

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet

University of Zagreb, Faculty of Textile Technology



ZBORNİK RADOVA

**11. Znanstveno – stručnog savjetovanja
TEKSTILNA ZNANOST I GOSPODARSTVO**

BOOK OF PROCEEDINGS

**11th Scientific – Professional Symposium
TEXTILE SCIENCE & ECONOMY**

24. siječnja 2018, Zagreb, Hrvatska
24th January 2018, Zagreb, Croatia

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet
University of Zagreb Faculty of Textile Technology

TEKSTILNA ZNANOST I GOSPODARSTVO

TEXTILE SCIENCE AND ECONOMY

ZBORNİK RADOVA BOOK OF PROCEEDINGS

11. znanstveno – stručnog savjetovanja

11th Scientific – Professional Symposium

TEKSTIL, KOŽA I OBUĆA – SEKTOR „ODRŽIVOG“ RAZVOJA U RH
TEXTILE, LEATHER, AND FOOTWEAR – THE SECTOR OF
“SUSTAINABLE” DEVELOPMENT



24. siječnja 2018, Zagreb, Hrvatska
24th January 2018, Zagreb, Croatia



ISSN (CD – ROM): 2459-8186
ISSN (On- line): 2584-6450

PRIMJENA PLAZME NA BAZI DIELEKTRIČNOG BARIJERNOG PRAŽNjenja ZA MODIFIKACIJU SVOJSTAVA TEKSTILNIH MATERIJALA

APPLICATION OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA ON MODIFICATION OF TEXTILE MATERIAL PROPERTIES

Jelena PERAN; Sanja ERCEGOVIĆ RAŽIĆ & Katarina IŠTEF

Sažetak: U ovome radu dan je uvod u atmosferske plazme koje se primjenjuju u tekstilnoj industriji, s posebnim naglaskom na svojstva i primjenu atmosferske plazme na bazi dielektričnog barijernog pražnjenja (DBD). DBD predstavlja jedan od 4 osnovna načina dobivanja hladne plazme pri atmosferskom tlaku, a karakteristika mu je primjena dielektričnog materijala u sustavu elektrodi koji osigurava nastajanje i stabilnost nastale hladne plazme. Primjena unutar tekstilne industrije glavnim dijelom je orijentirana na postupke predobrade tekstilnih materijala putem procesa čišćenja, aktivacije i funkcionalizacije, nagrizanja te polimerizacije u svrhu povećanja sorpcijskih svojstava te postupaka mokrog oplemenjivanja poput (bio)iskuhavanja, bojadisanja, antimikrobnih obrada, dobivanja kozmetotekstilija, termički stabilnih uzoraka i dr. Pregledom različitih dosadašnjih objavljenih istraživanja primjene DBD atmosferske plazme može se uvidjeti važnost i učinkovitost plazma tehnologije kao ekološki i ekonomski prihvatljive alternative dosadašnjim konvencionalnim postupcima obrada.

Abstract: This paper gives an introduction in the field of atmospheric pressure plasma technology and its application in textile industry, with particular emphasis on the properties and application of atmospheric dielectric barrier discharge plasma (DBD). DBD is one of four basic methods developed for generation of cold plasma at atmospheric pressure. Its characteristic is the application of a dielectric material in the electrode system, which ensures the creation and stability of generated cold plasma. The application within the textile industry is mainly oriented to the pretreatment of textile materials through surface cleaning, activation and functionalization, etching and polymerization in order to increase sorption properties and textile wet processes such as (bio)scouring, dyeing, antimicrobial treatments, cosmeo-textiles, thermal stability etc. By reviewing various published researches related to the application of atmospheric DBD plasma, the importance and efficiency of plasma technology as ecologically and economically acceptable alternative to conventional processing methods is visible.

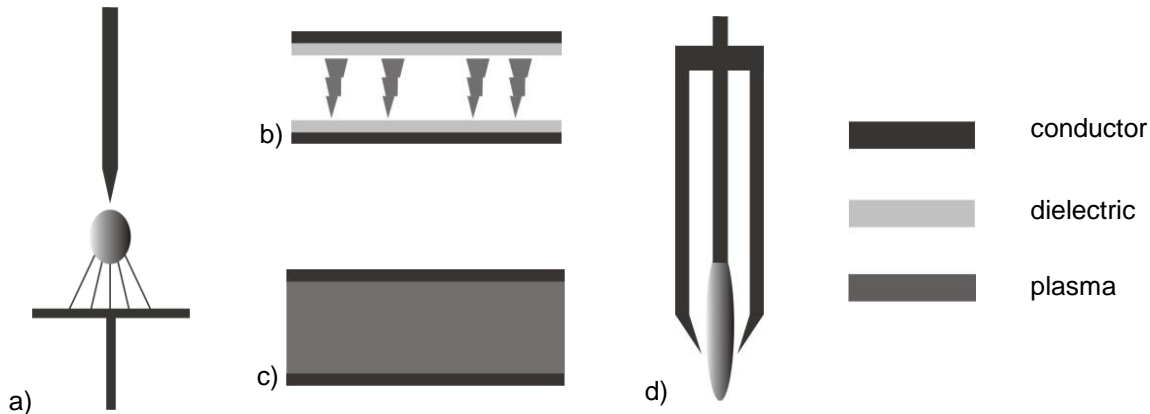
Ključne riječi: atmosferska plazma na bazi dielektričnog barijernog pražnjenja (DBD), postupci predobrada, ekološki i ekonomski prihvatljiv postupak

