

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODJSEK

**PRIMJENA HLADNOG ATMOSFERSKOG PLAZMENOG
MLAZA U DEZINFEKCIJI**

**(APPLICATION OF COLD ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA
JET FOR DISINFECTION)**

SEMINARSKI RAD

Dunja Šikić

Preddiplomski studij znanosti o okolišu
(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

Mentor: doc. dr. sc. Tomislav Ivanković

Zagreb, 2018.

Sadržaj

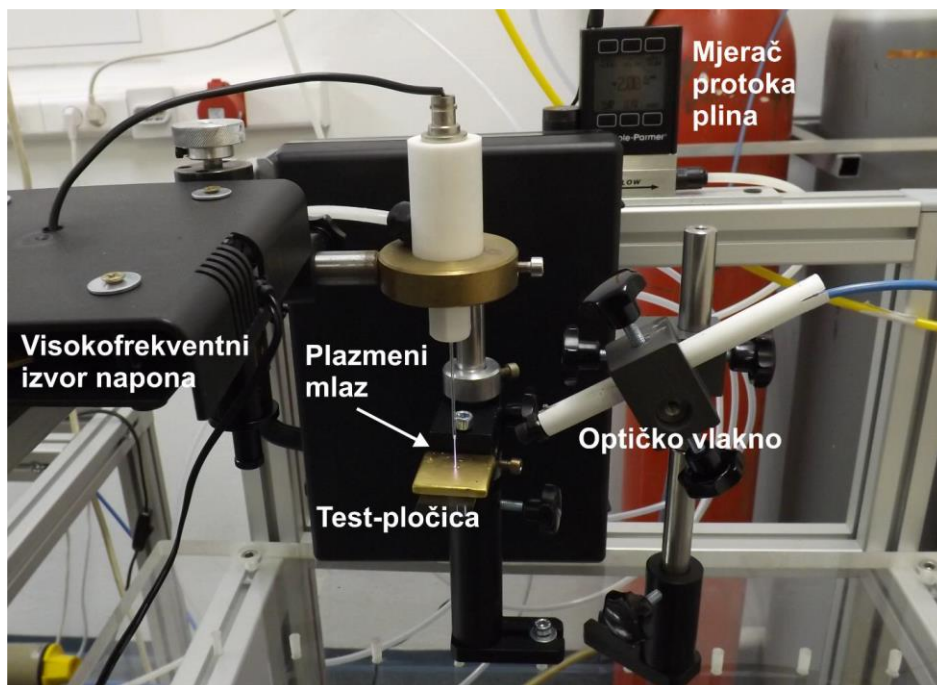
1. UVOD	1
1.1. Definicija, podjela i važnost plazme.....	1
1.2. Inaktivacijski utjecaj plazme na mikroorganizme	2
2. PRIMJENA HLADNE ATMOSFERSKE PLAZME	4
2.1. Stomatologija.....	4
2.2. Prehrambena industrija	6
2.3. Restauracija i konzervacija.....	9
3. ZAKLJUČAK	11
5. LITERATURA.....	13
6. SAŽETAK.....	17
7. SUMMARY	18

1. UVOD

1.1. Definicija, podjela i važnost plazme

Plazma je parcijalno ionizirani plin kojeg čine ioni, elektroni te nenabijene čestice kao što su atomi, molekule i radikali. Razlikujemo dva tipa plazme, termalnu i ne-termalnu, odnosno hladnu plazmu. Kod termalne plazme su elektroni i teške čestice (neutroni i ioni) na istoj temperaturi dok se hladna plazma naziva ne-termalnom zato što su elektroni na višoj temperaturi od teških čestica, a teške čestice na sobnoj. Neke od metoda kojima se može proizvesti i primijeniti hladna plazma su dielektrično barijerno pražnjenje (*Dielectric Barrier Discharge - DBD*), hladni atmosferski plazmeni mlaz (*Atmospheric Pressure Plasma Jet - APPJ*), plazmena igla (*plasma needle*) i plazmena olovka (*plasma pencil*). Plazma se može proizvesti različitim plinovima kao što su helij, argon, dušik, mješavina helija i kisika te iz zraka (Hoffmann i sur., 2013).

Hladni atmosferski plazmeni mlaz (**Slika 1**) nastaje tako da se kroz staklenu kapilaru u kojoj je smještena elektroda propuhuje plin (argon, helij ili mješavina argona i kisika). Na elektrodu se narine visokofrekventni (20 kHz) visoki napon (2 kV). Atmosferski plazmeni mlazovi hladni su tip plazmi, temperature mlazova su oko 30 - 50 °C (Lu i sur., 2012).



Slika 1. Eksperimentalni postav za tretman hladnim atmosferskim plazmenim mlazom.
(Autor fotografije: Bielen, A.)

Ono što ovaj tip plazme čini kemijski reaktivnom je stvaranje radikala (O, O₃, H₂O₂, itd.) i UV svjetla u samom plazmenom mlazu i u području oko mlaza koji su odgovorni za tretman uzoraka (jetkanje, kemijske reakcije, promjena svojstava površina, dezinfekcija, sterilizacija, otklanjanje materijala sa površina, deaktivacija mikroorganizama, itd.). Tretman uzoraka plazmenim mlazom je beskontaktni (nema mehaničkog kontakta pa time niti mehaničkih oštećenja), a udaljenost plazmenog mlaza od uzorka može utjecati na jačinu međudjelovanja mlaza i površine čime se može kontrolirati učinkovitost tretmana (Tendero i sur., 2006; Laroussi 2007; Lu i sur., 2016).

Danas tehnologija bazirana na hladnim atmosferskim plazmenim mlazovima uzima sve više maha u industrijskim, medicinskim i tehnološkim primjenama kao npr. za tretman tvrdog zubnog tkiva, sterilizaciju tkiva i površina, sterilizaciju raznih uzoraka, modifikaciju površina i slično (Fridman i sur., 2008; Fridman i sur., 2007; Iza i sur., 2008). Također se mogu primjenjivati i u prehrambenoj industriji, odnosno u procesiranju i pakiranju hrane (Dey i sur., 2016).

