

## Nove primjene mikrovalne energije u tekstilstvu

Ana Šaravanja, Sandra Bischof, Zorana Kovačević\*

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska

\*Dopisni autor: [zorana.kovacevic@ttf.unizg.hr](mailto:zorana.kovacevic@ttf.unizg.hr)

Prispjelo: 10. listopada 2024.

Prihvaćeno: 30. studenoga 2024.

UDK 677.021.15



Ovaj je rad licenciran pod licencom  
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

### Pregled

*U radu je prikazan utjecaj mikrovalova u oplemenjivanju tekstila, a naglasak je stavljen na njihovu primjenu za obradu biomase koja postaje sve značajniji izvor različitih sirovina pa tako i celuloznih vlakana. Raznovrsne obrade koje primjenjuju mikrovalnu energiju dobivaju sve veći značaj i počinju se sve više upotrebljavati u vrlo raznovrsnim sektorima jer imaju značajnu ekološku i ekonomsku prednost. Kao jedan od uspješnih primjera prikazana je primjena hladne argonove plazme u svrhu modifikacije površine i strukture lignoceluloznih vlakana. U najnovije vrijeme se mikrovalna energija počinje sve više primjenjivati u postupcima recikliranja otpada, te su u radu navedeni primjeri iz prakse. U zaključnom dijelu rada su date smjernice i preporuke koje mogu pridonijeti bržem uvođenju ove zelene tehnologije u iznimno značajan sektor tekstila, odjeće, kože i obuće.*

**Ključne riječi:** mikrovalna energija; oplemenjivanje tekstila; lignocelulozna biomasa; izolacija celuloznih vlakana

### Review

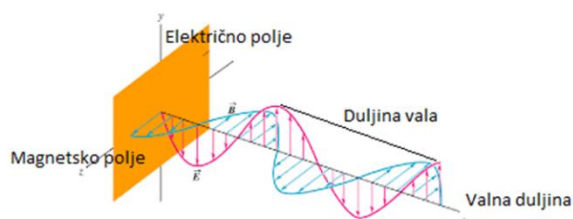
#### New applications of microwave energy in textiles

*The paper presents the impact of microwaves in textile finishing, focusing on the application for the processing of biomass, which is becoming an increasingly important source of various raw materials, including cellulosic fibres. Various processes utilising microwave energy are used more frequently in different sectors, as they offer significant advantages due to their environmental and economic benefits. One of such successful applications is the use of cold argon plasma, which improves the change in the structure of lignocellulose fibres. Recently, microwave energy is starting to be used more often in waste recycling procedures, and examples from practice are given in the paper. In the final part of the paper, guidelines and recommendations are given that can contribute to the faster introduction of this green technology in the extremely important sector of textiles, clothing, leather and footwear.*

**Keywords:** microwave energy; textile finishing; lignocellulosic biomass; cellulose fiber isolation

## 1. Uvod

Područje mikrovalnog (MW) zračenja nalazi se između infracrvenog i radio frekventnog zračenja u elektromagnetskom spektru, a valne duljine obuhvaćaju područje od 1 mm do 1 m. Elektromagnetski valovi koji se šire prostorom predstavljaju titraj obostrano povezanog električnog i magnetskog polja koje je okomito na njega (sl.1). Mikrovalovi se ubrajaju u grupu elektromagnetskih valova zbog svoje frekvencije između 300 MHz do 300 GHz.



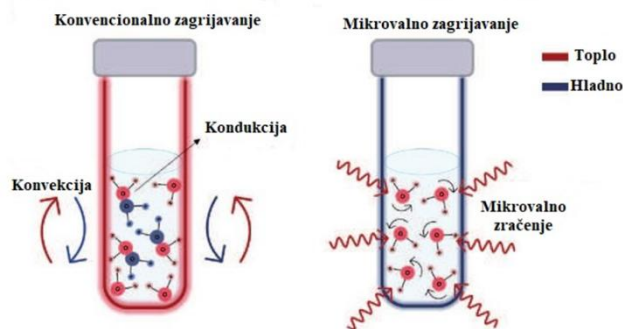
Sl.1 Shematski prikaz elektromagnetskih valova [1]

Zbog svoje iznimno male energije, mikrovalovi ne mogu izravno činiti promjene u strukturi molekule. Energija mikrovalova iznosi 0,125 kJ/mol [2], dok klasična kemijska veza posjeduje energiju od 335 do 85 kJ/mol. Elektromagnetski valovi se mogu apsorbirati i postati energetska jedinica zvana foton, a energija koju oni prenose ovisi o valnoj duljini i frekvenciji zračenja [3]. Njihova vrijednost je vrlo niska s obzirom na energiju potrebnu za razaranje kemijskih veza. Princip njihovog djelovanja je povećanje kinetičke energije u stimuliranim dipolnim molekulama, zbog čega one postaju pokretljivije te zbog povećane apsorpcije elektromagnetskog zračenja i posljedičnog trenja dolazi do zagrijavanja po čitavom volumenu [4].

Za učinkovitu primjenu mikrovalnog zračenja u sustavu su neophodne polarne molekule te su radne frekvencije uređaja podešene prema mediju koji koriste, a najčešće je to vodeni medij. Polarna molekula vode oscilira pri frekvenciji 2,45 MHz te primjenom mikrovalne tehnologije dolazi do rotacije molekula 5 milijuna puta u sekundi. Energija koju posjeduju mikrovalovi se može pretvoriti u toplinsku upravo rotacijom iona ili dipolnih molekula u odnosu na električno polje. S obzirom na ponašanje mikrovalova materijali se mogu svrstati u one koji apsorbiraju energiju mikrovalova (zagrijavaju se), one koji reflektiraju mikrovalnu energiju (ne zagrijavaju se) te na one koji propuštaju mikrovalnu energiju (ne zagrijavaju se). Mikrovalovima dovedena energija ima mogućnost pretvorbe u toplinsku: rotacijom dipolnih molekula ili iona prema negativnom/pozitivnom polu električnog polja, istezanjem velikih molekula i ion-

skom vodljivosti. Dipolna rotacija se definira kao interakcija gdje polarna molekula mijenja položaj prema električnom polju pri izuzetno velikoj brzini. Ta rotacija se događa zbog nastojanja molekula da usklade svoj dipolni moment s električnim poljem. Zbog velikih oscilacija stvara se frikcija koja se očituje kao toplina koja zagrijava materijal u interakciji s rotacijom. Osnovna razlika između mikrovalnog zagrijavanja i klasičnog je u načinu sušenja (sl.2). Kod klasičnog sušenja toplina prelazi na materijal iz okolnog zraka (konvekcija) ili grijaćeg tijela (kondukcija) pri čemu se javljaju veliki gubici topline.