Keywords: atmospheric dielectric barrier discharge plasma (DBD), pretreatment processes, ecologically and economically acceptable process

1. Uvod u atmosferske plazme

Pojam plazme kao četvrtog agregatnog stanja uveden je 1928. godine (Irving Langmuir), a otkriće se pripisuje britanskom znanstveniku William Crooksu (1879. god.) [1]. Od tada, tehnologija plazme primjenjuje se u brojnim područjima poput biomedicine, elektronike, metalurgije, industriji proizvodnje ozona, zrakoplovnoj industriji, tekstilnoj industriji i dr. [2]. Plazma nastaje dovođenjem visoke energije plinu putem visoke temperature (vruće plazme) ili primjenom vanjskog električnog polja (hladne plazme). Dovođenjem energije elektronima u plinu dolazi do ubrzanog gibanja elektrona te interakcije s molekulama i atomima unutar plina u vidu elastičnih i neelastičnih sudara. Posljedice sudara su brojne reakcije poput ionizacije, eksitacije i disocijacije koje rezultiraju stvaranjem pozitivnih i negativnih iona, elektrona, slobodnih radikala, fotona i drugih električki nabijenih čestica [3, 4]. Usprkos postojanju brojnih čestica unutar plazme, ona se smatra električki neutralnom (kvazineutralno stanje) što znači da je koncentracija pozitivno i negativno nabijenih čestica jednaka [5]. Hladne plazme, pogodne za primjenu s termički osjetljivim materijalima poput tekstila, mogu se s obzirom na tlak pri kojem nastaju, podijeliti na niskotlačne i hladne plazme. U slučaju niskotlačnog plazma sustava, tlak unutar zatvorene komore se smanjuje primjenom vakuum pumpe do vrijednosti od 0,1 mbar do 1,0 mbar, nakon čega slijedi uvođenje radnog plina između sustava elektrodi. Dovođenjem elektromagnetske energije plinu u uvjetima niskog tlaka dolazi do stvaranja plazme [6]. Stvaranje hladne plazme pri atmosferskom tlaku je otežano. Pri povišeni tlakovima plazma ima sklonost prijelaza iz tinjajućeg stanja hladne plazma u iskrece stanje vruće plazme. Naime, s porastom tlaka raste broj sudara slobodnih elektrona i neutralnih čestica pri

čemu elektroni gube toplinu, a ioni i neutralne čestice dobivaju na toplini do trenutka izjednačenja temperature svih čestica u plazmi, tj. prijelaza u iskreće stanje. Gustoća plazme, koju čini broj slobodnih elektrona, se povećava, a s njom raste i sposobnost provođenja struje. Istovremeno, ukupni volumen plazme se smanjuje te prelazi u oblik vruće iskre. Dizajn sustava atmosferskih plazmi koji utječe na stabilizaciju tinjajućeg stanja plazme uključuje posebnu izvedbu elektrodi u vidu oblika, materijala i međusobnog razmaka, primjenu različitih vanjskih izvora energije, izolacijskog sloja na površini elektrodi, primjenu otpornika, plemenitih plinova i različitih sustava hlađenja. Sukladno tome razvijena su četiri osnovna tehnološka rješenja dobivanja atmosferskih plazmi (i) pražnjenje koronom (*eng. corona discharge*), (ii) dielektrično barijerno pražnjenje (*eng. dielectric barrier discharge, DBD*), (iii) pražnjenje tinjanjem (*eng. atmospheric pressure glow discharge, APGD*) i (iv) plazmeni mlaz (*eng. atmospheric pressure plasma jet, APGD*). Sl. 1. shematski prikazuje navedene tipove atmosferskih plazmi [3, 7].



Slika 6: Shematski prikaz vrsta atmosferskih plazmi; a) korona, b) dielektrično barijerno pražnjenje, c) pražnjenje tinjanjem i d) plazmeni mlaz [3, 7]

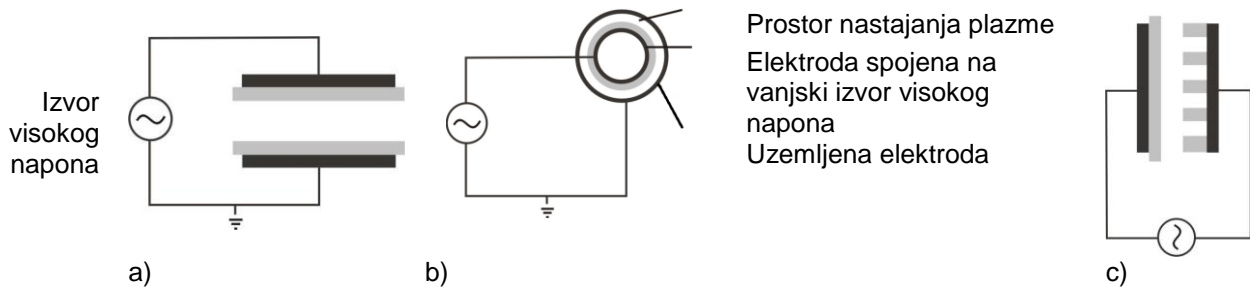
Pražnjenje koronom (sl. 1a) je proces električnog pražnjenja uzrokovanog električnim poljem visokog napona ili visoke frekvencije između dviju asimetričnih elektrodi. Korona sustav u pravilu sadrži dvije elektrode od kojih je jedna visoke, a druga niske zakrivljenosti. S obzirom na polarnost napona elektrode visoke zakrivljenosti, razlikujemo pozitivni i negativni korona sustav, a rezultat električnog pražnjenja je uglavnom filamentni oblik plazme koji sadrži niz mikronaboja cilindričnog oblika. Nedostatak pražnjenja koronom je upravo nastajanje filamentnog oblika plazme čija primjena može rezultirati nejednoličnom obradom supstrata [8].