1.2. Inaktivacijski utjecaj plazme na mikroorganizme

Upotreba plazme kao dezinfekcijske metode patentirana je krajem 1960-ih godina (Terrier i sur., 2009), a plazma proizvedena od kisika prvi put je primijenjena 1989. godine kada Nelson i Berger (1989) inokulacijom poroznih traka bakterijama *Bacillus subtilis* i *Clostridium sporogenes* nakon tretmana postižu redukciju spora navedenih bakterija.

Tretman plazmom može uspješno inaktivirati širok spektar mikroorganizama uključujući spore i viruse (Feichtinger i sur., 2003, Lee i sur., 2006, Terrier i sur., 2009). Utjecaj plazme na različite mikroorganizme može biti potpuno selektivan što podrazumijeva da može djelovati letalno na patogene bez da ošteti stanice domaćina. Također, može aktivirati različite metaboličke puteve ovisno o organizmu na kojeg djeluje (Dobrynin i sur., 2009). Reaktivne čestice u plazmi uzrokuju oksidativne učinke na površini stanice mikroorganizma. To utječe na dvostruke veze nezasićenih masnih kiselina stanične stjenke, ometajući transport biomolekula (Guzel-Seydim i sur., 2004). Aminokiseline i nukleinske kiseline osjetljive su na reaktivne čestice plazme i njihova oksidacija uzrokuje promjene koje su letalne za mikroorganizme. Osim reaktivnih čestica, UV zračenje može modificirati DNA mikroorganizama i rezultirati ometanom diobom stanica (Criter i sur., 2007). Inaktivacija mikroorganizama ovisi o obliku plazme koji se koristi te o vrsti mikroorganizma pa se, primjerice, razlikuju postavke uređaja

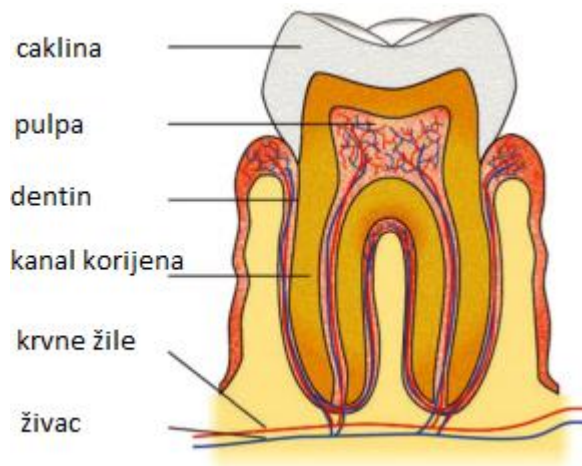
za tretman plazmom, njihova voltaža, plin koji se koristi i pri kojem tlaku, udaljenost mikroorganizma od izvora plazme, je li bakterija koja se tretira Gram-pozitivna ili Gram-negativna, u obliku spore ili vegetativnom obliku (Laroussi i sur., 2004).

2. PRIMJENA HLADNE ATMOSFERSKE PLAZME

2.1. Stomatologija

Oralne infekcije uključujući zubne karijese, parodontozu i intraoralne bolesti uzrokovane su bakterijama te rezultiraju propadanjem zuba (Khalil, 2008). Iako se pranje zuba, uporaba fluora, antibiotici i drugi lijekovi koriste kao načini prevencije i liječenja oralnih bolesti, ovakvi konvencionalni tretmani ipak su ograničeni (Tenuta i sur., 2009). Toplina ubija bakterije, ali primjena metoda koje uključuju zagrijavanje na živim tkivima vrlo je opasna. Uporaba antibiotika za liječenje tkiva koje je inficirano može dovesti do rezistentnosti na antibiotike. Nedavno su se hladne atmosferske plazme pokazale vrlo učinkovite u ubijanju bakterija, a k tome su i ekonomski isplative pa bi uporaba hladnih plazmi u liječenju oralnih infekcija mogla eliminirati probleme vezane uz postojeće metode (Arora i sur., 2014).

Zubni karijesi jedna su od najčešćih bolesti u stomatologiji. Definirani su kao lokalizirano uništenje zubnog tkiva uzrokovano kiselinama koje proizvode bakterije. Karijes započinje malim demineralizacijama područja ispod zubne cakline (**Slika 2**) koje mogu napredovati do dentina i u zubnu pulpu (Mosci i sur., 1990).



Slika 2. Građa zuba. Preuzeto i prilagođeno prema Rodríguez-Lozano, 2012.

Streptococcus mutans jedan je od najčešćih uzročnika karijesa (Mosci i sur., 1990). Prije zapunjivanja šupljina nekrotično, inficirano i demineralizirano tkivo odstranjuje se tretmanima ozonom, mehaničkim bušenjem ili laserskim tehnikama. Ove metode mogu biti destruktivne jer se njima odstranjuje i dio zdravog tkiva kako bi se osiguralo da u šupljini nije preostalo bakterija (Marsh, 2006).

Parodontoza je bolest vezana uz zubni plak, kompleksni oralni biofilm kojeg čine mikrobne zajednice. Nakupine zubnog plaka dovode do odvajanja zubnog mesa od samog zuba što dovodi do upale (Marsh, 2006).

Primjena hladne atmosferske plazme u stomatologiji obećavajuća je metoda jer dezinficira zubne šupljine deaktivacijom biofilмова velikom učinkovitošću. Predstavlja manje destruktivan tretman kojim se oštećenja (šupljine) uzrokovana karijesom pripremaju za ispunjavanje. Pošto ne doseže mnogo veće temperature od sobne, ne uzrokuje bol i ne uništava zdravo tkivo. Također, zbog sposobnosti deaktivacije mikroorganizama moguće je i njeno korištenje u tretmanima parodontoze (Goree i sur., 2006).

