

Alenka  
OJSTRŠEK

Darinka  
FAKIN

Selestina  
GORGIEVA

# Ekologija plemenitilnih procesov



Univerzitetna založba  
Univerze v Mariboru





Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

# Ekologija plemenitilnih procesov

Avtorji

**Alenka Ojstršek**

**Darinka Fakin**

**Selestina Gorgieva**

December 2024

<b>Naslov</b> <i>Title</i>	<b>Ekologija plemenitilnih procesov</b> <i>Ecology of Finishing Processes</i>
<b>Avtorji</b> <i>Authors</i>	Alenka Ojstršek (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Darinka Fakin (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Selestina Gorgieva (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
<b>Recenzija</b> <i>Review</i>	Simona Strnad (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Julija Volmajer Valh (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
<b>Jezikovni pregled</b> <i>Language editing</i>	Nina Ambrož Šušnik (AMIDAS d.o.o.)
<b>Tehnični urednik</b> <i>Technical editor</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
	Marina Bajić (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
<b>Oblikovanje ovitka</b> <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
<b>Grafika na ovitku</b> <i>Cover graphic</i>	Birds eye view of colorful covers over alley at bazaar, avtor: Azim Khan Ronnie, pixels.com, 2024
<b>Grafične priloge</b> <i>Graphic material</i>	Viri so lastni, razen če ni navedeno drugače. Ojstršek, Fakin, Gorgieva (avtorji), 2024
<b>Založnik</b> <i>Published by</i>	<b>Univerza v Mariboru</b> <b>Univerzitetna založba</b> Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://press.um.si">https://press.um.si</a> , <a href="mailto:zalozba@um.si">zalozba@um.si</a>
<b>Izdajatelj</b> <i>Issued by</i>	<b>Univerza v Mariboru</b> <b>Fakulteta za strojništvo</b> Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://fs.um.si">https://fs.um.si</a> , <a href="mailto:fs@um.si">fs@um.si</a>
<b>Izdaja</b> <i>Edition</i>	Prva izdaja
<b>Vrsta publikacije</b> <i>Publication type</i>	E-knjiga
<b>Dostopno na</b> <i>Available at</i>	<a href="http://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/8fs24">http://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/8fs24</a>
<b>Izdano</b> <i>Published at</i>	Maribor, december 2024



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba  
/ University of Maribor, University Press

**Besedilo / Text** © Ojstršek, Fakin, Gorgieva (avtorji), 2024

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.*

Uporabnikom je dovoljeno tako nekomercialno kot tudi komercialno reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javna priobčitev in predelava avtorskega dela, pod pogojem, da navedejo avtorja izvirnega dela.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

677.04/.08:504.5(075.8)

OJSTRŠEK, Alenka

Ekologija plemenitilnih procesov [Elektronski vir] / Alenka Ojstršek,  
Darinka Fakin, Selestina Gorgieva. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor :  
Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2024

Način dostopa (URL): <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/8fs24>

ISBN 978-961-286-936-6 (PDF)

doi: 10.18690/um.fs.8.2024

COBISS.SI-ID 219131651

**ISBN** 978-961-286-936-6 (pdf)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/um.fs.8.2024>

**Cena** Brezplačni izvod  
*Price*

**Odgovorna oseba založnika** Prof. dr. Zdravko Kačič,  
*For publisher* rektor Univerze v Mariboru

**Citiranje** Ojstršek, A., Fakin, D., Gorgieva, S. (2024). *Ekologija*  
*Attribution* *plemenitilnih procesov*. Univerza v Mariboru, Univerzitetna  
založba. doi: 10.18690/um.fs.8.2024



# Kazalo

<b>Predgovor.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Uvod.....</b>	<b>3</b>
1.1 Namen in vrste plemenitilnih postopkov .....	3
1.2 Vpliv plemenitilnih postopkov na okolje.....	4
1.3 Varnostni list in uredba REACH .....	8
1.4 Trajnostno plemenitenje tekstilij .....	10
<b>2 Ekološka problematika odpadnih vod pri plemenitenju.....</b>	<b>13</b>
2.1 Predobdelava.....	13
2.1.1 Razškrbljenje.....	14
2.1.2 Izkuhavanje in merceriziranje bombaža ter alkalna obdelava poliestra.....	15
2.1.3 Beljenje .....	15
2.1.4 Trajnostna predobdelava tekstilij.....	16
2.2 Barvanje.....	17
2.2.1 Barvila .....	18
2.2.2 Soli .....	19
2.2.3 Alkalije .....	19
2.2.4 Organske kisline .....	20
2.2.5 Tekstilna pomožna sredstva .....	20
2.2.6 Ioni težkih kovin .....	21
2.2.7 Trajnostno barvanje tekstilij .....	23
2.3 Tiskanje .....	24
2.3.1 Tiskarska gostila.....	24
2.3.2 Tiskarska tekstilna pomožna sredstva .....	25
2.3.3 Tiskarska barvila in pigmenti.....	25
2.3.4 Vpliv tiskanja na okolje .....	25
2.4 Končna obdelava.....	26
2.4.1 Vpliv končne obdelave na okolje .....	27
2.4.2 Trajnostna končna obdelava tekstilij.....	30
2.5 Normativi in monitoring odpadnih vod.....	31
<b>3 Onesnaženje zraka pri plemenitenju .....</b>	<b>37</b>
3.1 Emisije hlapnih organskih spojin .....	38
3.2 Emisije toplogrednih plinov .....	39
<b>4 Alternativni mediji pri plemenitenju .....</b>	<b>43</b>
4.1 Superkritični CO <sub>2</sub> .....	44

4.2	Zrak .....	46
4.3	Pena .....	48
4.3.1	Kontinuiran postopek plemenitenja s peno .....	48
4.3.2	Diskontinuiran postopek plemenitenja s peno .....	50
4.4	Dušikova atmosfera .....	51
<b>5</b>	<b>Alternativna plemenitilna sredstva, barvila in kemikalije .....</b>	<b>53</b>
5.1	Kationska sredstva za predobdelavo celuloznih vlaken .....	53
5.2	Encimi .....	55
5.3	Biomateriali .....	59
5.3.1	Biopolimeri .....	59
5.3.2	Bioaktivne spojine rastlinskega izvora .....	61
5.4	Sredstva za zamreženje .....	62
5.5	Naravna barvila .....	63
5.5.1	Naravna barvila iz odpadnih produktov .....	65
5.5.2	Bakterijska barvila .....	66
<b>6</b>	<b>Alternativni postopki plemenitenja .....</b>	<b>69</b>
6.1	Souporaba ultrazvoka .....	70
6.2	Obdelava z ozonom .....	72
6.3	Obdelava s plazmo .....	75
6.4	Souporaba ultravijoličnega sevanja .....	79
6.5	Obdelava z laserjem .....	81
6.6	Obsevanje s snopom elektronov .....	83
6.7	Nanos s pršenjem .....	85
6.8	(Elektro)kemični postopki nanosa kovin .....	86
6.8.1	Brezelektrično oplasčanje .....	87
6.8.2	Elektrokemično oplasčanje .....	89
6.9	Naparevanje .....	91
6.9.1	Kemično naparevanje .....	91
6.9.2	Fizikalno naparevanje .....	92
6.10	Digitalni tisk .....	94
<b>7</b>	<b>Alternativne tehnike sušenja in ogrevanja .....</b>	<b>97</b>
7.1	IR sušenje .....	97
7.2	Ogrevanje in sušenje z mikrovalovi .....	98
7.3	RF sušenje .....	99
<b>8</b>	<b>Tekstilna industrija 4.0 .....</b>	<b>101</b>
8.1	Načrtovanje virov podjetja .....	103
8.2	Simulacija procesov in sledenje materialu .....	103
8.3	Spremljanje delovanja sistemov v realnem času .....	103
	<b>Literatura .....</b>	<b>107</b>



## Predgovor

Skripta z naslovom »Ekologija plemenitilnih procesov« je namenjena študentom visokošolskega študijskega programa Tehnologije tekstilnega oblikovanja.