Dielektrično barijerno pražnjenje (sl. 1. b) je proces električnog pražnjenja između dviju, najčešće simetričnih planarnih elektrodi, od kojih je barem jedna elektroda prekrivena dielektrični materijalom poput stakla, kvarca, keramike, plastike, silikona i dr. Najčešće nastaje filamentni oblik plazme, ali je moguće dobivanje i jednolično distribuirane plazme [9]. *Pražnjenje tinjanjem* (sl. 1 c) nastaje između dviju metalnih elektrodi bez prisustva dielektričnog materijala koje rezultira nastajanjem jednolično distribuirane plazme helija i drugih plemenitih plinova. Zbog jednostavnije konfiguracije sustava i nastajanja jednolične plazme, ovaj tip plazme izuzetno je pogodan za primjenu u tekstilstvu, ali je ograničen na primjenu plemenitih plinova te je visoka opasnost od prelaska u vruće stanje plazme [3, 10].

Sve prisutniji postupak obrade različitih supstrata uključuje primjenu *plazmenog mlaza* (sl. 1 d). Navedeni sustav sastoji se od dviju cilindričnih elektrodi kroz koje prolazi radni plin, pri čemu se elektroda spojena na vanjski izvor energije nalazi unutar druge elektrode. Postoje različite izvedbe sustava plazmenog mlaza, a prema izvedbi elektrodi razlikuju se (i) mlazovi bez dielektričnog materijala, (ii) izbojni mlazovi s dielektričnom barijerom (IMDB), (iii) IMDB-u slični mlazovi te (iv) plazmeni mlazovi s jednom elektrodom [11].

2. Dielektrično barijerno pražnjenje

Kao što je već spomenuto, za sustave dielektričnog barijernog pražnjenja karakteristična je primjena dielektričnog (izolacijskog) materijala koji osigurava nastajanje i stabilnost hladne plazme, jednoličnu distribuciju filamenata plazme po površini elektrode (u slučaju nastajanja filamentnog oblika plazme) te jednoličnu obradu supstrata [12]. Postoje različite konfiguracije DBD sustava, a osnovna podjela uključuje (i) planarne konfiguracije, (ii) kružne i (iii) specijalne konfiguracije (sl. 2) [9].



Slika 7: Shematski prikaz konfiguracija DBD sustava: a) planarna konfiguracija, b) kružna konfiguracija, c) specijalna konfiguracija s perforiranim dielektričnim materijalom [9, 13]

Prva primjena DBD-a vezana je uz proizvodnju ozona, a pripisuje se Werner von Siemensu (1857. god.) [14]. Primjenom visokog napona izmjenične struje frekvencije u rasponu od radiofrekvencije do frekvencije mikrovalova dolazi do ionizacije plina između sustava elektrodi i nastajanja lokaliziranih plazmenih izboja koji se jednolično distribuiraju po površini dielektričnog materijala. Pomnom varijacijom različitih parametara poput izbora radnog plina i dielektričnog materijala, oblika elektrodi i frekvencije može nastati jednolično distribuirana plazma. Točan mehanizam nastajanja jednoličnog, a ne filamentnog oblika plazme još se istražuje, ali pretpostavka je da koncentracija slobodnih elektrona u trenutku ionizacije mora biti dovoljno velika da se izbjegne lokalizacija naboja i formiranje pojedinačnih izboja. Primjenom jednolično distribuirane plazme u obradama tekstilnih supstrata može se osigurati homogena obrada [15].

2.1 Primjena DBD atmosfere plazme u tekstilstvu

Ključnu ulogu u procesu proizvodnje tekstilnih proizvoda predstavlja oplemenjivanje tekstila omogućujući daljnju preradu, poboljšanje estetskih karakteristika, udobnosti i dobivanja proizvoda dodane vrijednosti. Sam proces i primijenjene metode razlikuju se ovisno o sirovinskom sastavu materijala i predviđenoj krajnjoj namjeni proizvoda, ali zajednička im je velika potrošnja vode, kemikalija i energije te problem otpadnih voda. U skladu s konceptom održivog razvoja i smjernicama glede zaštite okoliša, razvijaju se nove tehnologije i pristupi u procesima oplemenjivanja tekstila. Jedan od ekološki prihvatljivih postupaka predstavlja plazma tehnologija čija primjena smanjuje potrošnju kemikalija i energije, bez primjene i onečišćenja vode. Električki nabijene čestice unutar plazme mogu međudjelovati s površinom tekstilnog materijala fizikalnim i kemijskim površinskim procesima rezultirajući modifikacijom površine uklanjanjem čestica ili adicijom sredstava. U prvu skupinu procesa ubrajaju se postupci čišćenja i nagrizanja površine, a u drugu skupinu procesi aktivacije, te naslojavanja ili polimerizacije. Aktivne čestice u plazmi imaju dovoljno energije za kidanje veza koje nastaju između nečistoća prirodno prisutnih na površini tekstilnog supstrata što rezultira *čišćenjem površine*. Daljnjim procesom obrade dolazi do ugradnje aktivnih skupina prisutnih u plazmi što dovodi do stvaranja novih funkcionalnih skupina na površini materijala poput hidroksilne skupine (-OH), karbonilne skupine (-C=O), karboksilne skupine (-COOH), amino skupine (-NH₂) ili nitratne skupine (-NO₃) i dr. Ovaj proces naziva se *aktivacija površine*, a posljedica je povećanje slobodne površinske energije čime se povećava afinitet supstrata prema drugim tvarima. Aktivacija površine nije trajna stoga se najčešće primjenjuje kao predobrada prije daljnjih postupaka oplemenjivanja. U procesu *nagrizanja površine* dolazi do kemijske reakcije između aktivnih skupina polimernog materijala i reaktivnih čestica plazme te fizikalnih reakcija sudaranjem čestica plazme s površinom materijala. Primjenom plazme mogu se nanositi organske i anorganske čestice na površinu materijala polimerizacijom sredstva u površinskom sloju materijala. Naslojavanje sredstava može se ostvariti primjenom procesnog plina sa sposobnošću polimerizacije u plazmi te uparivanjem tekućeg prekursora u sustavu plazme (postupak plazmom pospešene depozicije, PE-CVD). S obzirom da je atmosferska plazma na bazi dielektričnog barijernog pražnjenja otvoreni sustav, najčešće se primjenjuje za procese čišćenja, nagrizanja i aktivacije površine [3, 6, 12, 17-19].