Kod klasičnog sušenja karakteristično je prvenstveno površinsko sušenje kod kojeg toplina naknadno prodire u unutrašnjost materijala koja zato ostaje hladnija. Pozitivna karakteristika mikrovalnog sušenja je djelovanje elektromagnetskog zračenja po čitavoj površini, pa tako i unutrašnjosti, kao i širenje topline iz unutrašnjosti prema van. Kod mikrovalnog sušenja je smjer kretanja topline i vode isti te se na taj način postiže veća egalnost zagrijavanja. Prema literaturi, utrošak energije je manji čak 60-70 % kod mikrovalnog zagrijavanja u odnosu na klasično [6].



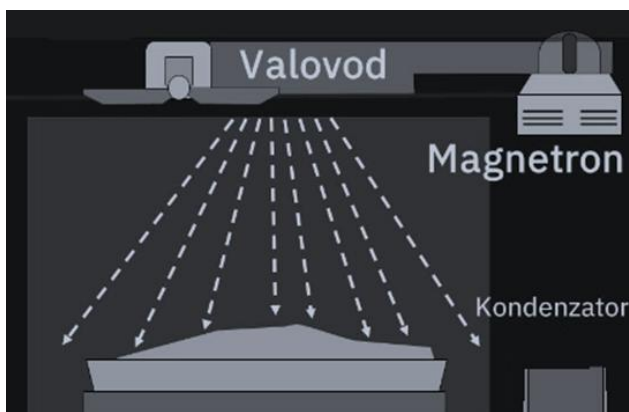
Sl.2 Shematski prikaz klasičnog i mikrovalnog zagrijavanja [5]

Istraživanja kemijskih reakcija potpomognutih MW zračenjem imaju sve veći značaj upravo zbog značajnih energetske uštede koje se ostvaruju. Od 1986. godine do danas objavljeno je nekoliko tisuća znanstvenih radova, a MW zračenje se sve češće primjenjuje. U samim počecima mikrovalne sinteze, problemi koji su se javljali bili su vezani uz eksperimentalni dio u kućanskim mikrovalnim pećnicama, nedostatnu ponovljivost, onemogućavanja kontrole tlaka i temperature i veliki rizik od mogućnosti eksplozije tijekom korištenja organskih tvari. 1970. godine Miller [7] je patentirao Pisset postupak. 1947. godine u SAD-u pojavila se prva mikrovalna pećnica u kućanstvu, P. L. Spencer je 1949. godine patentirao nacrt mikrovalne pećnice. Osim patenta, proučavao je razvoj magnetrona za radare, koji je imao funkciju glavnog izvora mikrovalnog zračenja. Tek od 1980. godine se uočava izuzetno veliki porast primjene mikrovalne pećnice u kućanstvu diljem svijeta. No,

zbog kemijskih reakcija u mikrovalnim pećnicama su se dešavale i eksplozije te se tek nakon 1990. godine pokreću značajnija istraživanja. Počinju se stvarati prototipovi suvremenih sustava gdje je jedna od glavnih osobina bila kontrola tlaka i temperature, što je omogućavalo i primjenu zapaljivih organskih otapala.

Početak 21. stoljeća se počinju primjenjivati multifunkcijski mikrovalni reaktori u kojima se može odvijati veći broj kemijskih reakcija. U današnje vrijeme se mikrovalno zagrijavanje upotrebljava kao zamjena za klasično, no preduvjet je da materijal koji se obrađuje, apsorbira elektromagnetsku energiju koja se zatim pretvara u toplinsku energiju.

Mikrovalni toplinski sustavi sastoje se od tri glavne jedinice: magnetron, valovod i aplikator (sl.3). Magnetron se koristi kao izvor mikrovalne energije u industrijskim i kućanskim tipovima mikrovalnih pećnica. On se sastoji od dva glavna dijela i to anode i katode koje pretvaraju električnu energiju u mikrovalnu [8].

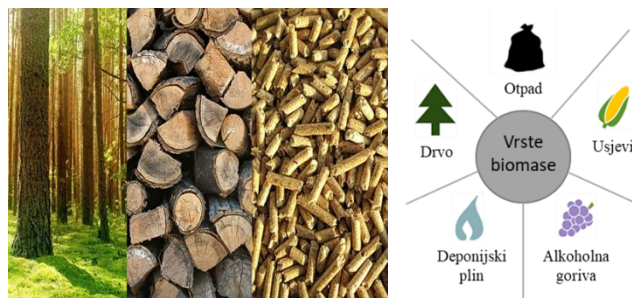


Sl.3 Prikaz mikrovalnog sustava [9]

## 2. Primjena mikrovalne tehnologije u izolaciji tekstilnih vlakana iz biomase

Pod pojmom biomasa podrazumijeva se biorazgradivi dio ostatka, proizvoda i/ili otpadaka iz drvne industrije, poljoprivrede, šumarstva, a tu ubrajamo i biorazgradive dijelove komunalnog i industrijskog otpada koji imaju dozvolu energetske iskoristivosti [10]. Biomasa je prirodnog porijekla te je razgradiva i regenerira se prirodnim procesima. Na sl.4. prikazana je podjela biomase prema porijeklu na:

- Šumsku biomasu: otpaci i ostaci iz drvene prerađivačke industrije
- Nedrvnu biomasu: proizvodi ciljanog uzgoja - brzorastuće alge i trave kao i otpaci i ostaci iz poljoprivrede



Sl.4 Vrste biomase [10]

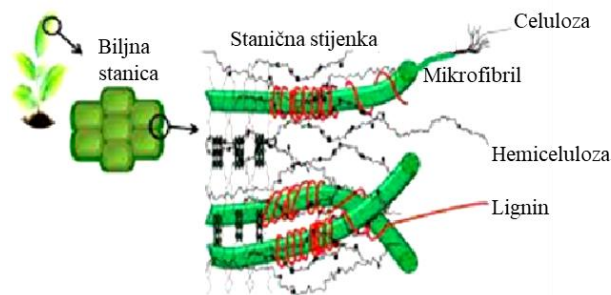
c) Biomasu životinjskog porijekla: životinjski ostaci i otpaci.

Prema definiranom pojavnom obliku, biomasa se dijeli na kapljevita biogoriva, krutu biomasu i bioplín [11].

S obzirom na socijalno-ekonomski osvrt, biomasa se smatra idealnim resursom za dobivanje obnovljivih i ekoloških proizvoda. Dakle, korištenjem biomase kao sirovine se minimizira otpad i onečišćenja te se nudi potencijalno održiva alternativna zamjena za sirovu naftu u proizvodnji kemikalija, tekstilnih vlakana i energije.

### 2.1. Lignocelulozna biomasa

Lignocelulozna biomasa, pod kojom se podrazumijevaju ostaci iz poljoprivrede i šumarstva, usjevi, drvo, je obnovljiva [11], ugljično neutralna i ekološki prihvatljivija sirovina [12]. Lignocelulozna biomasa uključuje poljoprivredne ostatke kao što su kukuruz, pšenična slama i rižina slama, poljoprivredne nusproizvode kao što su ljuske, mekinje, bagasa i energetske kulture kao što su trava, miskantus, mješovite trave i hibridna topola [13]. Lignocelulozni materijal se pretežno sastoji od tri biopolimera: celuloze, hemiceluloze i lignina (sl.5). Tipično, većina lignocelulozne biomase iz poljoprivrede sastoji se od oko 40-50 % celuloze, 20-30 % hemiceluloze i 10-25 % lignina [14].



