj šupljini.

Uz termocikliranje, kemijski protokoli starenja mogu se koristiti za ubrzavanje specifičnih mehanizama degradacije. Uronjavanje u vodene medije poput simulirane tjelesne tekućine ili



kiselih otopina može modelirati hidrolitičku degradaciju i kariogene uvjete, dok se otopine etanola i vode često koriste za brzo omekšavanje metakrilatne mreže. Jako alkalne otopine mogu dodatno ubrzati hidrolitičku degradaciju smolaste matrice i sučelja punilo/matrica.

Umjetno starenje može se kombinirati s mjerenjima brojnih svojstava materijala prije i nakon starenja kako bi se sveobuhvatno procijenila stabilnost materijala. Često se ispituju makromehanička svojstva poput savojne čvrstoće i modula savijanja, mikromehanička svojstva poput mikrotvrdoće te površinska svojstva uključujući hrapavost i stabilnost boje. Protokoli starenja također se često koriste u studijama estetske stabilnosti, uključujući promjenu boje, translucenciju, zadržavanje sjaja i sklonost obojenju.



Termocikler/ Thermocycler