Hladna plazma je pogodna za primjenu u svrhu modifikacije površine svih vrsta tekstilnih materijala. Pamučni materijali prolaze kroz niz procesa mokrog oplemenjivanja od odšrobljavanja, iskuhavanja, mercerizacije, bijeljenja i bojadisanja do završnih postupaka oplemenjivanja u svrhu dobivanja željenih funkcionalnih svojstava. Primjena plazme kao predobrade može pospešiti učinkovitost navedenih postupaka, uz istovremenu smanjenu primjenu raznovrsnih kemijskih sredstava koje postupci zahtijevaju. Karahan, H.A. i Özdoğan, E. [20] istražili su utjecaj obrade sirovih pamučnih uzoraka primjenom atmosfere plazme na bazi dielektričnog pražnjenja na kemijska i morfološka svojstva. Kao radni plin primijenjeni su argon i zrak, a rezultati su iskazani kroz promjenu hidrofilnosti, FT-IR ATR, XPS i SEM analizu. Rezultati ukazuju na značajno

povećanje hidrofilitnosti i sorpcijskih svojstva obrađenih uzoraka, posebice primjenom argonove plazme što se može pripisati značajnom nagrizanju površine supstrata. Djelomično uklanjanje hidrofobnog sloja na površini supstrata uzrokovalo je stvaranje novih hidrofilitnih skupina i povećanje slobodne površinske energije. FT-IR ATR i XPS analize ukazuju na smanjenje sadržaja ugljika i povećanje sadržaja kisika koje utjecalo na povećanje hidrofilitnosti i kvasivosti uzorka. Proces nagrizanja površine i povećanje hrapavosti potvrđeno je SEM analizom. Može se uočiti visoka učinkovitost plazma obrada na modifikaciju kemijskih i fizikalnih svojstava pamučnih uzoraka. Navik, R.G. et al. [21] također su optimirali parametre obrade iskuhanih i izbjeljenih pamučnih uzoraka primjenom DBD atmosferske plazme i zraka kao radnog plina. FT-IR analizom dokazano je povećanje broja hidrofilitnih skupina sa sadržajem kisika poput hidroksilne skupine (-OH), karbonilne skupine (-C=O) i karboksilne skupine (-COOH). Osim povećanja hidrofilitnosti i stupnja iscrpljenja reaktivnog bojila, uočeno je povećanje čvrstoće materijala. Naime, nagrizanje površine djelovanjem plazme uzrokuje stvaranje pukotina mikro veličine koje može utjecati, uz povećanje adsorpcije i difuzije vode i bojila u vlakno, na stvaranje kohezijski sila te povećanje čvrstoće. Alternativni postupak konvencionalnom postupku iskuhavanja predstavlja bioiskuhavanje, odn. enzimatska obrada prirodnih celuloznih materijala sa svrhom uklanjanja neceluloznih nečistoća prirodno prisutnih na vlaknu. Kutikula celuloznog vlakna, u kojoj se nalazi najveća količina prisutnih hidrofobnih nečistoća poput voskova i masti, predstavlja prirodnu barijeru enzimima pektinaze primjenjivanim u postupku bioiskuhavanja. Wang Q. et al. [22] pristupili su prolaženju adekvatnog rješenja za navedeni problem, pri čemu su ispitali mogućnost primjene niskotlačne i atmosferske DBD plazme kao preobrade. Rezultati ukazuju da primjena obje vrste plazmi pospješuje postupak bioiskuhavanja. Atmosferska DBD plazma posebice je prikladna za primjenu s obzirom na ekonomičnost i jednostavnost sustava te mogućnosti ugradnje u kontinuirani proces. Pregled različitih istraživanja primjene DBD atmosferske plazme kao preobrade na pamučnim uzorcima prikazan je u tablici 1.