Sl.5 Shematski prikaz biljne stanice i sastava njezine stijenke [21]

Celuloza je nerazgranati linearni polimer jedinica  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-D-glukopiranoze. Hemiceluloza je razgranati linearni polimer dobiven iz anhidrida raznih šećera. S obzirom da ju karakterizira nizak stupanj polimerizacije pokazuje nisku mehaničku i kemijsku otpornost. Hemicelulozu uvijek prate celuloza i lignin i ne postoji u slobodnom obliku. Molekula lignina je vrlo složeni, umreženi, 3-dimenzionalni polimer formiran od fenolnih jedinica, a osigurava čvrstoću i strukturu biljnih stanica. Lignoceluloznu biomasu karakterizira čvrstoća, reaktivnost i sposobnost biorazgradnje. Sastoji se od 75 % ugljikohidrata i u budućnosti će postati neophodan izvor ugljikohidrata za fermentaciju. Lignocelulozna biomasa je ekološki prihvatljiv izvor energije, a osim za dobivanje biogoriva, električne i toplinske energije [15] često se koristi za dobivanje tekstilnih vlakana [16-20].

### 2.1.1. Izolacija vlakana iz biomase

Istraživanja i proučavanje novih prirodnih „zelenih“ resursa koji posjeduju karakteristiku ekološke prihvatljivosti i održivosti su zastupljeni u sve većoj mjeri. Jedan od takvih primjera je izolacija vlakna iz korijena i stabljike lotosa koje su do sada bile ostavljene u ribnjacima nakon sezone žetve ili cvjetanja lotosa. Takvi i slični bioostaci mogu osigurati obilne resurse celuloze koja se može upotrijebiti u tekstilnoj, građevinskoj, medicinskoj ili papirnoj industriji. U današnje vrijeme lotosova vlakna služe za proizvodnju luksuzne odjeće, jer su takvi odjevni predmeti ekološki prihvatljivi te udobni. Osim za proizvodnju luksuzne odjeće, mogu se koristiti za izradu kompozitnih materijala [22].

Zasad je ručno izdvajanje (izolacija) najzastupljenija metoda za dobivanje lotosovih vlakana [23]. Jedna od najefikasnijih metoda za dobivanje prirodnih vlakana je obrada natrijevim hidroksidom (NaOH), koja se uspješno primjenjuje za predobradu pamuka, lana, konoplje, i ramije te spomenutog vlakna lotosa [24]. S ciljem dobivanja prirodnih vlakana bogatih udjelom celuloze do sada su se upotrebljavali i natrijev hipoklorit (NaClO), natrijev klorit (NaClO<sub>2</sub>), vodikov peroksid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) i benzoat [24]. U upotrebi se zadržao ekološki prihvatljivi reagens, vodikov peroksid čiji razgradni produkti su također ekološki povoljni. Jedan od primjera njegove primjene je izolacija lotosovih vlakana iz stabljike lotosa pomoću vodikova peroksida uz prethodnu obradu natrijevim hidroksidom pod utjecajem mikrovalnog zračenja [22]. Cheng i sur. su utvrdili da se brzina uklanjanja nečistoća i primjesa povećava s 53 % na 73 % kada se vrijeme obrade vodikovim peroksidom djelovanjem mikrovalnog zračenja poveća s 0 na 10 minuta, a doseže 77 % nakon 25 minuta obrade. Brojni su primjeri istraživačkih radova koji koriste biomasu

kao sirovinu za izolaciju vlakana, pri čemu se značajan udio odnosi na primjenu mikrovalne energije u tom postupku. Miskantus (*Miscanthus x giganteus*), sl.6, je poznat kao visokokvalitetna lignocelulozna biomasa koja se upotrebljava za dobivanje biogoriva, ali novija istraživanja pokazuju da je divovski miskantus također i izvrstan izvor celulozних vlakana [25,26].



Sl.6 Divovski miskantus - *Miscanthus x giganteus* [27]

Posljednjih 20 godina se sve veća pozornost posvećuje istraživanjima predobrada i enzimske hidrolize miskantusa. Neobrađeni miskantus ima 42 % hemiceluloze koja sadrži arabinozu, galaktozu, glukozu, ksilozu, manozu. Primjenom mikrovalne energije pri 130 °C uz H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se smanjuje frakcija hemiceluloze u biomasi za 21 %. Povećanjem temperature se dodatno smanjuje udio hemiceluloze. Sumporna kiselina učinkovitije uklanja hemicelulozu u biomasi u odnosu na natrijevu lužinu i vodu. Osim uklanjanja hemiceluloze i uklanjanje lignina je poboljšano djelovanjem mikrovalne energije. U mikrovalnim uvjetima temperatura od 180 °C je ključna za proces razgradnje biomase [28].

Istraživačka skupina sa Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta je do sada uspješno izolirala vlakna iz biomase žitarica pšenice, ječma i kukuruza [29,30], kao i iz različitih samoniklih (brnistra i divovska trska) i energetskih kultura (miskantus i virdžinijski sljez) [31,32].

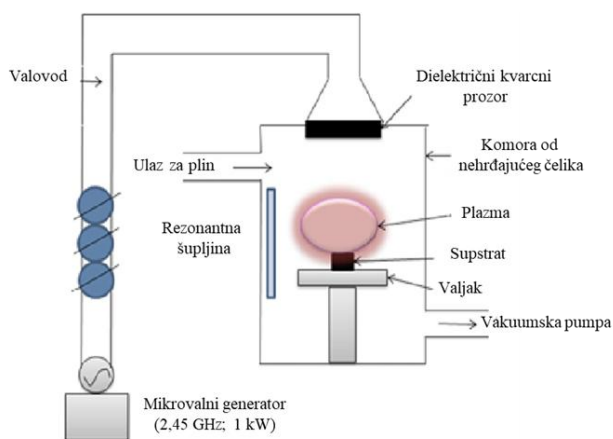
Brnistra kao jedna od najraširenijih mediteranskih samoniklih kultura također je izvrstan izvor vlakana. Tijekom povijesti vlakna su se iz brnistrice izdvajala postupkom namakanja stabljike u moru koji je trajao 20-40 dana [33]. Korištenjem natrijeve lužine niske koncentracije i mikrovalne energije prilikom postupka obrade stabljike brnistrice značajno se skratio proces izolacije vlakana uz zadržavanje istih ili čak poboljšanih svojstava vlakana u usporedbi s postupcima koji su se koristili tijekom povijesti.