Goree i sur. (2006) ispitivali su ubija li hladni plazmeni mlaz bakteriju *S. mutans* koristeći plazmenu iglu. U njihovom istraživanju, tretman je djelovao letalno na bakterije unutar 10 sekundi pa su prema tome zaključili kako bi mogao pružiti alternativu u kliničkom liječenju dentalnih bolesti.

Morris i sur. (2009) koristili su hladni plazmeni mlaz za deaktivaciju bakterija *Geobacillus stearothermophilus* i *Bacillus cereus*. *B. cereus* povezan je s parodontozom, a *G. stearothermophilus* koristio se kao indikator učinkovitosti tretmana. Kod oba mikroorganizma proučavao se utjecaj tretmana plazmenog mlaza na vegetativne stanice i na spore. Zaključili su da hladna atmosferska plazma uspješno ubija vegetativne stanice i spore bakterije *B. cereus* te vegetativne stanice *G. stearothermophilus*.

Bo i sur. (2011) koristili su hladni atmosferski plazmeni mlaz argona u obliku četke za deaktivaciju oralnih bakterija *S. mutans* i *Lactobacillus acidophilus*. Ovaj tretman djelovao je letalno na bakteriju *S. mutans* između 11 i 15 sekundi, a na *L. acidophilus* do 5 minuta. Vrijeme koje je potrebno da bi tretman djelovao letalno na određenu vrstu bakterije varira ovisno o mediju na kojemu su rasle kolonije.

Lu i sur. (2009) koristili su uređaj za primjenu mješavine plazmenog mlaza helija i kisika koji je mogao djelovati unutar kanala korijena. Primjenjivali su ga na bakteriji *Enterococcus faecalis* koja često uzrokuje neuspješno liječenje kanala korijena. Zahvaljujući niskoj temperaturi plazmenog mlaza, mlaz je moguće dodirivati i uspješno postaviti u kanal korijena potpuno bezbolno. Zaključili su kako je plazmeni mlaz učinkovit u deaktivaciji bakterije *E. faecalis*.

Schaudinn i sur. (2013) kao izvor hladne atmosferske plazme koristili su plazmenu iglu kako bi eliminirali ex vivo biofilmove na kanalu korijena izvađenih zuba. Uzorke su podjelili u tri skupine ovisno o vrsti tretmana – tretman plazmenom iglom, tretman 6%

natrijevim hipokloritom i kontrola. Zaključili su da je plazmena igla učinkovito ubijala biofilme na izvađenim zubima, ali da je tretman 6% natrijevim hipokloritom bio učinkovitiji.

Pan i sur. (2013) proučavali su utjecaj tretmana hladnim atmosferskim mlazom na korijenski kanal inficiran *E. faecalis* biofilmom in vitro. Zaključili su da je hladna plazma visoko učinkovita u dezinfekciji biofilmova *E. faecalis*.

2.2. Prehrambena industrija

Većinu patogena u mikrobiologiji namirnica čine bakterije *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* i *Salmonella* spp. Bakterija *L. monocytogenes* predstavlja velik problem prvenstveno u prehrambenoj industriji i javnom zdravstvu (visok mortalitet), a samim time ima i značajan ekonomski utjecaj. Infekcije koje uzrokuju *Salmonella* spp. i *E. coli* također su učestale diljem svijeta (Posfay-Barbe i Wald, 2004).

Postoje mnoge metode kojima se ovi i drugi mikroorganizmi eliminiraju s namirnica. Neke od njih zasnivaju se na letalnim toplinskim tretmanima među kojima su jedni od najpoznatijih pasterizacija i autoklaviranje. Toplinski tretmani imaju posljedice na nutricionističku vrijednost hrane te druge fizikalne osobine (Yun i sur., 2010). Također, neki tretmani su ograničene primjene pa se primjerice autoklaviranju ne mogu podvrgnuti temperaturno osjetljive namirnice. Kao alternativne metode pri nižim temperaturama koriste se tretmani vodikovim peroksidom i etilen oksidom no potencijalno su upitni po zdravlje potrošača (Lee i sur., 2006). Alternativne ne-termalne metode kao što su tretmani ionizirajućim zračenjem, visokim hidrostatskim tlakom, pulsirajućim električnim poljem, oscilirajućim magnetskim poljem i jakim ultrazvukom istraživane su i razvijane posljednjih godina. Zračenje i visok tlak učinkovite su ne-termalne metode u obradi prehrambenih proizvoda, ali zahtijevaju visoku početnu cijenu za pokretanje pogona, vrlo skupu specijaliziranu opremu, visoke sigurnosne mjere, a mogu mijenjati kvalitetu određenih namirnica (Yun i sur., 2010).

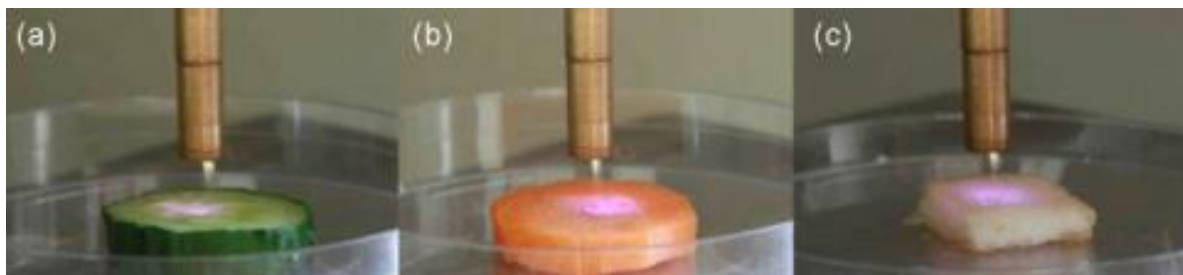
Hladna plazma posljednjih je godina pobudila veliki interes kao ne-termalna metoda prerade hrane. Prednosti različitih tretmana hladnom plazmom su ekonomičnost, široka primjena, a uz to je i ekološki prihvatljiva ne-termalna metoda (Misra i sur., 2011). Tretman hladnom atmosferskom plazmom obećavajući je i relativno novi antimikrobni tretman prehrambenih proizvoda (Lee i sur., 2006).