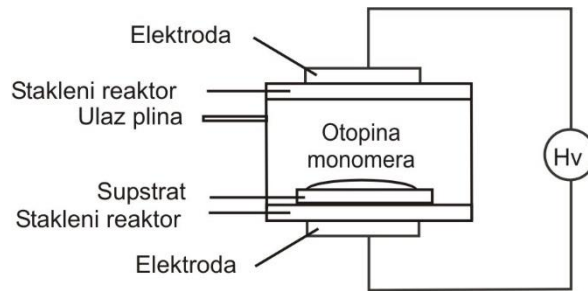
Tablica 4: Pregled različitih istraživanja primjene DBD atmosferske plazme u svrhu preobrade

Sirovinski sastav	Radni plin	Svrha	Postignuta svojstva	Ref.
pamuk, pamuk/PES	zrak, argon	pospješiti postupak tiska s prirodnim košenil bojilom	– povećanje sposobnosti kvašenja te čvrstoće – poboljšanje iscrpljenja bojila i postojanosti tiska	[23]
pamul	zrak, argon	pospješiti postupak bojadisanja	– povećanje iscrpljenja kiselog bojila	[24]
pamuk, viskoza	zrak, dušik, kisik	pospješiti ugradnju srebra iz otopine AgNO ₃	– homogena distribucija srebrovih nanočestica (dušikova plazma), – adsorpcija srebrovih iona (kisikova plazma), – adsorpcija srebrovih nanočestica i iona (plazma zraka)	[25]
pamuk/PES	zrak	pospješiti vezivanje srebra iz otopine AgNO ₃ sa svrhom dobivanja antimikrobne učinkovitosti	– povećanje hidrofilitnosti, – pospješeno vezivanje srebra, – antimikrobna učinkovitost na bakterijske vrste staphylococcus aureus, escherichia coli i gljivicu candida albicans – postojanost obrade na uvjete pranja	[26]
pamuk, PES, PA	zrak, kisik, argon, helij	povećanje hidrofilitnost i oleofilitnosti	– povećanje površinske energije, – povećanje hidrofilitnosti i oleofilitnosti,	[27]
pamuk/PES	zrak	pospješiti vezivanje mikrokapsula s Aloe verom (kozmetotekstilije)	– povećanje vezivanja mikrokapsula i do 200 %, – postojanost obrade	[28]

* PES – polieterska vlakna, PA – poliamidna vlakna

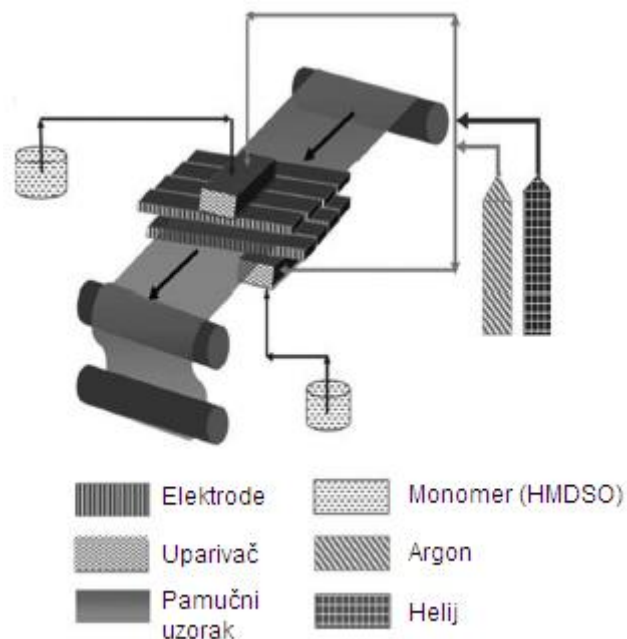
Uz primjenu DBD atmosferske plazme u svrhu preobrade, istraženi su i postupci direktne polimerizacije u plazmi. Molina, R. et al. [29] istražili su mogućnost postizanja hidrofobnog sloja na površini pamučnog supstrata *in situ* polimerizacijom tekućeg prekursora (monomera na bazi fluora u otopini etanola) u DBD plazmi. Uparivanje i polimerizacija tekućeg monomera u plazmi je kompleksan proces u kojemu dolazi do brojnih kemijskih i fizikalnih reakcija. Pražnjenjem unutar ili u kontaktu s tekućim prekursorom dolazi do stvaranja intenzivne UV radijacije te brojnih reaktivnih vrsta. Postupak polimerizacije je u potpunosti razrađen

primjenom niskotlačnog plazma sustava, a primjenom atmosferskih plazmi još se istražuje. U navedenom istraživanju, pamučni uzorci za sadržajem tekućeg prekursora direktno su uvedeni u sustav atmosferske DBD plazme, pri čemu je helij primijenjen kao radni plin (sl. 3).



Slika 8: Shematski prikaz primijenjenog sustava atmosferske DBD plazme [29]

Rezultati ukazuju na uspješno proveden proces *in situ* polimerizacije, pri čemu se promjenom koncentracije monomera u otopini etanola može direktno utjecati na količinu polimera nanesenog na površinu pamučnog supstrata. Palaskar, S. et al. [30] također su istražili mogućnost dobivanja hidrofobnog (vodoodbojnog) sloja na površini uzoraka iz mješavine pamuka i poliestera primjenom atmosferske DBD plazme. Razlika u postupku je u primjeni heksametilidisiloksana (HMDSO) kao tekućeg prekursora koji nije direktno nanesen na površinu supstrata, već je priključen na sustav plazme vanjskom jedinicom. Radni plinovi argon i helij primijenjeni su kao kerijeri, tj. kao prijenosnici uparenog tekućeg prekursora na površinu supstrata (sl. 4).