Dominić, I. je u svom istraživanju koristila mikrovalnu energiju u postupku izolacije vlakana iz biljke miskantus [34]. Djelovanjem vodikovog peroksida i limunske kiseline uz naknadnu kratku obradu s natrijevom lužinom niske koncentracije izolirala su se celulozna vlakna finoće u rasponu od 10 do 15  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.2. Primjena mikrovalne plazme u obradi biomase

Pojam plazma potječe od grčke riječi „plasso“, što znači samooblikovanje materijala [35]. Definira se kao ionizirani plin nabijenih čestica kao što su fotoni, ioni, elektroni i radikali. Njezina fizikalna i kemijska svojstva događaju se interakcijama nabijenih čestica u kombinaciji s neutralnim plinom u dodiru s površinom. Iz tog razloga ju nazivamo četvrto agregatno stanje, a to stanje je pobuđeno znatno više od drugih ostalih agregatnih stanja. Ona je kvazineutralna, što podrazumijeva da ima isti broj negativno i pozitivno nabijenih iona.

Shematski prikaz atmosfere plazme s mikrovalnim generatorom koji radi na 2,45 GHz, a primjenjuje se za obradu celuloznog materijala prikazan je na sl.7.



Sl.7 Prikaz atmosfere mikrovalne plazme [36]

Primjena plazme kao alata za pretvorbu biomase se široko istražuje. Atmosferska plazma se koristi za obradu različitih vrsta biomasa kako bi se modificirala njihova površinska i strukturna svojstva [37]. Cilj je odvojiti celulozu od kompleksa lignin-hemiceluloza u biomasi primjenom zelenog postupka. Jedan od primjera uspješne primjene MW plazme je postupak predobrade bagase šećerne trske [38]. Nadalje, Zanini i sur. su postigli značajnu modifikaciju površine i razgradnju ligninskog sloja primjenom plazme jetkanja [39]. Primijenili su obradu hladnom arganovom plazmom kako bi se modificirala struktura lignoceluloznih vlakana i utvrđeno je da se kemijska struktura lignina može na ovaj način jako dobro modificirati. Mikrovalno generirana plazma pri atmosferskom tlaku ima

nekoliko prednosti: mikrovalna pražnjenja omogućuju bolji prijenos energije u samu plazmu, učinkovitost je gotovo 100%, a potrošnja energije je niža u usporedbi s konvencionalnim postupcima [40].

### 3. Mikrovalovi u oplemenjivanju tekstila

Upotreba mikrovalova je značajna jer se primjenjuju u mobilnoj tehnologiji, za bežična računala i televiziju sve do pokretanje satelita u svemir. Svoju primjenu nalaze u brojnim industrijama, pa tako i u tekstilnoj. Osim u već spomenutim procesima izolacije tekstilnih vlakana biljnog porijekla [41-43] mikrovalna tehnologija se koristi i u procesu oplemenjivanja tekstila.

Osnovna svrha primjene mikrovalnog zračenja je skraćivanje vremena obrade jer konvencionalni resursi za zagrijavanje koji se koriste u procesima oplemenjivanja tekstila ostvaruju velike gubitke vremena i energije [44,45].

Najprije se proučavala mogućnost upotrebe mikrovalova za procese predobrade, kao npr. za iskuhavanje ili bijeljenje pamučne tkanine [46], kao i za predobradu svilenih pređa, pri čemu mikrovalno zračenje smanjuje vrijeme potrebno za postizanje istog stupnja degumiranja kao kod konvencionalne metode [47].

Jedan od primjera uspješne primjene mikrovalne energije je za bojadisanje i fiksiranje različitih vrsta tekstilnih materijala [44,45]. Mikrovalna energija je primijenjena za bojadisanje celuloznih [48] proteinskih i sintetskih vlakana [49], akrilnih vlakana [50], poliamida 6.6 [51] i poliamida 6 [52] čime se pospešuje proces bojadisanja. U procesu bojadisanja dolazi do ubrzanja difuzije molekula bojila jer polarne molekule bojila i vlakna počinju apsorbirati mikrovalove [51]. Kao rezultat primjene mikrovalne energije u procesu bojadisanja poliesterskih vlakana [53-56], povećava se brzina ekstrakcije boja i skraćuje se vrijeme bojadisanja [57-59]. Primjenom mikrovalne energije u procesima bojadisanja polipropilena, svojstva postojanosti i čvrstoće obojisanog materijala su poboljšana [60-62].

Mikrovalna obrada se može primijeniti i za završno oplemenjivanje, npr. za obradu protiv moljaca [63]. Istraživanja ukazuju da obrada mikrovalnom energijom osim što pospešuje učinkovitost protiv gužvanja, smanjuje i količinu oslobođenog formaldehida za 50 % u odnosu na konvencionalnu termičku obradu [61]. Dodatni primjer primjene u završnom oplemenjivanju je istraživanje utjecaja MW energije na umrežavanje polikarboksilne kiseline i celuloznih reaktivnih skupina te su postignuta poboljšanja efekata obrade protiv gužvanja [64], ali i vodo-odbojnosti, uljeodbojnosti i pirofobnosti uz istovre-

meno smanjenje gubitka čvrstoće na pamučnoj tkanini [65]. U slučaju primjene MW u postupku antibakterijske obrade pamučnih tkanina smanjenje prekidne sile je bilo manje izraženo [66]. Nadalje, MW se pokazala učinkovitijom u procesima modifikacije vlakna na bazi proteina jer osigurava povećanu produktivnost i bolju kvalitetu tekstilnog materijala [67]. Osim ovih istraživanja, mikrovalno zračenje korišteno je u procesima sušenja, fiksiranja [68-72] i sanitizacije [73,74] kako bi se skratilo vrijeme trajanja procesa i dobili učinkovitiji rezultati obrada.

### **3.1. Djelovanje mikrovalova na svojstva pamučnog materijala**

Pamuk je jedan od najrasprostranjenijih prirodnih polimera koji ima vrlo širok raspon primjene od odjeće, kućnog tekstila do industrijskih proizvoda. Konvencionalni sustav umrežavanja koji se koristi za završnu obradu pamučne tkanine uključuje prijenos topline na materijal putem konvekcije, kondukcije ili zračenja. Mikrovalno zračenje je postupak beskontaktnog zagrijavanja izazivanjem vibracija i rotacija trajnih dipola u mikrovalnom polju. Metoda može generirati toplinu jednoliko u cijelom volumenu tekstilnog supstrata [75,76]. Vrlo mali broj radova obuhvaća primjenu MW u svrhu završnog oplemenjivanja pamuka [66,77-79]. Mikrovalno zagrijavanje se pokazalo bržim, ujednačenijim i učinkovitijim od ostalih metoda zagrijavanja. Međutim, mikrovalno zračenje može utjecati na kemijsku strukturu, fizikalna svojstva i površinsku morfološku strukturu pamučnog materijala. Istraživanja učinka mikrovalne energije na fizikalna svojstva i strukturu obrađenih tekstilnih materijala su vrlo rijetka. Pamučna tkanina u mokrom stanju sadrži slobodne molekule vode i vlakna djelomično apsorbiraju mikrovalnu energiju. Energija električnog polja se pretvara u toplinu kroz dielektrične gubitke vode u mokrom stanju pamučne tkanine. Molekule vode osciliraju u prisutnosti visoke frekvencije elektromagnetskog polja [80].