Skripta je pripravljena tako, da študente v prvih poglavjih seznanijo z osnovami tehnoloških procesov plemenitjenja tekstilij in njihovo ekološko problematiko. Poseben problem v tekstilni industriji so odpadne tehnološke vode, saj so močno obremenjene, vsebujejo različne kemikalije in tekstilna pomožna sredstva, različne tipe organskih barvil, imajo ekstremne vrednosti pH in visoke vrednosti kemijske potrebe po kisiku (KPK) in biokemijske potrebe po kisiku (BPK), vsebujejo fosfate, sulfate in druge soli, tenzide, maščobe in olja ter različne tipe težkih kovin. Poleg navedenega številni plemenitilni postopki onesnažujejo zrak z izpusti oz. emisijami trdnih delcev (prašni delci in vlakna), hlapnih organskih spojin (hlapi olj, kislin, topil) in toplogrednih plinov (ogljikov dioksid, ogljikov monoksid, žveplove in dušikove spojine).

V nadaljevanju so v gradivu predstavljeni alternativni mediji, kot so superkritični CO<sub>2</sub>, zrak, pena in dušikova atmosfera, ki za enak učinek plemenitjenja porabijo manj vode in energije, ter alternativna plemenitilna sredstva, barvila in kemikalije, ki so manj škodljivi za zdravje ljudi in okolje, kot so kationska sredstva za predobdelavo celuloznih vlaken, encimi, biopolimeri in bioaktivne spojine, naravna zamreževalna sredstva in naravna barvila. Poseben poudarek je na naprednih postopkih

plemenitenja, ki so ekonomsko in okoljsko sprejemljivejša alternativa tradicionalnim mokrim kemijskim obdelavam tekstilij. Avtomatizacija postopkov dodatno vpliva na nižjo porabo vode in energije, manjšo količino odpadkov, odpadnih vod in emisij toplogrednih plinov ter na večjo produktivnost, varnost pri delu in optimalno izrabo delovnega časa.

Pridobljeno znanje bo študentom omogočilo, da bodo poleg temeljnih znanj poznali tudi napredne pristope in tehnologije pri razvoju in plemenitenju sodobnih inženirskih materialov.

# 1 Uvod

## 1.1 Namen in vrste plemenitilnih postopkov

Plemenitenje je zadnji korak pri izdelavi tekstilij in obsega vrsto postopkov, pri katerih tekstilni material (vlakna, preje, tkanine, pletenine, netkane tekstilije, redko tudi oblačila) dobi končni videz in lastnosti.

Namen plemenitenja je:

- izboljšanje lastnosti za potrebe samega postopka plemenitenja (večja omočljivost in navzemanje barvil in tiskarskih gošč) in konfekcioniranja (večja stabilnost dimenzij in oblik, nanašanje lepljivih nanosov in izboljšanje šivalnih lastnosti),
- sprememba videza (večja belina, obarvanost, potisk, lesk itd.),
- sprememba otipa (gladkost, hrapavost, mehkost itd.),
- izboljšanje uporabnih in posebnih lastnosti (manjša razteznost, večja elastičnost in trdnost, odpornost proti drgnjenju, znoju, vodi, olji, ognju, vlagi, UV svetlobi, kemikalijam, prepustnost/neprepustnost zraka, električna prevodnost itd.) in
- izboljšanje negovalnih lastnosti končnih izdelkov (enostavno pranje in likanje) [1].

Postopke plemenitenja tekstilij lahko delimo glede na:

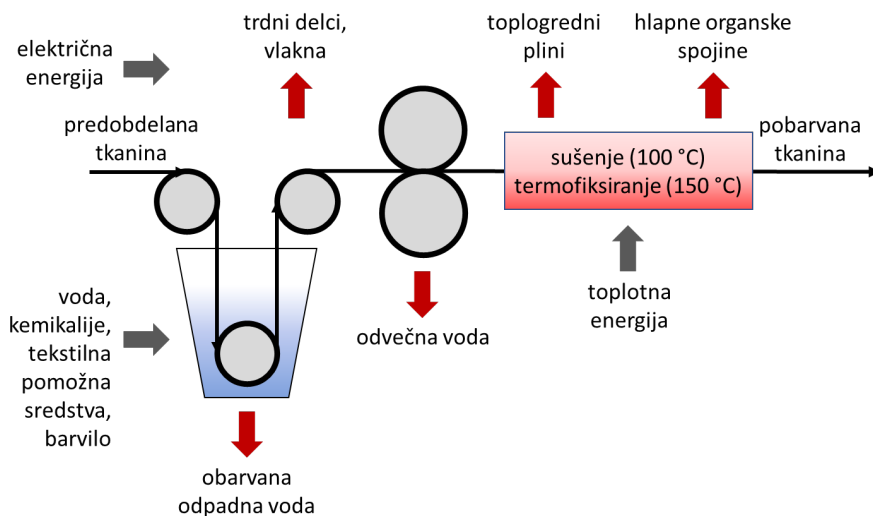
- način obdelave (fizikalno-mehanska, kemijska in kombinirana obdelava),
- namen (osnovno plemenitenje, dodelava videza in funkcionalna obdelava),
- fazo obdelave (predobdelava, barvanje, tiskanje in končna obdelava),
- obliko tekstilnega materiala (vlakna, preje, tkanine, pletenine, netkane tekstilije ter plastene in zlepljene tekstilije),
- surovinsko sestavo tekstilnega materiala (tekstilije na osnovi celuloze: bombaž, lan, juta, konoplja itd., na osnovi regenerirane celuloze: viskoza, modal, lyocell itd., na osnovi beljakovin: volna, svila itd., na osnovi sintetičnih materialov: poliester, poliamid, poliakrilnitril itd. ter tekstilije na osnovi mešanic naravnih in sintetičnih materialov) in
- obstojnost obdelave (permanentna in nepermanentna obdelava) [2].

Glede na način prehajanja plemenitilnih sredstev iz obdelovalnih kopeli na tekstilije delimo tehnološke postopke plemenitenja na dve skupini:

- **postopke izčrpavanja** – diskontinuirani postopki, pri katerih potekata prehod in (kemijska ali fizikalna) vezava sredstva na tekstilni material v razredčeni kopeli oz. vodnem mediju dalj časa,
- **postopke impregniranja** – sredstva prehajajo na tekstilni substrat v kratkem časovnem obdobju iz koncentrirane kopeli, reakcija med reagentom in tekstilnim materialom pa poteka v naslednji fazi fiksiranja [1].