Slika 9: Shematski prikaz primijenjenog sustava DBD atmosferske plazme u prikladnog za kontinuiranu obradu uzoraka [30]

Rezultati ispitivanja kontaktnog kuta i vodoodbojnosti (sprej test) ukazuju na povećanu otpornost uzorka na pojedinačne kapi vode, a rezultati FT-IR analize na prisustvo Si-O-Si i Si-CH₃ skupina na površini supstrata. Dobivanje termičke otpornosti pamučnih uzoraka primjenom novih fosforamidnih monomera istražili su Edwards, B. et al. [31]. Postupak je uključivao sintezu novih monomernih spojeva koji su prethodno uranjanjem uzorka u kupelj nanoseni na pamučne supstrate. Rezultati ukazuju da primjenom argonove plazme dolazi do polimerizacije spojeva te nanašanja na površinu supstrata. Dobivena je povećana, ali ne i potpuna termička stabilnost ispitivanih uzoraka. Istraživanja ukazuju da postoji veliki potencijal primjene atmosferske DBD plazme u procesu polimerizacije, no sam proces je još potrebno istražiti.

Atmosferska DBD plazma primjenjuje se i na proteinskim vlaknima poput vune i svile. Svila je prirodno proteinsko vlakno koje sadrži ponavljajuće hidrofobne i hidrofilne polipeptidne jedinice. Hidrofilnost svilenih vlakana može se pospješiti predobradom s otopinama amina poput serina, glicina i asparaginske kiseline, a predobrada atmosferskom plazmom predstavlja jedan od alternativnih ekološki prihvatljivijih postupaka. Rani, K. V. et al. [32] dokazali su da predobrada DBD plazmom primjenom zraka kao radnog plina utječe na stvaranje dodatnih hidroksilnih skupina (-OH) koje utječu na povećanje hidrofilnih svojstava uzoraka svile.

Zanini, S. et al. [33, 34] istražili su djelovanje atmosferske DBD plazme primjenom dušika i mješavine zraka i vodene pare kao radnih plinova na uzorke kašmira i mješavine vune i kašmira. Rezultati ukazuju da djelovanjem plazme dolazi do nagrizanja vanjskog lipofilnog sloja masnih kiselina i funkcionalizacije površine. Obrada plazmom zraka sa sadržajem vlage povećala je sadržaj cistina, cistin monoksida i cistin dioksida što ukazuje na cijepanje i oksidaciju disulfidnih i tioesterskih skupina. Daljnjim istraživanjima potvrdili su reakcije površinske oksidacije i povećanje hidrofilnosti ispitivanih uzoraka.

Pored različitih obrada prirodnih materijala te materijala iz umjetnih vlakana dobivenih iz sintetskih polimera poput polipropilena [35, 36], poliamida 6.6 [37, 38], poliamida 6 [39], polietilen tereftalata [40, 41, 42] i aramida [43, 44, 45], zanimljiva je primjena DBD atmosferske plazme u pročišćavanju voda tekstilne industrije nakon procesa bojadisanja [46, 47, 48]. Bojila tekstilne industrije predstavljaju veliki onečišćivač voda posebice zbog kompleksne strukture i različitosti u kemijskom sastavu. Tichonovas, M. et al. [46] primijenili su postupak oksidacije zaostalog bojila nakon procesa bojadisanja primjenom DBD atmosferske plazme te zraka kao radnog plina. Rezultati istraživanja ukazuju da je primijenjenim postupkom moguće ukloniti i do 95 % različitih zaostalih bojila pri čemu, ovisno o vrsti bojila, nastaju produkti poput karboksilnih kiselina, nitrata, amida i amina, a ukupna toksičnost vode gotovo je u potpunosti smanjena. Niska potrošnja energija i velika brzina postupka čine ovu tehnologiju kompetetivnom u usporedbi sa konvencionalnim kemijskim metodama pročišćavanja.

3. Zaključak

Atmosferska plazma na bazi dielektričnog barijernog pražnjenja može se primijeniti na svim vrstama tekstilnih materijala u pogledu kemijskog sastava i strukture. Predobrada primjenom različitih radnih plinova, kroz plazma specifične kemijske i fizikalne reakcije, utječe na čišćenje površine, povećanje broja hidrofilnih funkcionalnih skupina, povećanje slobodne površinske energije i nagrizanje površine. Navedeni procesi utječu na povećanje hidrofilnosti, ali i afiniteta prema drugim organskim i anorganskim česticama. Na taj način moguće je pospješiti adsorpciju i difuziju bojila u vlakno, odn. proces bojadisanja i tiska, bioiskuhavanje, učinkovitost antimikrobnih obrada, vezivanje mikrokapsula te druge procese mokrog oplemenjivanja i funkcionalnih obrada. Veliki potencijal ima i primjena procesa diektrne polimerizacije u plazmi koja je trenutno u centru istraživanja. Primjena DBD atmosferske plazme može predstavljati i moguće rješenje problema otpadnih voda tekstilne industrije, posebice nakon procesa bojadisanja.