Niemira i Sites (2008) u svojem istraživanju utvrdili su da visok napon plazme (15-20 Kv, 60 Hz izmjenična struja) značajno reducira vijabilne stanice, odnosno populacije bakterija *Salmonella* Stanley i *E. coli* inokulirane na površinu jabuke. Također su zaključili da na

učinkovitiju inaktivaciju mikroorganizama bolje utječe veći protok plina (10 L/min naspram 40 L/min).

Moon i sur. (2009) inokulirali su *E.coli* na svinjsko meso te uspoređivali utjecaj tretmana hladnim atmosferskim plazmenim mlazom i tretmana UV-zračenjem na inaktivaciju mikroorganizama. Zaključili su da je jednominutni tretman UV-zračenjem imao sličan učinak kao i tretman hladnim atmosferskim plazmenim mlazom u trajanju od 30 sekundi. Predložili su tretman hladnim atmosferskim plazmenim mlazom kao učinkovitiji i sigurniji pošto UV-zračenje može imati štetne učinke na ljudsko zdravlje, u ovom slučaju prvenstveno na kožu.

Wang i sur. (2012) u svojem istraživanju proučavali su učinkovitost inaktivacije mikroorganizama kao i promjene fizikalnih i kemijskih svojstava svježeg voća i povrća uzrokovane tretmanom hladnom plazmom (**Slika 3**). U istraživanju su korištene kriške krastavaca, mrkve i kruške inficirane bakterijama roda *Salmonella*.



Slika 3. Prikaz tretmana hladnom plazmom a) krastavca; b) mrkve; c) kruške.

Preuzeto iz Wang i sur., 2012.

Učinkovitost inaktiviranja bakterija mjeri se brojem kolonija, odnosno brojem jedinica koje tvore kolonije (CFU) prije i poslije tretmana plazmom. Boja svake kriške mjerena je kolorimetrom kako bi se pratile eventualne promjene prije i po završetku tretmana. Sadržaj vlage i količina vitamina C također je kvantitativno praćena prije i poslije tretmana hladnom plazmom. Uzorci krišaka kruške, krastavca i mrkve nakon tretmana pokazali su 5% gubitka vlage 8 minuta nakon tretmana, minimalnu promjenu boje (**Slika 4**) te 3.6%, 3.2% i 2.8% smanjenje količine vitamina C u kriškama krastavca, mrkve i kruške, redom. Kod mrkve je ustanovljena 90% inaktivacija bakterija, kod krastavca 60%, a kod kruške 40%.



Slika 4. Uzorci mrkve, krastavca i kruške iz kontrolne skupine (lijevi stupac), nakon 0.5 s tretmana (srednji stupac) i nakon 4 s tretmana (desni stupac).

Preuzeto iz Wang i sur., 2012.

Kim i sur. (2011) proučavali su antimikrobno djelovanje hladnog atmosferskog plazmenog mlaza helija i mješavine helija i kisika na prirodnu mikrofloru i patogene prisutne na kriškama slanine. Populacije bakterija *E.coli*, *L. monocytogenes* i *Salmonella typhimurium* reducirale su se s porastom snage i izloženosti plazmenom mlazu kod oba plina korištena u istraživanju. Najučinkovitiju redukciju mikroorganizama postigli su koristeći hladni atmosferski plazmeni mlaz nastao mješavinom helija i kisika. Početna mjerenja (7-8 Log CFU/g) *E.coli*, *L. monocytogenes* i *S. typhimurium* smanjila su se na 4.80, 5.79 i 6.46 Log CFU/g nakon tretmana plazmenim mlazom pri 125 W u trajanju od 90 sekundi.

Ragni i sur. (2010) proučavali su sposobnost dekontaminacije tretmana hladnom plazmom na uzorcima ljuski jajeta na koje su eksperimentalno inokulirali vrstama *Salmonella enteritidis* i *S. typhimurium* (5,5–6,5 Log CFU/ljuska jajeta). Nakon devedesetominutnog tretmana uočeno je smanjenje od 2,5 Log CFU/ljuska jajeta i 4,5 Log CFU/ljuska jajeta.

Vleugelis i sur. (2005) u svome istraživanju koristili su bakteriju *Pantoea agglomerans*, koja proizvodi biofilmove, i papriku kao tipičan uzorak biljnog tkiva. Njihovi rezultati pokazali su kako je tretman hladnim atmosferskim mlazom mješavine helija i kisika učinkovit u inaktivaciji mikroorganizama, a pri tome ne uzrokuje neprihvatljive promjene boje, odnosno obezbojenja paprike. Također, zaključili su kako je ovakav način tretiranja bolji od tretmana niskotlačnim UV izvorima.

2.3. Restauracija i konzervacija

Danas se uklanjanje mikroorganizama s površine drvenih umjetnina, najčešće vrši kemijskim tehnikama. Pri takvim tretmanima česta je uporaba metatina, nipagina, timola, cetavlon, etanola i sl. Sva navedena sredstva toksična su te predstavljaju opasnost za ljudsko zdravlje i okoliš (problem skladištenja otpadnih tufera). Prilikom njihove uporabe potrebno je koristiti optimalnu koncentraciju kako bi se umanjila opasnost od izlaganja njihovom štetnom djelovanju. Još jedan nedostatak ove tehnike je što upotrijebljeno mikrobiocidno sredstvo mora biti kompatibilno s materijalima koje će se kasnije aplicirati u konzervatorsko-restauratorskim radovima na umjetnini (Briški, 2000).