## 1.2 Vpliv plemenitilnih postopkov na okolje

Postopki plemenitenja so velik porabnik tehnološke vode, električne energije in goriva, pri čemer nastanejo velike količine onesnažene odpadne vode in izpusti trdih delcev (angl.: *Particulate Matter*, PM), hlapnih organskih spojin (angl.: *Volatile Organic Compounds*, VOC) in toplogrednih plinov v okolje. Slika 1.1 prikazuje postopek impregniranja in njegov vpliv na okolje; s sivo puščico so prikazani vhodni parametri in z rdečo puščico izpusti v okolje.



Slika 1.1: Shematski prikaz postopka impregniranja in njegov vpliv na okolje

**Odpadne vode**, ki nastanejo pri kemijskih (mokrih) postopkih plemenitjenja, so zelo različne po svoji sestavi, saj vsebujejo vrsto strukturno različnih barvil, tekstilnih pomožnih sredstev in kemikalij [3]. Raziskovalci namenjajo največ pozornosti razgradnji barvil, zaradi njihove specifične barve, kemijske strukture in ker so nekatera sintetizirana iz toksičnih spojin (aromatski amini, ki se uporabljajo pri sintezi azo barvil), čeprav sama barvila najpogosteje niso največji onesnaževalci.

Poleg nevezanih barvil so v odpadni vodi iz plemenitilnice prisotni tudi:

- težko razgradljivi dispergatorji in druge površinsko aktivne snovi,
- ostanki škrobilnih sredstev,
- olja in maščobe,
- alkalije, kisline, soli,
- reducenti, oksidanti,
- organsko vezani halogeni,
- fosfati in drugi kompleksanti,
- dušikove spojine,
- težke kovine,
- naravna in sintetična vlakna (mikroplastika) itd.

Kemične snovi lahko povzročajo akutne **ekotoksične učinke v naravnem okolju**, posebno v večjih koncentracijah. Tudi kronična izpostavitve nižjim koncentracijam lahko povzroči obolenja ali celo smrt. Parametri za določanje ekotoksičnosti so: efektivna koncentracija, smrtna koncentracija in koncentracija brez vpliva. Testiranje poteka na vodnih organizmih.

Odpadne vode različnih plemenitilnih procesov so različno obremenjene z onesnaževali in se združujejo v bazenih, v katerih poteka nevtralizacija, redčenje in posedanje [4]. Te odplake so pogosto obarvane, imajo ekstremne vrednosti pH (so zelo kisle ali zelo alkalne), visoke vrednosti skupnega organskega ogljika (TOC), kemijske potrebe po kisiku (KPK), biokemijske potrebe po kisiku (BPK) ter adsorblijivih organskih halogenov (AOX), nizko biološko razgradljivost, velike količine raztopljenih in suspendiranih trdnih snovi, kloridov, sulfatov in fenolov.

Ekološka obremenitev odpadnih vod se zaradi redčenja in združevanja vod v zbirnih bazenih (faktor redčenja mora biti znan) zmanjša do takšne stopnje, ko ni več povišanih koncentracij, ki bi ogrozile delovanje biološke čistilne naprave [4]. Kljub redčenju pa lahko pričakujemo nihanje učinkovitosti biološke čistilne naprave, v poprečju pa manjši učinek čiščenja, ker je del organskega onesnaženja težko razgradljiv (nekatera barvila in tenzidi) in ker v velikih bioloških čistilnih napravah ne moremo zagotoviti dolgih zadrževalnih časov. Zato ostaja veliko teh snovi nerazgrajenih. Pogosto samo redčenje vod daje varljiv občutek učinkovitosti čiščenja; nemalokrat pa so pri tem iztoki iz takšnih naprav čiščenja še vedno obarvani, voda v aeracijskem bazenu pa se močno peni, kar nazorno kaže, da čiščenje ni zadovoljivo. Zato je v teh primerih gospodarno preizkusiti nekatere možnosti zmanjšanja količine odpadnih vod in možnosti predčiščenja najbolj onesnaženih kopeli kot zaščito in podporo čistilni napravi.

Postopki plemenitenja so tudi velik porabnik **energije**; cena energije na kg izdelka ima bistven vpliv na končno ceno izdelka. Energijo, ki se uporablja pri plemenitilnih procesih, delimo na:

- električno energijo, ki se uporablja pri vseh postopkih izdelave tekstilij za delovanje električnih motorjev, kompresorjev, črpalok, razsvetljavo, predenje in tkanje,

- toplotno energijo, ki se uporablja v sušilno-razpenjalnih strojih ali parilnikih (fosilna goriva).

Kar 38 % energije v celotni tekstilni industriji se pri postopkih plemenitenja porabi za zagon strojev in sušenje materiala [5].

Največji porabniki toplotne energije pri plemenitjenju tekstilij so postopki sušenja, barvanja, termofiksiranja, pranja in beljenja. V sušilni komori izhlapi količina vode, ki je enaka 70–100 % mase tkanine, odvisno od konstrukcije tkanine in vrste vlaken [4]. Več kot polovica energije pri sušenju se porabi za ogrevanje zraka, ki odvajajo uparjeno in izhlapelo vodo iz sušilnika. Poleg tega se velika količina energije porabi tudi pri dveh mehanskih postopkih plemenitenja, sanforiziranju in kalandriranju, za ogrevanje strojev.

Poraba energije na enoto proizvoda je odvisna od vrste vlaken, vrste in lastnosti stroja, vrste postopka in dolžine postrojenja. Ocenjena povprečna poraba v tekstilni industriji se giblje med 0,1 in 7,3 kWh/kg izdelka (električna energija) in 11–80 MJ/kg izdelka (toplotna energija) [6]. Pri tem nastajajo **izpusti (emisije) toplogrednih plinov**, kot so ogljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ), ogljikov monoksid (CO), vodna para ( $\text{H}_2\text{O}$ ), žveplove oksidi ( $\text{SO}_x$ ) in dušikovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ).

Ogljični odtis (angl.: *Carbon Footprint*) je merilo skupne količine emisij toplogrednih plinov, ki jih povzročajo posameznik, organizacija, dogodek ali izdelek v določenem časovnem obdobju. Izraža se v ekvivalentih ogljikovega dioksida ( $\text{CO}_2\text{e}$ ). **Ogljični odtis tekstilnih materialov** je vrednost izpuščenih toplogrednih plinov v okolje v celotnem življenjskem ciklu tekstilnega materiala – od vzgoje rastlin, izdelave tekstilije in oblačila, transporta, trgovine, nege oblačila, vse do trenutka, ko oblačilo zavržemo [5]. Količina izpuščenega  $\text{CO}_2$  v okolje in posledično onesnaževanje okolja sta torej odvisna od kmetovalcev, proizvajalcev kemikalij, proizvajalcev tekstilij in končnih izdelkov, dobaviteljev, trgovcev itd. in od nas samih. Vsi pa lahko na podlagi upoštevanja različnih standardov te emisije znatno zmanjšamo.