Literatura

- [1] Kale, K. H., Desai, A. N.: Atmospheric pressure plasma treatment of textiles using non-polymerising gases, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, **36** (2011), pp. 289-299, ISSN 0971-0426
- [2] Shahidi, S., Ghoranneviss, M., Moazzenchi, B.: Application of plasma in different branches of industries, *Proceedings of The 4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion*, Bangkok, Thailand, July, 2012, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
- [3] Shishoo, R.: *Plasma technologies for textiles*, Published by Woodhead Publishing Limited in association with Textile Institute, Abington Hall, Abington, ISBN: 978-1-84569-073-1, Cambridge, England, (2007)
- [4] Kutlu, B. Cireli, A.: *Plasma technology in textile processing*, Dokuz Eylul University, Textile Engineering Department, 35100, Bornova-IZMIR.
- [5] Fridman, A.: *Plasma Chemistry*, Cambridge University Press, ISBN 0521847354, New York, (2008)
- [6] Sparavigna, A.: Plasma treatment advantages for textiles, (2008), *arXiv preprint arXiv:0801.3727*.
- [7] Tendero, C. et al.: Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochimica Acta Part B*, **61** (2006), pp. 2-30, ISSN 0584-8547
- [8] Kachi, M., Dascalescu, L.: Corona discharges in asymmetric electrode configurations, *Journal of Electrostatics*, **72** (2014) 1, pp. 6-12, ISSN 0304-3886
- [9] Brandenburg, R.: Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments, *Plasma Sources Science and Technology*, **26** (2017), pp. 1-29, ISSN 0963-0252

- [10] Li, X., et al.: Generation of a planar direct-current glow discharge in atmospheric pressure air using rod array electrode, *Scientific Reports*, **7** (2017), pp. 2672-2678, ISSN 2045-2322
- [11] Winter, J. et al.: Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **24** (2015), pp. 064001-064020, ISSN 0963-0252
- [12] Nema, S. K., & Jhala, P. B. *Plasma technologies for textile and apparel*, WPI India, ISBN 978-93-80308-95-1, New Delhi. (2015).
- [13] Kogelschatz, U., Eliasson, B.: Fundamentals and applications of dielectric-barrier discharges, In HAKONE VII Int. Symp. On High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Greifswald, 2000.
- [14] Kogelschatz, U.: Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications, *Plasma chemistry and plasma processing*, **23** (2003) 1, pp. 1-46, ISSN 0272-4324
- [15] Subedi, D., Joshi, U., & Wong, C.S.: Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasmas and Their Applications, in *Plasma Science and Technology for Emerging Economies (Ed: Rawat, R.)* Springer, Singapore, 2017, 693-737.
- [16] A new alternative for better modification of medical surfaces and textiles, technical paper, *Europlasma*, (2004), Oudenaarde, Belgium.
- [17] Buyle, G.: Nanoscale finishing of textiles via plasma treatment, *Materials Technology*, **24** (2009) 1, pp. 46-51, ISSN 1066-7857
- [18] Nickerson, R: Plasma surface modification for cleaning and adhesion, Polymers laminations and coatings conference, (1998), TAPPI PRESS, pp. 1101-1108
- [19] Hossain, M. M.: Plasma technology for deposition and surface modification (Vol. 4), (2008), Logos Verlag Berlin GmbH.
- [20] Karahan, H. A., & Özdoğan, E. Improvements of surface functionality of cotton fibers by atmospheric plasma treatment. *Fibers and polymers*, **9** (2008) 1, pp. 21-26, ISSN 1229-9197
- [21] Navik, R., Dalvi, A., Naikwade, M., & Cai, Y.: Effect of Dielectric Barrier Discharge Parameters on Certain Properties of Natural Polymeric Material (Cotton) Fiber, *American Journal of Polymer Science & Engineering*, **3** (2015) 2, pp. 183-197, ISSN 2575-5986
- [22] Wang, Q. et al.: Plasma-aided cotton bioscouring: Dielectric barrier discharge versus low-pressure oxygen plasma, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **29** (2009) 5, pp. 399-409, ISSN 1572-8986
- [23] Ahmed, H.M.: Treatment of Cotton Fabric with Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma and Printing with Cochineal Natural Dye, *Indian Journal of Science and Technology*, **10** (2017) 10, ISSN 0974-5645
- [24] Karahan, H.A et al.: Effects of atmospheric plasma treatment on the dyeability of cotton fabrics by acid dyes, *Coloration Technology*, **124** (2008), pp. 106-110, ISSN 1478-4408
- [25] Prsyazhnyi, V. et al.: Silver incorporation on viscose and cotton fibers after air, nitrogen and oxygen DBD plasma pretreatment, *Cellulose* **20** (2013), pp. 315-325, ISSN 0969-0239
- [26] Kostić, M. et al.: Silver-Loaded Cotton/Polyester Fabric Modified by Dielectric Barrier Discharge Treatment, *Plasma Processes and Polymers*, (2009) 6, pp. 58-67, ISSN 1612-8869
- [27] Kartick, K.S.: Improvement in water and oil absorbency of textile substrate by atmospheric pressure cold plasma treatment, *Surface & Coatings Technology*, **203** (2009), pp. 1336-1342, ISSN 0257-8972
- [28] Nascimento do Carmo, et al.: Plasma-assisted deposition of microcapsule containing Aloe vera extract for cosmeo-textiles, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **254** (2017), pp. 122007
- [29] Molina, R. et al.: Hydrophobic Coatings on Cotton Obtained by In Situ Plasma Polymerization of a Fluorinated Monomer in Ethanol Solutions, *ACS applied materials & interfaces*, **9** (2017) 6, pp. 5513-5521, ISSN 1944-8244
- [30] Palaskar, S. et al.: Dielectric barrier discharge plasma induced surface modification of polyester/cotton blended fabrics to impart water repellency using HMDSO, *Journal of Applied Polymer Science*, **122** (2011) 2, pp. 1092-1100, ISSN 1097-4628
- [31] Edwards, B. et al.: Towards flame retardant cotton fabrics by atmospheric pressure plasma-induced graft polymerization: synthesis and application of novel phosphoramidate monomers, *Surface and Coatings Technology*, **209** (2012), pp. 73-79, ISSN 0257-8972
- [32] Rani, K. V. et al.: Optimization and surface modification of silk fabric using DBD air plasma for improving wicking properties, *The Journal of The Textile Institute*, (2017), pp. 1-8, ISSN 0040-5000
- [33] Zanini, S. et al.: Characterization of atmospheric pressure plasma treated pure cashmere and wool/cashmere textiles: Treatment in air/water vapor mixture. *Applied Surface Science*, **349** (2015), pp. 235-240, ISSN 0169-4332
- [34] Zanini, S. et al.: Characterization of atmospheric pressure plasma treated wool/cashmere textiles: Treatment in nitrogen, *Applied Surface Science*, **427** (2018), pp. 90-96, ISSN 0169-4332
- [35] Fang, Z., et al. Comparison of surface modification of polypropylene film by filamentary DBD at atmospheric pressure and homogeneous DBD at medium pressure in air, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **42** (2009) 8, pp. 085204, ISSN 0022-3727