Jedna od metoda dezinfekcije je uporaba plina metil-bromida, međutim kod ovakvog tretmana javlja se više problema. Naime, metil-bromid klasificiran je kao toksičan spoj, a uzrokuje i stanjivanje ozonskog sloja. Kratkotrajno izlaganje visokim koncentracijama ili učestalo izlaganje malim koncentracijama ovoga plina vrlo je štetno za zdravlje i uzrokuje probleme na bubrezima, dišnom i živčanom sustavu. Osim toga, ova je metoda dezinfekcije i financijski zahtjevna. Osim metil-bromida, za konzervaciju/restauraciju drvenih umjetnina ponekad se koriste i plinovi na bazi sumpora. Međutim, oni nisu uvijek pogodni jer uzrokuju tamnjenje pigmenata kao što je olovno bjelilo (Tonini, 2015).

Nadimljavanje drvenih umjetnina plinovima poput dušika, ugljikovog dioksida ili argona učinkovito je u borbi protiv kukaca i njihovih ličinki, no većina spora gljiva preživljava ovakve tretmane. Zamrzavanje također nije učinkovit tretman u borbi protiv kontaminacije gljivama, ali može zaustaviti njihov rast pa može biti prikladno za prevenciju progresivnog oštećenja prije čišćenja artefakta (Sterflinger i Querner, 2013).

Etilen-oksidi zabranjeni su sredstva pošto su vrlo toksični. Unatoč tome, i dalje predstavljaju najučinkovitiji način tretiranja čitave mase kontaminiranog knjižničnog materijala (Nittérus 2000).

Alternativa plinskoj dezinfekciji je mnogim slučajevima neadekvatna i teže izvediva. Kod tretmana umjetnina gama zračenjem tijekom dezinfekcije je potreban vakuum te se ona ne izvodi na licu mjesta. Dimenzije vakuumske komore često su ograničene, a samim time i dimenzije umjetnina koje se mogu tretirati. Osim toga, ionizirajuće zračenje može predstavljati potencijalnu opasnost za ljudsko zdravlje (Unger i sur., 2001). Unatoč nedostacima, gama zračenje vrlo je učinkovito sredstvo protiv mikroorganizama, insekata, kao i gljiva i njihovih spora. Međutim, doza zračenja mora biti barem 10 - 20 kGy (Nittérus, 2000). S obzirom da tako

visoka doza zračenja može štetno utjecati na mnoge materijale, ova je metoda dezinfekcije dosta ograničena (Sterflinger i Querner, 2013).

Danas se istražuje i mogućnost primjene raznih plazmenih izvora za tretiranje umjetnina. Primjeri dosadašnjih istraživanja prikazani su u **Tablici 1**. Iz navedenih primjera vidi se da je primjena raznih plazmenih izvora u konzervaciji/restauraciji umjetnina vrlo široka, ali u nekim slučajevima ograničena. Potrebna su daljnja istraživanja kako bi se utvrdili optimalni uvjeti hladnog atmosferskog plazmenog mlaza u ovom području.

Tablica 1. Primjeri dosadašnjih primjena plazmenih izvora za tretiranje umjetnina.

	Tip plazme	Primjena	Ishod
Krčma i sur., 2014	hladna niskotlačna vodikova plazma	otklanjanje korozije s metalnih arheoloških objekata	problem zagrijavanja materijala
Ioanid i sur., 2007	hladna niskotlačna plazma	dekontaminacija polimernih materijala od mikroorganizama	uništava spore, ali ne prodire u dublje slojeve
Voltolina i sur., 2014	razni atmosferski komercijalni plazmeni izvori bazirani na lučnim ili dielektričnim izbojima	čišćenje arhitektonskih površina (kamen, mramor, zidne slike) od epoksidne i akrilne smole i uljane boje	lučni izboji nisu pogodni za čišćenje površina, dielektrični postigli zadovoljavajuć rezultat
Comiotto, 2009	minijaturni izvor hladne atmosferske plazme	poboljšanje svojstava adhezije plastika koje se koriste u modernim i suvremenim umjetnostima	obećavajući rezultati poboljšanja adhezivnosti nakon predtretmana
Pflugfelder i sur., 2007	dva plazmena izvora (dielektrički izboj i atmosferski plazmeni mlaz	čišćenje zidnih slika od smole, lakova i čađe	djelomično zadovoljavajući rezultati
Ioanid i sur., 2015	niskotlačna radio-frekventna plazma	dekontaminacija i čišćenje nosioca od papira i nanošenje polimernih zaštita na njih	zadovoljavajući rezultati
Schalm i sur., 2018	atmosferski plazmeni „afterglow“	skidanje sulfidnih slojeva sa oksidiranog i čistog srebra i bakra	učinkovitost ovisila o debljini slojeva, teško se postizala visoka čistoća i sjaj
Schmidt-Ott, 2004	niskotlačna vodikova plazma	tretman metalografskih uzoraka (željezni čavli) za redukciju korodiranih slojeva	slojevi se mogu potpuno odstraniti bez oštećenja samog uzorka
Voltolina, 2014.	razni atmosferski plazmeni izvori	čišćenje kamena, metala i murala od raznih nečistoća kao što su čađa, grafiti, produkti korozije, uljane boje, polimeri...	nove tehnologije tretmana materijala uporabom plazmi.

3. ZAKLJUČAK

Plazma je parcijalno ionizirani plin kojeg čine ioni, elektroni te nenabijene čestice (atomi, molekule i radikali). Razlikujemo dva tipa plazme, termalnu i ne-termalnu, odnosno hladnu plazmu, a razlikuju se u temperaturi elektrona i teških čestice (neutroni i ioni). Tretmani plazmom mogu uspješno inaktivirati širok spektar mikroorganizama. Hladni atmosferski plazmeni mlaz nastaje propuhivanjem plina (npr. argon, helij ili mješavina argona i kisika) kroz staklenu kapilaru u kojoj je smještena elektroda. Hladni atmosferski plazmeni mlazovi dosežu temperature oko 30 - 50 °C, a kemijski reaktivnim čini ih stvaranje radikala (O, O₃, H₂O₂, itd.) te UV svjetla u samom plazmenom mlazu i području oko njega.