### 1.3 Varnostni list in uredba REACH

Vsako barvilo, kemikalijo in tekstilno pomožno sredstvo spremlja **varnostni list**, ki ga mora dobavitelj (proizvajalec oz. uvoznik) kemikalije (snovi ali zmesi) predložiti prejemniku te kemikalije (kupcu oz. distributerju) brezplačno v papirni ali elektronski obliki. Varnostni list mora vsebovati naslednje podatke:

1. identifikacija snovi/zmesi in družbe/podjetja
2. določitev nevarnosti
3. sestava/podatki o sestavinah
4. ukrepi za prvo pomoč
5. protipožarni ukrepi
6. ukrepi ob nenamernih izpustih
7. ravnanje in skladiščenje
8. nadzor izpostavljenosti/osebna zaščita
9. fizikalne in kemijske lastnosti
10. obstojnost in reaktivnost
11. toksikološki podatki
12. ekološki podatki
13. odstranjevanje
14. podatki o prevozu
15. zakonsko predpisani podatki
16. drugi podatki.

**Uredba REACH** – Uredba o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij (angl.: *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) je predpis Evropske unije, ki je začel veljati 1. 6. 2007 (Uredba ES, št. 1907/2006) [7]. Uredba je bila sprejeta za izboljšanje varovanja zdravja ljudi in okolja pred tveganji, ki jih lahko povzročijo kemikalije, ter hkrati za okrepitev konkurenčnosti kemijske industrije Evropske unije.

Na podlagi uredbe REACH dokazno breme nosijo podjetja. V skladu z uredbo morajo proizvajalci in dobavitelji v celotni dobavni verigi zagotavljati informacije o tveganjih, ki jih prinašajo snovi, in napotke za ravnanje z njimi. Podjetja ali posamezniki, ki med svojimi industrijskimi ali poklicnimi dejavnostmi uporabljajo kemikalijo, bodisi posamezno bodisi v zmesi, morajo Evropski agenciji za kemikalije (angl.: *European Chemicals Agency*, ECHA) dokazati, kako je mogoče snov varno



uporabljati, in uporabnike seznaniti z ukrepi za obvladovanje tveganja. Uredba tako vzpostavlja postopke za zbiranje in ocenjevanje informacij o lastnostih in nevarnostih snovi. Organi lahko nevarne snovi prepovejo, če so njihova tveganja neobvladljiva. Njihova uporaba se lahko tudi omeji ali pa se zanje zahteva predhodno dovoljenje.

Uredba je tudi neposredno povezana z uredbo o **razvrščanju, označevanju in pakiranju nevarnih kemikalij** (angl.: *Classification, Labelling and Packaging of hazardous chemicals*, CLP), ki določa stavke o nevarnosti, opozorilne besede, previdnostne stavke in piktograme (slika 1.2), ki so pomemben vir informacij za varnost na delovnem mestu (Uredba ES, št. 1272/2008 in 197/2024) [8]. Namen uredbe CLP je zagotoviti visoko raven varovanja zdravja in okolja ter prosti pretok snovi, zmesi in izdelkov.



Slika 1.2: Piktogrami za nevarne kemikalije (Uredba ES, št. 1272/2008) [8]

Znotraj uredbe REACH je posebno področje namenjeno **nanomaterialom** (Uredba ES, št. 2020/878) in uvaja nove določbe o varnostnih listih, ki dopolnjujejo nove zahteve za registracijo nanomaterialov. Nanomateriali so kemične snovi ali materiali, ki vsebujejo delce različnih oblik in velikosti, ki so v vsaj eni dimenziji manjši od 100 nm.

## 1.4 Trajnostno plemenitenje tekstilij

Obstajajo različni načini za zmanjšanje količine odpadne vode in/ali energije (znižanje ogljičnega odtisa) pri plemenitjenju tekstilnih materialov, ki so v povezavi s [9]:

### 1) s stroji in opremo:

- uporaba strojev z nizkim in ultra nizkim kopelnim razmerjem – manjša poraba vode za predobdelavo, barvanje, končno obdelavo in medfazno pranje; istočasno manjša poraba energije za ogrevanje barvalnih in pralnih kopeli,
- predgretje procesne vode s sončnimi kolektorji za zmanjšanje porabe drugih neobnovljivih virov energije,
- ustrezna toplotna izolacija strojev za barvanje in sušenje,
- spremljanje porabe energije (računalniško podprti sistemi za monitoring energije na posamezni napravi),
- namestitev sistemov za rekuperacijo toplote – vračanje toplote oz. energije v naprave ali za ogrevanje prostorov,
- recikliranje in ponovna uporaba tehnološke vode z namestitvijo ustreznega filtra;

### 2) s postopki:

- združevanje faz in/ali zmanjševanje in združevanje postopkov pri predobdelavi, barvanju in končnem plemenitjenju, avtomatizacija in s tem optimiziranje postopkov, zaradi česar se zmanjša poraba vode in energije,
- uporaba okolju prijaznejših tehnoloških postopkov (npr. digitalni tisk),
- nizkotemperaturno barvanje (25–40 °C), zaradi česar se zmanjša poraba energije,
- uporaba tehnologije ultravijoličnega (UV) sevanja za fiksiranje barvil, tiskarskega črnila in končne apreture namesto termofiksiranja,
- sušenje pri nizki temperaturi, zmanjšanje faz sušenja in skrajšanje časa sušenja,
- uporaba alternativnega medija (pena, zrak ali superkritični CO<sub>2</sub>) namesto vode,

- uporaba alternativnih tehnik ogrevanja in sušenja (npr. mikrovalovi);

### 3) s kemikalijami in barvili:

- kationska predobdelava bombaža pred barvanjem z direktnimi in reaktivnimi barvili (barvanje brez uporabe soli), pri čemer se zmanjša količina soli v odpadni vodi,
- uporaba okolju prijaznejših, biološko razgradljivih kemikalij in tekstilnih pomožnih sredstev,
- uporaba encimov,
- uporaba novih reaktivnih barvil s povečano stopnjo izčrpavanja in vezanja – manjša količina soli in nevezanih barvil v odpadni vodi,
- recikliranje kemikalij;

### 4) z obdelavo odpadne vode:

- uporaba kemijskih, fizikalno-mehanskih in bioloških sistemov za čiščenje odpadnih vod,
- uporaba blata iz čiščenja odpadnih vod za gorivo.

Postopek Econtrol proizvajalca Monforts je primer trajnostnega kontinuiranega postopka barvanja celuloznih tkanin, pri katerem se reaktivna barvila fiksirajo na tkanino v enostopenjskem (združenem) postopku barvanja in sušenja s kontrolirano kombinacijo pare in zraka [10]. Celoten postopek sušenja traja le 2–3 minute pri temperaturi 120–130 °C in relativni vlažnosti 25–30 %. Poleg tega v barvalno kopel ni treba dodajati soli in ni potreben parilnik za ločeno fazo fiksiranja. Neposredna povratna informacija o rezultatih barvanja zmanjšuje čas omakanja, kar zagotavlja dobro ponovljivost od laboratorija do množične proizvodnje. Prav tako ni potrebno takojšnje izpiranje, kar omogoča prilagodljivo načrtovanje proizvodnje.