Istraživanja o promjeni strukture i svojstvima pamučnih tkanina u mokrom stanju nakon mikrovalnog zračenja predstavljaju temelj za daljnju primjenu mikrovalne tehnologije u mokrim operacijama oplemenjivanja celuloznih materijala.

## **4. Primjena mikrovalne energije u recikliranju**

Jedan od primjera primjene mikrovalne energije u recikliranju je obrada polietilen-tereftalata (PET-a). U današnje vrijeme se otpad na bazi PET-a pretežito obrađuje mehaničkim postupcima, čiji je cilj uporaba

krutog plastičnog otpada za ponovnu upotrebu. Zbog same heterogenosti i razgradnje plastike, može se proizvesti samo jednopolimerna plastika, kako bi se eliminirao složeniji i kontaminirani otpad. Jedino je upitna sama kvaliteta kada je riječ o mehaničkim recikliranim proizvodima koji bi se na kraju samo mogli odložiti ili spaliti na odlagalištu. U okviru projekta DEMETO [81] razvijena je i patentirana tehnologija primjene kemijskog recikliranja otpada PET-a. Zahvaljujući ovom postupku recikliranja, moguće je produžiti životni vijek PET-a. Za reakciju depolimerizacije u mikrovalnom reaktoru primijenjena je alkalna hidroliza. Ovaj projekt je primjer dobre realizacije ideje, koji je dao smjernice za daljnju provođenje postupka recikliranja primjenom mikrovalne energije.

Prije su biotehnologije dominirale komercijalnim procesima, a danas se više istražuju i proučavaju mikrovalni i termokemijski procesi. Spomenutim činjenicama, lignocelulozna biomasa predstavlja obnovljivi izvor za dobivanje kemikalija s dodanom vrijednošću, koje bi mogle zamijeniti naftne resurse i značajno doprinijeti održivom razvoju. Istraživanja bi se trebala usredotočiti na učinkovito razdvajanje lignocelulozne biomase kao i na sam razvoj ekoloških katalizatora koji pridonose smanjenju nusprodukata reakcije čime se pridonosi selektivnosti proizvoda [82].

Unazad deset godina povećao se interes za proizvodnjom kemikalija na biološkoj osnovi iz organskog otpada i lignocelulozne biomase kao ekološki prihvatljivijih izvora energije. Konvencionalne termokemijske i biokemijske metode uz primjenu mikrovalne tehnologije se koriste za pretvorbu biomase u bio-kemikalije različitim metodama kao što su depolimerizacija, fermentacija ili hidro-termalno ukapljivanje. Pri tome će pokretljivije i polarne komponente biomase učinkovitije apsorbirati mikrovalove, no treba uzeti u obzir da kristalno područje celuloze slabije apsorbira od amorfnog. Voda u biomasi najjače apsorbira mikrovalove, te se s povećanjem temperature smanjuje sadržaj vode, ali s daljnjim odvijanjem reakcije nastaju i produkti, primjerice ugljen koji je dobiven pirolizom. Sama sinergija između mikrovalova i komponenata bio-mase može ubrzati učinkovitost pretvorbe biomase u kemikalije. Zaključno, mikrovalna tehnologija nije samo izvor topline već ima značajnu ulogu u samom mehanizmu reakcije. Mikrovalno zračenje omogućava učinkovitije unutarnje zagrijavanje na način da se energija direktno prenosi na molekule s ciljem povećanja temperature pomoću rotacije ionske kondukcije i dipola. Značajno se skraćuje vrijeme obrade, smanjuju troškovi i samim time se poboljšava kvaliteta dobivenog proizvoda s dodanom vrijednošću [83].

## 5. Zaključak

U današnje vrijeme se mikrovalno zagrijavanje sve češće upotrebljava kao zamjena za klasične postupke, no preduvjet je da materijal koji se obrađuje može apsorbirati elektromagnetsku energiju koju zatim pretvara u toplinsku energiju. Primjena mikrovalne energije daje učinkovitije rezultate od klasičnog zagrijavanja kondukcijom ili konvekcijom. Osnovna prednost primjene mikrovalnog zračenja je skraćivanje vremena obrade jer konvencionalni resursi za zagrijavanje koji se koriste u procesima oplemenjivanja tekstila ili predobrade biomase ostvaruju velike gubitke vremena i energije. MW energija koja se koristi u procesu bojadisanja različitih vlakana počevši od celuloznih, proteinskih, ali i sintetskih (akrilna vlakna, poliamida 6.6 i poliamida 6) znatno je ubrzala sam proces bojadisanja.

Istraživanja ukazuju da mikrovalna energija pospješuje učinkovitost završnih obrada, kao što je to npr. obrada protiv gužvanja, pri čemu je dodatna prednost smanjenje količina oslobođenog formaldehida za 50 % u odnosu na konvencionalnu termičku obradu.

Osim za obradu tekstilnih materijala, mikrovalna tehnologija se sve više koristi i za predobradu biomase. Uporaba biomase ima veliki potencijal jer je ona najrasprostranjeniji oblik obnovljivih izvora energije. Proveden je veliki broj istraživanja primjene raznovrsnih tehnologija za učinkovitu pretvorbu lignocelulozne biomase u biogoriva (npr. etanol) i druge bioproizvode (npr. celulozna vlakna). Sagleđavajući trenutna istraživanja, očekuje se daljnje povećanje primjene mikrovalne energije u različitim fazama obrade biomase ili tekstilnih materijala.

Usprikoš nekim ograničenjima, kao što je to sporo uvođenje novih tehnologija i nedostatak stručnog osoblja koje može brzo implementirati napredne tehnologije u praksu, uporaba mikrovalne energije u tekstilnom sektoru na globalnoj razini je u rastućoj putanji. Ukoliko će razne institucije, organizacije i udruge podizati svijest svojih članova i objasniti investitorima prednosti mikrovalne tehnologije može se očekivati povećanje primjene ove zelene energije. Time se direktno pridonosi ispunjavanju ciljeva zadanih Zelenim europskim planom, ali će se istovremeno pridonijeti i povećanju konkurentnosti onih industrija koje koriste napredne postupke i materijale, a pri tome smanjuje otpad na najmanju moguću mjeru.