- [36] Yaman, N. et al.: Plasma treatment of polypropylene fabric for improved dyeability with soluble textile dyestuff, *Applied surface science*, **255** (2009) 15, pp. 6764-6770, ISSN 0169-4332
- [37] Oliveira, F. R., Zille, A., & Souto, A. P.: Dyeing mechanism and optimization of polyamide 6, 6 functionalized with double barrier discharge (DBD) plasma in air, *Applied Surface Science*, **293** (2014), pp. 177-186, ISSN 0169-4332
- [38] Oliveira, F. R. et al.: Reuse of effluent from dyeing process of polyamide fibers modified by double barrier discharge (DBD) plasma, *Desalination and Water Treatment*, **57** (2016) 6, pp. 2649-2656, ISSN 1944-3994
- [39] Ahmed, H. M., & Rashed, U. M.: Enhancing Ink Jet Printability & Antibacterial Properties of Polyamide 6 Fabric Using DBD Plasma, *Journal of Polymer Materials*, **32** (2015) 4, pp. 373, ISSN 09738622
- [40] De Geyter, N., Morent, R., & Leys, C.: Penetration of a dielectric barrier discharge plasma into textile structures at medium pressure. *Plasma Sources Science and Technology*, **15** (2006) 1, pp. 78-84, ISSN 0963-0252
- [41] Onsuratoom, S. et al.: Silver loading on DBD plasma-modified woven PET surface for antimicrobial property improvement, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **30** (2010) 1, pp. 191-206, ISSN 0272-4324
- [42] Takke, V. et al.: Studies on the atmospheric air-plasma treatment of PET (polyethylene terephthalate) woven fabrics: Effect of process parameters and of aging, *Journal of applied polymer science*, **114** (2009) 1, pp. 348-357, ISSN 1097-4628
- [43] Jia, C. et al.: Surface treatment of aramid fiber by air dielectric barrier discharge plasma at atmospheric pressure, *Applied Surface Science*, **257** (2011) 9, pp. 4165-4170, ISSN 0169-4332
- [44] Xi, M. et al.: Surface modification of aramid fiber by air DBD plasma at atmospheric pressure with continuous on-line processing, *Surface and Coatings Technology*, **202** (2008) 24, pp. 6029-6033, ISSN 0257-8972
- [45] Gu, R. et al.: Surface treatment of para-aramid fiber by argon dielectric barrier discharge plasma at atmospheric pressure, *Applied Surface Science*, **258** (2012) 24, pp. 10168-10174, ISSN 0169-4332
- [46] Tichonovas, M. et al.: Degradation of various textile dyes as wastewater pollutants under dielectric barrier discharge plasma treatment, *Chemical Engineering Journal*, **229** (2013), pp. 9-19, ISSN 1385-8947
- [47] Shang, K. et al.: Effect of persulfate on the degradation of Acid Orange 7 (AO7) by dielectric barrier discharge plasma, *Topics in Catalysis*, (2017), pp. 1-7, ISSN 1022-5528
- [48] Reddy, P. M. K. et al.: Degradation and mineralization of methylene blue by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor, *Chemical Engineering Journal*, **217** (2013), pp. 41-47, ISSN 1385-8947

Zahvala

Ovaj je rad financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom (IP-2016-06-5278).

Autor(i):

Jelena PERAN, mag. ing. techn. text.:

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet

Prilaz baruna Filipovića 28a

HR-10000 Zagreb:

Tel: +(385) (1) 3712 524

Fax: +(385) (1) 3712 599

E-mail: jperan@ttf.hr

doc. dr. sc. Sanja ERCEGOVIĆ RAŽIĆ:

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet

Prilaz baruna Filipovića 28a

HR-10000 Zagreb:

Tel: +(385) (1) 3712 523

Fax: +(385) (1) 3712 5299

E-mail: sanja.ercegovic@ttf.hr

Katarina IŠTEF, prvostupnica (baccalaurea) tekstilne tehnologije i inženjerstva

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet

Prilaz baruna Filipovića 28a

HR-10000 Zagreb:

E-mail: istefkatarina@gmail.com