## 2 Ekološka problematika odpadnih vod pri plemenitjenju

Kemijski (mokri) postopki plemenitenja so velik porabnik tehnološke vode, pri čemer nastanejo velike količine odpadne vode, ki so obremenjene z različnimi vrstami in koncentracijami onesnaževal, odvisno od:

- oblike in vrste materiala, ki ga plemenitimo,
- postrojenja (kontinuirno in diskontinuirno postrojenje) ter
- postopka plemenitenja (predobdelava, barvanje, tiskanje in končna apretura), ki je odvisen od želenih končnih lastnosti tkanine (bela, obarvana, potiskana, vodoodbojna, z različnimi otipi itd.) [11].

### 2.1 Predobdelava

Predobdelava zajema vrsto tehnoloških postopkov, s katerimi obdelamo tekstilne materiale tako, da jih pripravimo za nadaljnje postopke plemenitenja, kot so barvanje, tiskanje in končno apretiranje [2]. Cilji predobdelave tekstilnih materialov so:

- odstraniti nečistoče v naravnih vlaknih, kot so maščobe, voski, pektini in proteini (celulozna vlakna) ter maščobe, znoj, blato, celulozne primesi itd. (beljakovinska vlakna),
- odstraniti nečistoče, ki so na vlaknih ostale po predhodnih postopkih obdelave (odstranjevanje škrobnih sredstev, preparacij, avivaž itd.),
- doseči večjo sposobnost navzemanja vode (večjo hidrofilnost vlaken).





Za predobdelavo tekstilnega materiala se porabi 18–42 % tehnološke vode od skupne porabe, ki je potrebna za kemijsko plemenitjenje tekstilij [12]. Nečistoče se v postopkih predobdelave odstranjujejo pri visokih temperaturah, kar vpliva na porabo energije in izgubo toplote.

Med kemijske postopke predobdelave materialov, ki potekajo v vodnem mediju in tako z izpusti odpadnih vod pomembno vplivajo na okolje, prištevamo: razškrbljenje, izkuhavanje in merceriziranje, beljenje itd. Vplivi tekstilnih pomožnih sredstev in kemikalij na okolje in njihova toksičnost v preglednicah od 2.1 do 2.3 se nanašajo na koncentracije, ki se uporabljajo pri predobdelavi tekstilij.

### 2.1.1 Razškrbljenje

V preglednici 2.1 je prikazan vpliv razškrbljenja na okolje, toksičnost uporabljenih tekstilnih pomožnih sredstev in kemikalij ter možne okolju prijaznejše rešitve [4].





Tabela 2.1: Vpliv razškrbljenja na okolje in možne rešitve

Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
Škrob	Se popolnoma razgradi, visoke vrednosti KPK	Ne	Niso potrebne
Celulozni derivati, škrobni etri	So težko razgradljivi, visoke vrednosti KPK	Ne	Recikliranje
Poliakrilati	So težko razgradljivi, visoke vrednosti KPK	Škodljivi za mikroorganizme	Recikliranje
Polivinilalkohol (PVA)	Je težko razgradljiv, visoke vrednosti KPK	Ne	Recikliranje

### 2.1.2 Izkuhavanje in merceriziranje bombaža ter alkalna obdelava poliestra

V preglednici 2.2 je prikazan vpliv alkalnega izkuhavanja in merceriziranja bombaža ter alkalne obdelave poliestra (PES) na okolje, toksičnost uporabljenih tekstilnih pomožnih sredstev in kemikalij ter možne okolju prijaznejše rešitve [4].





**Tabela 2.2: Vpliv alkalnega izkuhavanja in merceriziranja bombaža ter alkalne obdelave poliestra (PES) na okolje in možne rešitve**

Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
Natrijev hidroksid (NaOH) za alkalno izkuhavanje in merceriziranje	Visok pH, visoke vrednosti KPK, velike količine odpadnih vod	Ne	Recikliranje NaOH, uporaba encimov za razgradnjo voskov bombaža
Tvorci kompleksov, fosfati, EDTA	Vsebnost težkih kovin, EDTA težko biološko razgradljiva	Strupeni za ribe	Zamenjava z zeoliti, uporaba mehke vode
NaOH za alkalno obdelavo PES	Visok pH, obremenitev odpadnih vod s tereftalno kislino, etilenglikolom, visoke vrednosti KPK	Ne	Recikliranje NaOH in tereftalne kisline ter etilenglikola

### 2.1.3 Beljenje

V preglednici 2.3 je prikazan vpliv beljenja na okolje, toksičnost uporabljenih belilnih sredstev in kemikalij, ki imajo funkcijo belilnega sredstva ter možne okolju prijaznejše rešitve [4].

Tabela 2.3: Vpliv beljenja na okolje, toksičnost in možne rešitve

Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
Natrijev klorat(I) oz. natrijev hipoklorit (NaOCl)	Tvorba klororganskih spojin, povišane vrednosti AOX, visok pH	Halogenorganske spojine škodijo jetrom	Zamenjava s H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Natrijev hidrogensulfat(IV) oz. natrijev bisulfit (NaHSO <sub>3</sub> ) za naknadno obdelavo	Redukcijski učinek, v stiku s kisljinami se sprošča strupen plin	Škodljivo za mikroorganizme v čistilnih napravah	Zamenjava postopka
Natrijev klorat(III) oz. natrijev klorit (NaClO <sub>2</sub> )	Tvorba ClO <sub>2</sub>	ClO <sub>2</sub> je živčni strup, zastrupitve krvi	Zamenjava s H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Natrijev disulfat(III) oz. natrijev hidrosulfit (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) za redukativno beljenje volne	Redukcijski učinek na odpadne vode	Škodljivo za mikroorganizme	Oksidacijsko beljenje z encimi
Alkilfenoletoksilati za beljenje in predobdelavo	So težko razgradljivi	Metaboliti so toksični za ribe	Zamenjava z masnimi alkoholetoksilati
Optična belila	So težko razgradljiva	Ne	Izbira vsaj delno biološko razgradljivih belilnih sredstev

#### 2.1.4 Trajnostna predobdelava tekstilij

Okolju prijaznejši **trajnostno naravnani postopki predobdelave** se osredotočajo na:

- razvoj alternativnih postopkov predobdelave, kot so predobdelava s plazmo, beljenje z UV in ozonom, souporaba ultrazvoka itd.,
- uporabo encimov,
- uporabo biološko razgradljivih sredstev,
- recikliranje kemikalij (npr. NaOH) iz odpadnih vod in njihovo ponovno uporabo,
- razvoj strojev z majhnim volumnom,
- avtomatizacijo in s tem optimiziranje postopkov,



- nizkotemperaturno beljenje,
- zmanjševanje ali združevanje postopkov (razškrobljenje, izkuhavanje in beljenje) v eno fazo [12].