*Dio istraživanja prikazan u radu potječe iz seminarskog rada priređenog za kolegij „Metodika znanstvenog rada“ na doktorskom studiju „Tekstilna*

*znanosti i tehnologija“ Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta..*

## Literatura:

- [1] Bartolić, J. Inženjerski priručnik: Mikrovalna elektronika. Školska knjiga, Zagreb, 1999; pp. 627-717.
- [2] Tierney, J. P.; Lidstrom P. Microwave Assisted Organic Synthesis. Blackwell Publishing, Garsington Road, UK, 2005.
- [3] Zrinski, I.; Maksić, M. Microwave Assisted Organic Synthesis, *Kemija u industriji* **2005**, 54, 11, 469-476.
- [4] Ahluwanlia, V.K.; Aggarwal, R. Organic Synthesis: Special Techniques. Alpha Science, England 2001.
- [5] Ferreira, S.H.; Rovisco, A.; dos Santos, A.; Águas, H.; Igreja, R.; Barquinha, P.; Fortunato, E.; Martins, R. Porous ZnO nanostructures synthesized by microwave hydrothermal method for energy harvesting applications. In *Nanopored*, IntechOpen, 2021.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.97060>
- [6] Metaxas, A.C.; Meredith, R.J. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus Ltd., London 1983, 111-150.
- [7] Bobbin Microwaves meet wrinkle-free marketplace, NatNews, October, 1995.
- [8] Regier, M.; Schubert, H. Introducing microwave processing of food: principles and technologies. In *The microwave processing of foods*, Woodhead Publishing, 2005; pp. 3-21.  
<https://doi.org/10.1533/9781845690212.1.3>
- [9] ...Elektromagnetski val. Dostupno na: <https://edutorij-arhiva.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/elektromagnetski-val.html>, Pristupljeno: 14/08/2024.
- [10] Blažanović, A. *Pogon elektrane na biomasu Uni Viridas d.o.o. Babina Greda*. Undergraduate thesis, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology, Osijek, Croatia, 2016.
- [11] Sun, D.; Wang, B.; Wang, H.M.; Li, M.F.; Shi, Q.; Zheng, L.; Wng, F. F.; Liu, S.J.; Sun, R.C. Structural transformations of Hybrid Pennisetum lignin: effect of microwave-assisted hydrothermal pretreatment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2018**, 7, 3073-3082.  
<https://doi.org/10.3390/biomass1010003>

- [12] Zhang, Z.; Zhao, Z. K. Microwave-assisted conversion of lignocellulosic biomass into furans in ionic liquid. *Bioresource technology* **2010**, 101, 1111-1114.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.010>
- [13] Mosier, N.; Wyman, C.; Dale, B.; Elander, R.; Lee, Y.Y.; Holtzapple, M.; Ladisch, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology* **2005**, 96, 6, 673-686.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
- [14] Kumar, P.; Barret, D.M.; Delwiche, M.J.; Stroeve, P. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & engineering chemistry research* **2009**, 48, 8, 3713-3729.
- [15] Zhu, Z.; Macquarrie, D. J.; Simister, R.; Gomez, L.D.; McQueen-Mason, S.J. Microwave assisted chemical pretreatment of *Miscanthus* under different temperature regimes. *Sustainable Chemical Processes* **2015**, 3(1), 1-13.  
<https://doi.org/10.1186/s40508-015-0041-6>
- [16] Bahndral, A.; Shams, R.; Dash, K.K.; Ali, N.A.; Shaikh, A.M.; Kovács, B. Microwave assisted extraction of cellulose from lemon grass: Effect on techno-functional and microstructural properties. *Journal of Agriculture and Food Research* **2024**, 16, 101170.  
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101170>
- [17] Kovačević, Z. *Development of Advanced Polylactide Nanobiocomposite Reinforced with Spartium junceum L. Fibres*. Ph.D. Thesis, University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia, 2019.
- [18] Van, N. T. T.; Gaspillo, P. A.; Thanh, H. G. T.; Nhi, N. H. T.; Long, H. N.; Tri, N.; Van, N. T. T.; Nguyen, T. T.; Ha, H. K. P. Cellulose from the banana stem: optimization of extraction by response surface methodology (RSM) and characterization. *Heliyon* **2022**, 8, 12.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11845>
- [19] Zhu, L.; Liang, K.; Wang, M.; Xing, T.; Chen, C.; Wang, Q. Microwave-assisted Formic Acid/Cold Caustic Extraction for Separation of Cellulose and Hemicellulose from Biomass. *BioResources* **2023**, 18, 4.  
<https://doi.org/10.15376/biores.18.4.6896-6912>
- [20] Ndruru, S.T.C.L.; Wahyuningrum, D.; Bundjali, B.; Arcana, I.M. Green simple microwave-assisted extraction (MAE) of cellulose from *Theobroma cacao* L. (TCL) husk. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 541, 1, p. 012017.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/541/1/012017>
- [21] El-Sayed, I. *Production of lignocellulose based biofuels*. Undergraduate thesis, University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology, Zagreb, Croatia, 2016.
- [22] Cheng, C.; Guo, R.; Lan, J.; Jiang, S. Extraction of lotus fibres from lotus stems under microwave irradiation. *Royal Society open science* **2017**, 4, 9, 170747. <https://doi.org/10.1098/rsos.170747>
- [23] Liu, D.; Han, G.; Huang, J.; Zhang, Y. Composition and structure study of natural *Nelumbo nucifera* fiber. *Carbohydrate polymers* **2009**, 75, 1, 39-43.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.06.003>
- [24] Baig, G.A.; Carr, C.M. Surface and structural damage to PLA fibres during textile pretreatments. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* **2016**, 24(2), 116, 52-58.  
<https://doi.org/10.5604/12303666.1191427>
- [25] Tsalagkas, D.; Borcs, Z. Assessment of the papermaking potential of processed *Miscanthus x giganteus* stalks using alkaline pre-treatment and hydrodynamic cavitation for delignification. *Ultrasonics Sonochemistry* **2021**, 72, 105462.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2021.105462>
- [26] Dominić, I. *Ecological treatment of the energy crop Miscanthus x giganteus with the aim of producing a green composite*. Master's thesis, University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia, 2024.
- [27] Geršić, A. *Energy characteristics of Miscanthus x giganteus grass depending on fertilization treatment and harvest date*. Master's thesis, University of Zagreb Faculty of Agriculture, Zagreb, Croatia, 2016.
- [28] Fan, J.; De Bruyn, M.; Budarin, V.L.; Gronnow, M.J.; Shuttleworth, P.S.; Breeden, S.; Macquarrie, D.J.; Clark, J.H. Direct microwave-assisted hydrothermal depolymerization of cellulose. *Journal of the American Chemical Society* **2013**, 135, 32, 11728-11731.  
<https://doi.org/10.1021/ja4056273>
- [29] Kovačević, Z.; Strgačić, S.; Bischof, S. Barley Straw Fiber Extraction in the Context of Circular Economy. *Fibers* **2023**, 11, 108, 1-23.  
<https://doi.org/10.3390/fib11120108>
- [30] Kovačević, Z.; Bischof, S.; Bilandžija, N.; Krička, T. Conversion of Waste Agricultural Biomass from Straw into Useful Bioproducts—Wheat Fibers and Biofuels. *Sustainability* **2024**, 16, 11, 4739.  
<https://doi.org/10.3390/su16114739>
- [31] Bischof, S. *Održivi razvoj biokompozita i biogoriva iz obnovljivih izvora energije*. University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia, 2023.