Tretman hladnim atmosferskim plazmenim mlazom ne predstavlja opasnost za zdravlje ljudi niti za očuvanje okoliša zato što su svi nusprodukti djelovanja plazmenog mlaza, odnosno plazmeni radikali, koji igraju ključnu ulogu u uklanjanju mikroorganizama, kratkoživi i djeluju samo lokalno na mjestu primjene, a uz to je i ekonomski isplativ.

Konvencionalne metode liječenja i prevencije oralnih bolesti (pranje zuba, uporaba fluora, antibiotici i dr. lijekovi, mehaničko bušenje i dr. destruktivne metode) ograničeni su, a mogu dovesti i do neželjenih nuspojava kao što je rezistentnost na antibiotike. Toplina ubija bakterije, ali metode koje uključuju zagrijavanje živih tkiva vrlo su opasne. Hladne atmosferske plazme pokazale su se vrlo učinkovite u ubijanju bakterija, a predstavljaju manje destruktivan tretman jer ne dosežu visoke temperature pa ne dolazi do uništavanja zdravog tkiva i ne uzrokuju bol. Uz sve to, ekonomski su isplative pa bi njihova uporaba u liječenju oralnih infekcija mogla eliminirati probleme vezane uz postojeće metode.

U mikrobiologiji namirnica većinu patogena čine bakterije *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* i *Salmonella* spp. koji predstavljaju velik problem u prehrambenoj industriji i javnom zdravstvu, a samim time imaju i značajan ekonomski utjecaj. Postojeće metode dezinfekcije i sterilizacije namirnica i njihovih ambalaža bazirane su uglavnom na letalnom djelovanju visokih temperatura na patogene, što vrlo ograničava njihovu primjenu zbog temperaturne osjetljivosti namirnica i materijala. Ne-termalne metode većinom su ekonomski neisplativije, opasnije po ljudsko zdravlje i okoliš te mogu negativno utjecati na kvalitetu određenih namirnica pa se upravo iz navedenih razloga tretman hladnom atmosferskom plazmom nudi kao nova i obećavajuća alternativa antimikrobnog tretmana prehrambenih proizvoda.

U konzervatorsko-restauratorskoj struci dezinfekcija drvenih umjetnina najčešće se vrši kemijskim sredstvima (npr. metatin, nipagin, timol, cetavlon, etanol i sl.), plinovima ili γ -

zračenjem., a sva ova sredstva imaju određene nedostatke, poput štetnosti za ljude i okoliš i visoke cijene. Još jedan problem ovih tehnika je i kompatibilnost sredstava s materijalima koji se koriste u kasnijim konzervatorsko-restauratorskim radovima na umjetnini. Razvojem metoda tretiranja umjetnina hladnim atmosferskim plazmenim mlazom mogao bi se konstruirati i uređaj manjih dimenzija kojim bi se moglo tretirati umjetnine na licu mjesta, a sam plazmeni mlaz radi u atmosferskim uvjetima pa nema potrebe za vakuumskim komorama.

5. LITERATURA

Aurora V., Nikhil V., Suri N.K., Aurora P. (2014) Cold Atmospheric Plasma (CAP) In Dentistry. *Dentistry* 4, 1-5

Bo Y., Jierong C., Qingsong Y., Hao L., Mengshi L., Azlin M., Liang H., Yong W. (2011) Oral bacteria deactivation using a low-temperature atmospheric argon plasma brush. *Journal of Dentistry* 39, 48–56

Briški F. (2000) Mikroorganizmi na spomenicima kulture: od uzorkovanja, analize do izbora mikrobiocidnog sredstva U: Seminar Mikrobiološka destrukcija spomenika kulture, Zbornik radova, Zagreb, str. 36-38

Comiotto A. (2009) Miniaturized Cold Atmospheric Plasma for Improving the Adhesion Properties of Plastics in Modern and Contemporary Art. *AIC Objects Specialty Group Postprints* 16, 25-35

Critzer F. J., Kelly-Wintenberg K. South S. L., Golden D. A. (2007) Atmospheric plasma inactivation of foodborne pathogens on fresh produce surfaces. *Journal of Food Protection* 70, 2290–2296

Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G., Fridman, A. (2009) Physical and Biological Mechanisms of Direct Plasma Interaction with Living Tissue. *New Journal of Physics* 11, 115020

Dey A., Rasane P., Choudhury A., Singh J., Maisnam D. i Rasane P. (2016) Cold Plasma Processing: A review. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences* 9, 2980-2984

Fridman G., Friedman G., Gutsol A., Shekhter B., Vasilets V. N., i Fridman A. (2008) Applied plasma medicine. *Plasma Processes and Polymers* 5, 503-533

Feichtinger J., Walker M., Schumacher U. (2003) Sterilisation with low-pressure microwave plasmas. *Surface and Coatings Technology* 174, 564-569

Fridman G., Brooks A. D., Balasubramanian M., Fridman A., Gutsol A., Vasilets V. N., Ayan H., i Friedman G. (2007) Comparison of direct and indirect effects of non-thermal atmospheric-pressure plasma on bacteria. *Plasma Processes and Polymers* 4, 370-375

Goree J, Liu B, Drake D, Stoffels E.(2006) Killing of S-mutans bacteria using a plasma needle at atmospheric pressure. *IEEE Transactions on Plasma Science* 34, 1317–1324

Guzel-Seydim .Z., Seydim A.C. (2004) Use of ozone in the food industry. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 37, 453-460

Hoffmann C., Berganza C., Zhang J. (2013) Cold Atmospheric Plasma: Methods of production and application in dentistry and oncology. *Medical Gas Research* 3, 1-15

-

Ioanid E.G., Frunză V., Rusu D., Vlad A.M., Tanase C. i Dunc C.S. (2015) Radio-Frequency Plasma Discharge Equipment for Conservation Treatments of Paper Supports. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering* 9, 760-764

Ioanid G., Ioanid A. i Paepauta D. (2007) New Tendencies in Restoration-Conservation: The HF Plasma. *Revue Roumaine de Chimie* 52, 441–447

Iza F., Kim G. J., Lee S. M., Lee J. K., Walsh J. L., Zhang Y. T., i Kong M. G. (2008) Microplasmas: Sources, particle kinetics and biomedical applications. *Plasma Processes and Polymers* 5, 322-34

Khalil J. (2008) Periodontal disease: an overview for medical practitioners. *Lik Sprava* 3, 10-21.