## 2.2 Barvanje

Barvanje je proces, pri katerem barvilo prehaja iz barvalne kopeli na tekstilni material in se z njim fizikalno ali kemijsko veže [13]. Za barvanje je treba pripraviti **barvalno kopel**, ki je vodna raztopina ali disperzija barvil, kemikalij (kislina, alkalije, soli) in tekstilnih pomožnih sredstev (sekvestirna, egalizirna, protipenilna, dispergirna, omakalna, protimigracijska sredstva itd.), ki omogočajo optimalni potek barvanja in enakomerno obarvanje. Od vrste vezi med barvilom in vlaknom so odvisne barvne obstojnosti tekstilij pri njihovi proizvodnji, uporabi in vzdrževanju.

Barvila razvrščamo v skupine glede na:

- **kemijsko strukturo**: azo, trifenilmetinska, antrakinonska, indigoidna, nitro, nitrozo, kinolinska, akridinska, polimetinska, ftalocianinska, ksantanska, oksazinska;
- **tehnološko uporabnost**: substantivna ali direktna, reaktivna, reduktivna, žveplena, oksidacijska, indigosolna, bazična (kationska), kislina (anionska), kromna, kovinsko kompleksna, disperzna [13].

Najpogosteje uporabljena barvila so azo barvila, sledijo jim antrakinonska, polimetinska, trifenilmetinska in druga.

Onesnaževanje okolja z barvili povzročajo naslednji viri:

- procesne odpadne vode barvarn,
- odstranitev odvečnega materiala in procesnih ostankov,
- odstranitev rabljene embalaže,
- nezgodni izpusti.

Največ barvil preide v okolje kot posledica tehnološkega procesa barvanja. Vrsta in stopnja onesnaženja glede na različne barvalne procese ter uporabljena barvila in tekstilna pomožna sredstva je predstavljena v preglednici 2.4, vpliv postopkov

barvanja z različnimi barvili na okolje in možne rešitve pa v preglednici 2.5. Vplivi tekstilnih pomožnih sredstev in kemikalij na okolje in njihova toksičnost se nanašajo na koncentracije, ki se uporabljajo pri barvanju tekstilij.

**Tabela 2.4: Vrsta onesnaženja glede na različne barvalne procese [4]**

Vlakno	Barvilo	Vrsta onesnaženja (stopnja onesnaženja)*
Celulozna vlakna in regenerirana celulozna vlakna	Direktno	Sol (1) Nevezano barvilo (3) Bakrove soli (redko v barvilih) (5) Kationska sredstva za poobdelavo (4)
	Reaktivno	Sol, alkalije (1) Nevezano barvilo (3)
	Redukcijsko	Alkalije, sol (1) Oksidacijska sredstva (1) Redukcijsko sredstvo (4)
Beljakovinska vlakna in poliamid (PA)	Kromno	Organske kisline (2) Ioni težkih kovin (5)
	Kovinsko kompleksno	Sol (1) Organske kisline (2) Egalizirna sredstva (3)
	Kislo	Organske kisline (2) Nevezano barvilo (3)
PES	Disperzno	Organske kisline (2) Redukcijsko sredstvo (4) Nosilec (3–5)
Poliakrilnitril (PAN)	Bazično (kationsko)	Sol (1) Organske kisline (2) Anionski zaviralec (3) Kationski zaviralec (5)

\* Višja številka pomeni večjo obremenitev okolja.

### 2.2.1 Barvila

Barvila, ki se ne vežejo s tekstilnim materialom pri izpiranju, prehajajo v odpadne vode in že v nizkih koncentracijah (0,1–1 mg/L) obarvajo odpadne vode, odvisno od vrste barvila, barve, adsorpcijskega koeficienta barvila, svetlobnih razmer in čistosti vode, kar je moteče predvsem z estetskega in psihološkega vidika [3]. Barvila, ki absorbirajo svetlobo pri valovni dolžini, potrebni za fotosintezo, lahko zavirajo rast alg.

Obarvanost odpadnih vod je parameter onesnaženja, za katerega so določene mejne dovoljene vrednosti spektralnega absorpcijskega koeficienta (SAK). Sintetična barvila so slabo biološko razgradljiva, zato je treba upoštevati možnost njihove

akumulacije ter akutne in/ali kronične učinke na organizme v okolju, odvisno od časa izpostavljenosti in koncentracije barvila. Nekatera aminoantrakinonska barvila so strupena tako za ribe kot za alge (na toksičnost vplivata vrsta in položaj substituentov v molekuli).

V komercialnih barvilih je 20–80 % aktivne snovi (barvila), vse drugo so nečistoče (nezreagirane izhodne spojine, stranski produkti, ki se tvorijo pri sintezi barvil) in dodatki (tenzidi, dispergirna sredstva, soli, težke kovine, polnila itd.), ki se na koncu procesa prav tako znajdejo v odpadni vodi.

### 2.2.2 Soli

Soli (elektroliti), najpogosteje natrijev klorid ( $\text{NaCl}$ ) oz. kuhinjska sol in natrijev sulfat(VI) ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ali natrijev sulfat(VI) dekahidrat oz. Glauberjeva sol ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), v kopeli močno povečajo izčrpavanje barvil [3]. Zniža se elektrostatični odboj med vlaknom in barvilom, vendar se zmanjša tudi topnost barvila. Soli vplivajo na zvišanje anorganskih parametrov v odpadni vodi (celotni klor in sulfati), zmanjša se razvoj bakterij, kar moti ozmotski sistem in povečuje gostoto vode.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se v anaerobnih razmerah razgradi do vodikovega sulfida oz. žveplovodikove kisline ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ki se lahko ob prisotnosti kisika pretvori v žveplovo(IV) kislino ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). Obe kislini povzročata korozijo betona v kanalizacijskih sistemih in čistilnih napravah.

### 2.2.3 Alkalijske

Barvanje celuloznih vlaken (bombaž, lan, juta itd.) in regeneriranih celuloznih vlaken (viskoza) poteka v močno alkalnem mediju pri visokem pH ob dodatku alkalije, najpogosteje natrijevega hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) ali natrijevega karbonata ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) [13]. Vloga alkalije v kopeli pri reaktivnem barvanju je, da veže nase klorovodikovo kislino ( $\text{HCl}$ ), ki nastane pri reakciji med barvilom in vlaknom, ter da poveča nukleofilnost celuloze v primerjavi z nukleofilnostjo  $\text{OH}^-$  ionov vode, zaradi česar se poveča afiniteta barvila do vlakna [3]. Alkalijske vplivajo na povečanje hidrolize reaktivnega barvila v barvalni kopeli in na visok pH odpadne vode. Pri reduktivnem barvanju je dodatek  $\text{NaOH}$  potreben za tvorbo vodotopne natrijeve soli levko oblike barvila in za nevtralizacijo kislih razpadlih produktov redukcijskega sredstva (natrijev hidrosulfit,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ).