- [32] Dominić, I.; Kovačević, Z.; Bischof, S. Pretreatments of Energy Culture *Miscanthus X Giganteus* for Fiber Isolation, Book of Proceedings (11<sup>th</sup> International Textile, Clothing & Design Conference - Magic World of Textiles) / Hursa Šajatović, A.; Špelić, I. (ed.). Zagreb, University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Dubrovnik, 6-9 October 2024; pp.113-118.
- [33] Bischof, S.; Kovačević, Z. *From Weed to Fabric*. University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia, 2013.
- [34] Dominić, I. *SEM analysis of textile raw materials obtained by pretreatment of the plant *Miscanthus x giganteus**. Undergraduate thesis, University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia, 2021.
- [35] Hamerli, P. *Plasma aminofunctionalisation of polymeric membrane surfaces for tissue engineering applications*. Dissertation, University of Veszprem, Hungary, 2004.
- [36] [https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-the-Microwave-plasma-reactor\\_fig1\\_289102513](https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-the-Microwave-plasma-reactor_fig1_289102513), Pristupljeno: 02/05/2024.
- [37] Bundaleska, N.; Tatarova, E.; Dias, F.M.; Da Silva, M.L.; Ferreira, C.M.; Amorim, J. Air-water 'tornado'-type microwave plasmas applied for sugarcane biomass treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics* **2013**, 47, 5, 055201. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/5/055201>
- [38] Puligundla, P.; Oh, S.E.; Mok, C. Microwave-assisted pretreatment technologies for the conversion of lignocellulosic biomass to sugars and ethanol: a review. *Carbon letters* **2016**, 17, 1, 1-10. <https://doi.org/10.5714/CL.2016.17.1.001>
- [39] Zanini, S.; Riccardi, C.; Canevali, C.; Orlandi, M.; Zoia, L.; Tolppa, E.L. Modifications of lignocellulosic fibers by Ar plasma treatments in comparison with biological treatments. *Surface and Coatings Technology* **2005**, 200, 1-4, 556-560. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.01.090>
- [40] Moisan, M.; Zakrzewski, Z. Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves. *Journal of Physics D: Applied Physics* **1991**, 24, 7, 1025. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/7/001>
- [41] Ahmed, N.S.; El-Shishtawy, R.M. The use of new technologies in coloration of textile fibers. *Journal of Materials Science* **2010**, 45, 1143-1153. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-4111-6>
- [42] Berns, R.S.; Needles, H.L. Microwave versus Conductive Heating Their Effect on the Solvent-assisted Dyeing of Polyester Fibre with Anthraquinonoid Disperse Dyes. *Journal of the Society of Dyers and Colourists* **1979**, 95, 207-211. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1979.tb03475.x>
- [43] Tarakçioğlu, I.; Anış, P. Microwave processes for the combined desizing, scouring, and bleaching of grey cotton fabrics. *Journal of the Textile Institute* **1996**, 87, 3, 602-608. <https://doi.org/10.1080/00405009608631364>
- [44] Haggag, K.; El-Sayed, H.; Allam, O.G. Degumming of silk using microwave-assisted treatments. *Journal of Natural Fibers* **2007**, 4, 1-22. [https://doi.org/10.1300/J395v04n03\\_01](https://doi.org/10.1300/J395v04n03_01)
- [45] Montazer, M.; Alibakhshi, F. Microwave assisted dyeing of cellulose with direct dyes, 9<sup>th</sup> Asian Textile Conference, Taiwan 2007.
- [46] Delaney, M. J.; Seltzer, I. Microwave Heating for Fixation of Pad-dyeing's on Wool. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, **1972**, 88, 55-59.
- [47] Davoudzadeh Gholami, M.; Nourmohammadian, F. An investigation of the dyeability of acrylic fiber via microwave Irradiation. In *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 2008; pp. 57-63. <https://doi.org/10.30509/pccc.2008.75708>
- [48] Yoshimura, Y.; Ohe, T.; Ueda, M.; Kurokawa, T.; Mori, F. Effect of Microwave on Diffusion Behavior of Dye Molecules. *Sen'i gakkaiishi* **2009**, 65, 241-245.
- [49] Ohe, T.; Yoshimura, Y. Microwave Irradiation onto Nylon 6 Fibers in Organic Solvent. *Sen'i Gakkaiishi* **2009**, 65, 8-14.
- [50] Xu, W.; Yang, C. Hydrolysis and dyeing of polyester fabric using microwave irradiation. *Coloration Technology* **2002**, 118, 211-214. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2002.tb00101.x>
- [51] Haggag, K.; Hanna, H.L.; Youssef, B.M.; El-Shimy, N.S. Dyeing polyester with microwave heating using disperse dyestuffs. *American Dyestuff Reporter* **1995**, 84, 22-37. <https://doi.org/10.3390/molecules180911033>
- [52] Büyükkakıncı, B. Y. Usage of microwave energy in Turkish textile production sector. *Energy Procedia* **2012**, 14, 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.953>
- [53] Haghi A. K. The Effect of MW Radiation on Dyeing of Polyester Fibers: Studying the Effect of Pre-Treatment of Fibers in Organic Solvent. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology* **2004**, 71, 151-156.