Kim B., Yun H., Jung S., Jung Y., Jung H., Choe W., Jo C. (2011) Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions. *Food Microbiology* 8, 9-13

Krčma F., Blahová L., Fojtíková P., Graham W. G., Grossmannová H., Hlochová L., Horák J., Janová D., Kelsey C. P., Kozáková Z., Mazánková V., Procházka M., Pikryl R., Ádková L., Sázavská V., Vaíek M., Veverková R. i Zmrzlý M. (2014) Application of low temperature plasmas for restoration/conservation of archaeological objects. *Journal of Physics: Conference Series* 565, 1-10

Laroussi M. (2002) Nonthermal Decontamination of Biological Media by Atmospheric Pressure Plasmas: Review, Analysis and Prospects. *IEEE Transactions On Plasma Science* 30, 1409-1415

Laroussi M, Leipold F. (2004) Evaluation of the roles of reactive species, heat and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. *International Journal of Mass Spectrometry* 233, 81-86

Lee K., Ju W.T., Lee Y. (2006) Sterilization of bacteria, yeast, and bacterial endospores by atmospheric-pressure cold plasma using helium and oxygen. *Journal of Microbiology* 44, 269-275

Lu X., Cao Y.G., Yang P., Xiong Q., Xiong Z.L., Xian Y.B., Pan Y. (2009) An RC Plasma Device for Sterilization of Root Canal of Teeth. *IEEE Transactions on Plasma. Scienc* 37, 668–673

Lu X., Naidis G.V., Laroussi M., Reuter S., Graves D.B. i Ostrikov K (2016) Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Physics Reports* 630, 1-84

Lu X., Laroussi M. i Puech V. (2012) On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Science and Technology* 21, 1-17

Marsh P.D. (2006) Dental plaque as a biofilm and a microbial community–

implications for health and disease. *BMC Oral Health* 6 (Suppl 1):S14

Misra N. N.; Tiwari B. K.; Raghavarao K. S. M.; Cullen P.J. (2011) Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. *Food Engineering Reviews* 3, 159–170

Morris A.D., McCombs G.B., Akan T., Hynes W., Laroussi M., Tolle S.L. (2009) Cold Plasma Technology: Bactericidal Effects on *Geobacillus Stearothermophilus* and *Bacillus Cereus* Microorganisms. *DentHygiene* 83,55–61

Mosci F, Perito S, Bassa S, Capuano A, Marconi P.F. (1990) The role of *Streptococcus mutans* in human caries. *Minerva Stomatologica* 39, 413–429

Nelson C.L., Berger T.J. (1989) Inactivation of microorganisms by oxygen gas plasma. *Current microbiology* 18, 275–276

Niemira, B.A., Sites, J. (2008) Cold plasma inactivates *Salmonella* Stanley and *Escherichia coli* O157:H7 inoculated on golden delicious apples. *Journal of Food Protection* 71, 1357-1365

Nittérus, M., (2000) Fungi in archives and libraries, a literary survey. *Restaurator* 21, 25–40

Pan J, Sun K, Liang Y, Sun P, Yang X.. (2013) Cold plasma therapy of a tooth root canal infected with *enterococcus faecalis* biofilms in vitro. *International Endodontic Journal* 39, 105-110

Posfay-Barbe K.M., Wal, E.R. (2004) Listeriosis. *Pediatrics in review* 25, 151-159.

Pflugfelder C., Mainusch N., Hammer I. i Viöl W. (2007) Cleaning of Wall Paintings and Architectural Surfaces by Plasma. *Plasma Processes and Polymers* 4, 516-521

Ragni, L., Berardinelli, A., Vannini, L., Montanari, C., Sirri, F., Guerzoni, M.E., Guarnieri, A. (2010) Non Thermal atmospheric gas plasma device for surface decontamination of shell eggs. *Journal of Food Engineering* 100, 125-132

Rodríguez-Lozano F.J., Insausti C.L., Iniesta F., Blanquer M., Ramírez M.D., Meseguer L., Meseguer-Henarejos A.B., Marín N., Martínez S., Moraleda J.M. (2012) Mesenchymal dental stem cells in regenerative dentistry. *Medicina Oral Patologia Oral y Cirugia Bucal* 17, 1062–1067

Schalm O., Storme P., Gambirasi A., Favaro M. i Patelli A. (2018) How effective are reducing plasma afterglows at atmospheric pressure in removing sulphide layers: Application on tarnished silver, sterling silver and copper. *Surface and Interface Analysis*, 32–42

Schaudinn C., Jaramillo D., Freire M.O., Sedghizadeh P.P., Nguyen A., Webster P., Costerton J.W., Jiang C. (2013) Evaluation of a nonthermal plasma needle to eliminate ex vivo biofilms in root canals of extracted human teeth. *International Endodontic Journal* 46, 1–8

Schmidt-Ott K. (2004) Plasma-Reduction: Its Potential for Use in the Conservation of Metals. *Proceedings of Metal*, 235-246