### 2.2.4 Organske kisline

Barvanje beljakovinskih vlaken (volna, svila) in sintetičnih vlaken (PA, PES in PAN) poteka v kislem mediju pri nizkem pH, zato je potreben dodatek organske kisline, najpogosteje oetne ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) [13]. Optimalno pH območje, ki omogoča normalno rast in razvoj vseh vodnih organizmov, je med 6,5 in 9. Pri nižjih pH vrednostih pride do:

- pH 6,0 – pogin rakov, polžev in školjk, nastanek močvirja,
- pH 5,8 – pogin občutljivih insektov,
- pH 5,4 – pogin postrvi,
- pH 5,0 – pogin lososov, ostrizhev in ščuk,
- pH 4,7 – pogin rečnih postrvi, jegulj,
- pH < 4,7 – preživijo le na kisel pH neobčutljivi insekti [4].

### 2.2.5 Tekstilna pomožna sredstva

Tekstilna pomožna sredstva (TPS) so lahko površinsko aktivne spojine (tenzidi) ali pa različne organske in anorganske spojine.

**Omakalna sredstva** se pogosto dodajajo pri postopkih barvanja in omogočajo lažje prodiranje barvila v notranjost vlaken. Lahko delujejo dražilno in so pri neposrednem vnosu v vodo škodljiva za vodne organizme [3].

**Sekvestirna sredstva**, ki iz tehnološke vode vežejo nase ione Ca, so zelo oporečna in povzročajo močno onesnaženje odpadnih vod. So težko biorazgradljiva in neprimerna za konvencionalno biološko čistilno napravo (ČN).

Odstranjevanje nevezanih delcev barvila poteka v pralni kopeli ob dodatku neionogenih ali rahlo anionaktivnih **pralnih sredstev**. Pralna sredstva povzročajo penjenje na površini odpadne vode in močno znižajo količino kisika v vodi.




Natrijev disulfat(III) –  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  (natrijev hidrosulfit oz. ditionit) je močno **redukcijsko sredstvo**, ki ga uporabljamo pri barvanju z redukcijskimi barvili in pri reduktivni poobdelavi PES po barvanju z disperznimi barvili. Ekološko je oporečen,

saj je zelo strupen za ribe, je velik porabnik kisika v odpadnih vodah, v kislem mediju pa razpade v žveplov dioksid ( $\text{SO}_2$ ), kar še poveča toksičnost [3].

## 2.2.6 Ioni težkih kovin

Ioni težkih kovin so dobro topni v vodi in se tako lahko enostavno bioakumulirajo v živih tkivih, kar lahko privede do nastanka različnih bolezni in motenj. Številni ioni težkih kovin so toksični oz. potencialno rakotvorni, odvisno od načina in trajanja izpostavljenosti ter tudi od njihove koncentracije.




**Preglednica 2.5: Vpliv postopkov barvanja celuloznih vlaken z različnimi barvili na okolje, toksičnost in možne rešitve [4]**

BARVANJE CELULOZNIH VLAKEN		
Vpliv na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<b>Direktna barvila</b> Obremenitev odpadnih vod s solmi, obarvanje odpadnih vod, slaba biološka razgradljivost kationskih sredstev za naknadno obdelavo	Azo barvila lahko tvorijo rakotvorne metabolite (tolidin, dianisidin, benzidin), kationske spojine so toksične za ribe	Prepoved uporabe rakotvornih barvil, obarjanje kationskih sredstev z anionskimi tenzidi
<b>Reaktivna barvila</b> Visoka obremenitev odpadnih vod s solmi, hidroliza barvil in posledično visoka vsebnost barvil in alkalij v odpadnih vodah	Možne kožne spremembe, počasna razgradnja barvil v biološki ČN	Uporaba reaktivnih barvil z visoko stopnjo fiksiranja, kot so bifunkcionalna reaktivna barvila, optimiziranje procesa
<b>Redukcijska barvila</b> Obremenitev odpadnih vod z redukcijskimi sredstvi, alkalijami, solmi in preostankom barvil	Redukcijska sredstva uničujejo mikroorganizme, v čistilnih napravah prisotna $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ in $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , ki sta strupena za ribe	Nevtralizacija odpadne vode, souporaba glukoze kot redukcijskega sredstva
<b>Žveplova barvila</b> Natrijev sulfid v odpadnih vodah, visoka vsebnost soli, delno kromati kot oksidacijska sredstva (ne v EU)	Natrijev sulfid je strupen za mikroorganizme, povzroča poškodbe kože, oči, kromati so rakotvorni	Uporaba glukoze kot redukcijskega sredstva in $\text{H}_2\text{O}_2$ kot oksidacijskega sredstva

Ftalocianinska in pogosto tudi direktna barvila običajno vsebujejo **baker** (Cu), ki ga povezujejo s cirozo jeter; pri koncentraciji, višji od 3 mg/L, je zabeležen celo smrtni primer.

Kromna in nekatera kovinsko kompleksna barvila za barvanje volne vsebujejo **krom** (Cr), ki se po barvanju lahko znajde v odpadni vodi [4]. Najnevarnejši je šestvalentni krom (Cr(VI)), ki se adsorbira v rdečih krvnih telescih ter povzroča pljučnega raka in genetske spremembe. Trivalentni krom (Cr(III)) je v primerjavi s Cr(VI) manj toksičen, ker ima manjšo sposobnost adsorpcije. Ravno zaradi toksičnih in rakotvornih lastnosti so kromna barvila umaknili iz postopkov barvanja.

**Tabela 2.6: Vpliv postopkov barvanja beljakovinskih vlaken z različnimi barvili na okolje, toksičnost in možne rešitve [4]**

BARVANJE BELJAKOVINSKIH VLAKEN		
Vpliv na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<b>Kisla barvila</b> Obremenitev z žveplovo in očetno kislino, natrijevim sulfatom in barvili	Nekatera kislila azo barvila lahko tvorijo rakotvorne metabolite, prisotnost žveplove kisline in natrijev sulfat povzročata korozijo betona ČN	Uporaba barvil, ki ne razpadejo na rakotvorne amine, uporaba kislil barvil, ki se barvajo pri višjem pH, zamenjava očetne kisline z mravljično kislino
<b>Kovinsko kompleksna barvila</b> Obremenitev z žveplovo kislino (barvila 1 : 1) ali očetno kislino (barvila 1 : 2), redko ostanki barvil, ki vsebujejo Cr(III) ali druge kovine	Prisotnost žveplove kisline in amonijevega sulfata povzročata korodiranje betona ČN, spojine s Cr(III) so toksične	Zamenjava očetne kisline z mravljično kislino, uporaba izbranih barvil
<b>Kromna barvila</b> Obremenitev z dikromatom za obdelavo oz. vezanje barvil	Cr(VI) je rakotvoren, škodujejo ledvicam, dražijo kožo	Izvedba postopka barvanja v superkritičnem CO <sub>2</sub>
<b>Reaktivna barvila</b> Visoka obremenitev odpadnih vod s solmi, hidroliza barvil in posledično visoka vsebnost barvil in alkalij v odpadnih vodah	Možne kožne spremembe, počasna razgradnja barvil v ČN	Uporaba reaktivnih barvil z visoko stopnjo fiksiranja, kot so bifunkcionalna reaktivna barvila, optimiziranje procesa

V preglednici 2.5 je prikazan vpliv različnih postopkov barvanja na okolje, toksičnost uporabljenih barvil, kemikalij in tekstilnih pomožnih sredstev ter možne okolju prijaznejše rešitve.