- [54] Chiao-Cheng, J.; Reagan, B. M. Microwave Dyeing of Polyester with Disperse Dyes. *Textile Chemist and Colorist* **1983**, 15, 12-19. <https://doi.org/10.3390/molecules180911033>
- [55] Kim, S. S. The Level Dyeing Technology of Polyester Fabric by Microwave. In *International Symposium in Wakayama on Dyeing and Finishing of Textiles* (Proceedings 1998), 1998; pp. 246-247.
- [56] Kim, S.S.; Leem, S.G.; Ghim, H.D.; Kim, J.M.; Lyoo, W.S. Microwave Heat Dyeing of Polyester Fabric. *Fibers and Polymers* **2003**, 4, 204-209. <https://doi.org/10.1007/BF02908280>
- [57] Sun, H.; Lin, L.; Jiang, X.; Bai, X. The improvement of dyeability of flax fibre by microwave treatment. *Pigment & Resin Technology* **2005**, 34, 190-196. <https://doi.org/10.1108/03699420510609079>
- [58] Katović, D.; Bischof Vukusic, S.; Flinčec Grgac, S. Application of microwaves in textile finishing processes. *Tekstil* **2005**, 54(7), 313-318. <https://www.tekstil.hist.hr/index.php/tekstil/article/view/3086>
- [59] Büyükakinci, Y.; Öner, E.; Sökmen, N. Microwave assisted exhaust dyeing of polypropylene. In *4<sup>th</sup> Central European Conference*, Liberec, Czech Republic 2005; pp. 173-174.
- [60] Reagan, B.M. Eradication of insects from wool textiles. *Journal of the American Institute for Conservation* **1982**, 21(2), 1-34.
- [61] Bischof Vukušić, S.; Katović, D.; Schramm, C. Influence of Microwaves on Nonformaldehyde DP Finished Dyed Cotton Fabrics. *Textile Research Journal* **2003**, 73, 733-738. <https://doi.org/10.1177/004051750307300812>
- [62] Purwar, R.; Joshi, M.. Effect of Microwave Curing on Easy Care Finishing of Cotton Using Glyoxal/Glycol. *AATCC Review* **2005**, 5, 11.
- [63] Fouda Moustafa, M. G.; El Shafei, A.; Sharaf, S.; Hebeish, A. Microwave curing for producing cotton fabrics with easy care and antibacterial properties. *Carbohydrate Polymers* **2009**, 77, 651-655. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.02.017>
- [64] Tsukada, M.; Islam, S.; Arai, T.; Boschi, A.; Freddi, G. Microwave Irradiation Technique to Enhance Protein Fibre Properties. *AUTEX Research Journal* **2005**, 5, 40-47. <https://doi.org/10.1515/aut-2005-050104>
- [65] Hatcher, J.D.; Higgins, K.B.; Lyons, D.W. Analytical solutions to the drying of textile materials with microwave heating. *Textile research journal* **1975**, 45(3), 223-229. <https://doi.org/10.1177/004051757504500306>
- [66] Bhat, N.V.; Kale, M.J.; Ajit, V.G. Microwave radiations for heat-setting of polyester fibers. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* **2009**, 4(4), 1-6. <https://doi.org/10.1177/155892500900400402>
- [67] Neral, B.; Šostar Turk, S.; Scheider, R. Efikasnost mikrovalnog fiksiranja reaktivnog bojila CI Reactive Red 24 u digitalnom tisku pamučnih tkanina. *Tekstil* **2007**, 56(6), 358-367. <https://hrcak.srce.hr/22849>
- [68] Özerdem, A.; Tarakçioğlu, I.; Özgüney, A. The use of microwave energy for the fixating of reactive printed cotton fabrics. *Textile and Apparel* **2008**, 18, 289-296.
- [69] Evans, D.G.; Skelly, J.K. Application of microwave heating in dye fixation. *Journal of the Society of Dyers and Colourists* **1972**, 88, 429-433. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1972.tb03051.x>
- [70] Reagan, B.M.; Rolow, A. M.; Urban, J. E. Microwave sanitization of polyester and cotton. *Textile Research Journal* **1982**, 52(3), 186-192. <https://doi.org/10.1177/004051758205200305>
- [71] Zieliński, M.; Ciesielski, S.; Cydzik-Kwiatkowska, A.; Turek, J.; Debowski, M. Influence of microwave radiation on bacterial community structure in biofilm. *Process Biochemistry* **2007**, 42, 1250-1253. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.05.008>
- [72] Ragauskas, A.J.; Williams, C.K.; Davison, B.H.; Britovsek, G.; Cairney, J.; Eckert, C.A.; Frederick, W.J.Jr; Hallet, J.P.; Leak, D.J.; Liotta, C.L.; Mielenz, J.R.; Murphy, R.; Templer, R.; Tschaplinski, T. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* **2006**, 311, 5760, 484-489. <https://doi.org/10.1126/science.1114736>
- [73] Ragauskas, A.J.; Nagy, M.; Kim, D.H.; Eckert, C.A.; Hallet, J.P.; Liotta, C.L. From wood to fuels: integrating biofuels and pulp production. *Industrial biotechnology* **2006**, 2(1), 55-65. <https://doi.org/10.1089/ind.2006.2.55>
- [74] Park, J. H.; Choi, H.M.; Oh, K.W. Simultaneous crosslinking and cationization of cotton cellulose by using dialdehyde and choline chloride: comparison between the pad-dry-cure and microwave irradiation process. *Cellulose* **2014**, 21, 4, 3107-3119. <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0326-z>
- [75] Budimir, A.; Bischof Vukušić, S.; Grgac Flinčec, S. Study of antimicrobial properties of cotton medical textiles treated with citric acid and dried/cured by microwaves. *Cellulose* **2012**, 19, 1, 289-296. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9614-z>

- [76] Zhao, X.; He, J.; Zhan, Y. Synthesis and characterization of chitosan biguanidine hydrochloride under microwave irradiation. *Polymer journal* **2009**, 41(12), 1030-1035.  
<https://doi.org/10.1295/polymj.PJ2009087>
- [77] Jacob, J.; Chia, L. H. L.; Boey, F. Y. C. Thermal and non-thermal interaction of microwave radiation with materials. *Journal of Materials Science* **1995**, 30, 21, 5321-5327.  
<https://doi.org/10.1007/BF00351541>
- [78] Li, J.; Tao, T.; Luo, C.; Lui, X.; Zhu, X.; Huang, L.; Ouyang, X.; Ni, Y.; Chen, L. Water molecule “spinning cutter” controllably improving the performance of cellulosic fibers. *Cellulose* **2020**, 27, 7297–7306.  
<https://doi.org/10.3390/fib9070040>
- [79] Nair, G.R. Role of Microwave Pretreatment in the Extraction of High Quality Natural Fibers. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology* **2017**, 2(2), 333-335.  
<https://doi.org/10.15406/jteft.2017.02.00053>
- [80] Hartati, I.; Kholish, I.; Suwardiyono, S.; Kurniasari, L.; Riwayati, I. Eco Friendly-Microwave Assisted Extraction of Cellulose from Sugarcane Bagasse. In *Proceeding of the 2nd International Seminar and Conference on Global Issues (ISCoGI)*, Wahid Hasyim University, Semarang, Indonesia 25-26 November 2016, Paper No. A.8.
- [81] EC: Using the power of microwaves to recycle plastics. Dostupno na: <https://cordis.europa.eu/article/id/411547-using-the-power-of-microwaves-to-recycle-plastics>, pristupljeno: 18/09/2024.
- [82] Pribanić, I. *Application of waste in chemical production*. Undergraduate thesis, University of Zagreb Faculty of Chemical Engineering and Technology, Zagreb, Croatia, September 2024
- [83] Yu, I.K.; Chen, H.; Abeln, F.; Auta, H.; Fan, J.; Budarin, V.L.; Clark, J.H.; Parsons, S.; Chuck, C.J.; Zhang, S.; Luo, G.; Tsang, D.C. Chemicals from lignocellulosic biomass: a critical comparison between biochemical, microwave and thermochemical conversion methods. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **2021**, 51(14), 1479-1532.  
<https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1753632>