- Sterflinger K. i Querner P. (2013) Fungi and insects as deterioration agents in museums - a comparison U: *Integrated Pest Management (IPM) in Museums, Archives and Historic Houses - Proceedings of the International Conference in Vienna, Austria, Beč, Austrija*, str. 47-53
- Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmanson J., i Leprince P. (2006) Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 61, 2-30
- Tenuta LM, Zamataro C.B., Del BelCury A.A., Tabchoury C.P., Cury J.A. (2009) Mechanism of fluoride dentifrice effect on enamel demineralization. *Caries Res* 43, 278-285
- Terrier O., Yver M., Barthe´le´my M., Bouscambert-Duchamp M., VanMechelen D., Morfin F., Billaud G., Ferraris O., Rosa-Calatrava M., Moules V. (2009) Cold oxygen plasma technology efficiency against different airborne respiratory viruses. *Journal of Clinical Virology* 45, 119-124
- Tonini F. (2015) *L'Intervento di restauro sul supporto ligneo U: La scultura lignea tecniche e restauro: manuale per allievi restauratori*, Padova, Italija, str. 163-182
- Unger A., Schniewind A.P., Unger W. (2001) *Conservation of Wood Artifacts U: Physical control methods*, Berlin, Njemačka, str. 327-354
- Vleugels M., Shama G., Deng X.T., Greenacre E., Brocklehurst T., Kong M.G. (2005). Atmospheric plasma inactivation of biofilmforming bacteria for food safety control. *IEEE Transactions on Plasma Sciences* 33, 824–828
- Voltolina S., Favaro M., Goossens V., Nodari L., Schalm O., Egel E., Verga Falzacappa E., Pavlova I., Stefanova M. i Mattiazzo F. (2014): PANNA Project: Assessment of a Novel Methodology for Plasma Cleaning, Coating Application and Diagnostics and Coating Removal U: *VIII Congresso Nazionale di Archeometria Scienze e Beni Culturali: stato dell'arte e prospettive*, Bologna, Italija, str. 1-3
- Wang R.;Nian W.;Wu H.;Feng H.;Zhang K.;Zhang J.;Zhu W.;Becker K.;Fang J (2012) Atmospheric-pressure cold plasma treatment of contaminated fresh fruit and vegetable slices: Inactivation and physiochemical properties evaluation. *Eur. Phys. J. D The European Physical Journal D* 66, 1–7
- Yun H, Kim B, Jung S, Kruk Z.A., Kim D.B., Choe W. (2010) Inactivation of *Listeria monocytogenes* inoculated on disposable plastic tray, aluminum foil, and paper cup by atmospheric pressure plasma. *Food Control* 21, 1182-1186

6. SAŽETAK

Plazma je parcijalno ionizirani plin kojeg čine ioni, elektroni i nenabijene čestice. Razlikujemo dva tipa plazmi - termalnu i hladnu plazmu. Atmosferski plazmeni mlazovi hladni su tip plazmi, temperature 30-50 °C. Kemijski reaktivnima ih čini stvaranje radikala (O, O₃, H₂O₂, itd.) i UV svjetla u mlazu i području oko mlaza, što omogućuje inaktivaciju širokog spektra mikroorganizama. Tretman hladnim atmosferskim plazmenim mlazom ne predstavlja opasnost za zdravlje ljudi niti okoliš jer su svi plazmeni radikali kratkoživi i djeluju lokalno na mjestu primjene, a uz to je i ekonomski isplativ.

U stomatologiji, konvencionalne metode liječenja i prevencije oralnih bolesti (pranje zuba, antibiotici i drugi lijekovi, mehaničko bušenje itd.) su ograničene i mogu dovesti do neželjenih nuspojava, a metode koje uključuju zagrijavanje živih tkiva su opasne. Hladne atmosferske plazme pokazale su se manje destruktivnim tretmanom jer, zahvaljujući niskim temperaturama, ne dolazi do uništavanja zdravog tkiva i uzrokovanja boli, a učinkovite su u ubijanju bakterija.

U prehrambenoj industriji postojeće metode dezinfekcije i sterilizacije namirnica i ambalaža bazirane su uglavnom na letalnom djelovanju visokih temperatura na patogene što ograničava njihovu primjenu, a ne-termalne metode većinom su ekonomski neisplativije, opasnije po ljudsko zdravlje i okoliš te mogu negativno utjecati na kvalitetu namirnica. Tretman hladnom atmosferskom plazmom stoga se nudi kao nova i obećavajuća alternativa antimikrobnog tretmana prehrambenih proizvoda.

U konzervatorsko-restauratorskoj struci dezinfekcija umjetnina najčešće se vrši kemijskim sredstvima, plinovima ili γ -zračenjem, a većina tretmana štetna je za ljudsko zdravlje i okoliš te ekonomski neisplativa pa se potiče razvoj metoda tretiranja umjetnina hladnim atmosferskim plazmenim mlazovima.

7. SUMMARY

Plasma is a partially ionized gas with ions, electrons and uncharged particles. There are two types of plasma: thermal and cold atmospheric plasma. Cold atmospheric pressure plasma jet is type of cold plasma with temperatures between 30-50 °C. Radicals (O, O₃, H₂O₂, etc.) and UV light in jet and area around the jet make them chemically reactive and enable inactivation of a wide spectrum of microorganisms. Treatment with a cold atmospheric plasma jet isn't harmful for human health and environment because all plasma radicals are short-living and act locally at the site of application, and it is financially acceptable.

In dentistry, conventional treatments and prevention of oral disease (teeth brushing, antibiotics and other medicines, mechanical drilling etc.) have limitations and may lead to unwanted side effects. Methods that include heating of living tissues are dangerous. Cold atmospheric plasmas have been shown to be less destructive treatment and, because of their low temperatures they don't cause destruction of healthy tissue or pain and are highly efficient at killing bacteria.

In the food industry, the existing disinfection and sterilization methods of food and packaging are based mainly on lethal effects of high temperature on pathogens, limiting their use, and non-thermal methods are mostly costly, more dangerous for human health and the environment and can adversely affect the quality of food. Cold atmospheric plasma treatment is therefore offered as a new and promising alternative for antimicrobial treatment of food products.

In conservation/restoration, disinfection of artwork is mostly performed by chemicals, gasses or gamma radiation. Current methods are costly and often dangerous for human health and the environment so it is desirable to develop treatments with cold atmospheric pressure plasma jets.