Tabela 2.7: Vpliv postopkov barvanja sintetičnih vlaken z različnimi barvili na okolje, toksičnost in možne rešitve [4]

BARVANJE SINTETIČNIH VLAKEN		
Vpliv na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<p><b>Disperzna barvila</b> Carrierji in nekatera dispergirna sredstva so slabo biološko razgradljivi (aromatska dispergirna sredstva, ki vsebujejo sulfo skupine, naftalinsulfokislina, ligninsulfonati), obremenitev z redukcijskimi sredstvi in oligomeri pri naknadni obdelavi</p>	<p>Klorirani aromati kot nosilci škodujejo jetrom, ledvicam, delno so možne tudi poškodbe živčevja, hidrosulfid draži kožo in je strupen pri zaužitju, nekatera disperzna barvila povzročajo kožne alergije</p>	<p>Barvanje brez nosilcev pri VT pogojih, uporaba razgradljivih dispergirnih sredstev, izvedba barvanja v alkalnem mediju, pri čemer naknadna alkalna obdelava ni potrebna</p>
<p><b>Bazična (kationska) barvila</b> Obremenitev z barvili in zaviralci, kationske spojine so toksične za ribe</p>	<p>Zaviralci in kationska barvila so težko biološko razgradljivi</p>	<p>Postopek barvanja brez zaviralcev pri višji temperaturi, optimiziranje količine barvila</p>

### 2.2.7 Trajnostno barvanje tekstilij

Zaradi potrebe po **ekološko sprejemljivejših – trajnostno naravnanih barvalnih postopkih**, ki bodo še vedno stroškovno učinkoviti, tekstilni materiali pa bodo še vedno dobro barvno obstojni na pranje in svetlobo, se razvoj postopkov barvanja osredotoča predvsem na:

- razvoj novih barvil in tekstilnih pomožnih sredstev (večje izčrpanje in boljše vezanje barvil ter tako manjši izpusti barvil v okolje, biorazgradljiva in do okolja prijaznejša barvila in tekstilna pomožna sredstva),
- razvoj strojev za barvanje z nizkimi oz. ultra nizkimi kopelnimi razmerji (postopki izčrpanja) in naprav za omakanje z majhnim volumnom (postopki impregniranja) – manjša količina barvalne kopeli in tako manjša količina odpadnih vod z ostanki barvil in kemikalij,

- združevanje faz – enostopenjsko barvanje in sušenje (primer: slika 1.3),
- uporabo alternativnega medija za barvanje namesto vode (superkritični CO<sub>2</sub>),
- uporabo organskih spojin namesto anorganskih [14].

### 2.3 Tiskanje

Tiskanje tekstilij je eden najstarejših, najenostavnejših in najcenejših postopkov proizvodnje večbarvnih tekstilij. Tiskanje običajno izvajamo na beljenih ali barvanih tekstilijah, na katere lahko nanašamo tudi do 20 različnih barvil v najrazličnejših vzorcih.

Postopek tiskanja zajema več faz:

- priprava tiskarskih barvnih gošč,
- tiskanje,
- fiksiranje tiskarskega barvila, ki poteka ob prisotnosti pare ali vročega zraka,
- poobdelava (pranje) [2].

Tiskarske barvne gošče so po navadi sestavljene iz:

- tiskarskega gostila,
- tekstilnih pomožnih sredstev,
- tiskarskega barvila ali pigmenta.

#### 2.3.1 Tiskarska gostila

Tiskarska gostila v vodi močno nabreknejo in ob relativno nizkem deležu suhe substance dajejo koloidne raztopine z visoko viskoznostjo. Gostilo ima nalogo posrednika, ki nosi vse sestavine tiskarske barvne gošče ter med fiksiranjem omogoča kemijske in fizikalne reakcije med tiskarskim barvilom in tekstilijo. Kot tiskarska gostila so v uporabi številni produkti:

- naravna gostila: škrob, naravne gume, gostila živalskega izvora, alginat,



- sintetična gostila: škrobni etri, celulozni derivati, emulzijska gostila, polivinilni derivati.

### 2.3.2 Tiskarska tekstilna pomožna sredstva

Tiskarska tekstilna pomožna sredstva dodajamo tiskarski barvni gošči z namenom izboljšanja vezave barvil na tekstilni material in doseganja večje enakomernosti nanosa. To so predvsem sredstva proti penjenju, omakalna in dispergirna sredstva, higrotropna, redukcijska sredstva itd. Pri pigmentnem tisku dodajamo veziva, zamreževalce in sredstva za sproščanje kisline (kvaterna amonijeva sol in amonijev hidrogenfosfat(V)). Vrsta in količina sredstev sta predpisani z recepturo za tiskanje.

### 2.3.3 Tiskarska barvila in pigmenti

**Tiskarska barvila** so prirejena za postopke tiska, kar pomeni, da imajo finejšo disperzno stopnjo, so dobro topna in imajo dobro sposobnost dispergiranja. Topnost barvil izboljšajo hidrotropna sredstva (npr. sečnina), ki jih dodajamo v tiskarsko barvno goščo. Večina barvil za tisk je v obliki past in je za njihovo fiksiranje zadosten kratek čas obdelave v pari ali vročem zraku.





**Pigmenti** so v obliki obarvanih netopnih delcev velikosti 0,01  $\mu\text{m}$ , zato je za njihov obstojni nanos na površino treba dodati vezivno sredstvo. Pigmenti so lahko organski (na osnovi ogljika) ali anorganski.

### 2.3.4 Vpliv tiskanja na okolje

Postopku tiskanja sledita fiksiranje potiskane tkanine in pranje. Za fazo se po navadi uporabljajo širinski pralni stroji s profitočnim sistemom pranja, ki so sestavljeni iz več kadi, v katerih potekata pranje in izpiranje za določen sistem barvilo – vlakno po ustreznih recepturah in predpisanih tehnoloških parametrih (temperatura, čas pranja, število kadi itd.).

Pri fazi pranja iz potiskane tkanine izperemo odvečna gostila, ostanke barvil in tiskarska pomožna sredstva, ki se znajdejo v odpadnih vodah in negativno vplivajo na okolje (preglednica 2.6). Vplivi tekstilnih pomožnih sredstev in kemikalij na okolje in njihova toksičnost se nanašajo na koncentracije, ki se uporabljajo pri tiskanju tekstilij.

Tabela 2.8: Vpliv postopkov tiskanja na okolje, toksičnost in možne rešitve [4]

Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<b>Naravna gostila</b> Škrob, različne moke, alginati	Se popolnoma razgradijo, imajo visoke vrednosti KPK	Ne	Optimiziranje receptur in ponovna uporaba preostanka tiskarske paste
<b>Sintetična gostila</b>	So težko razgradljiva	Ne	Izbira gostil z boljšo razgradljivostjo
<b>Konzervirna sredstva</b> Ortofenilfenoli, halogenirani fenoli	So težko biološko razgradljiva	So strupena, povzročajo poškodbe jeter in ledvic	Sprotna priprava gostila in s tem manjša količina konzervirnih sredstev
Sečnina (reaktivni tisk)	Visoka vsebnost dušika	Škodljiva za mikroorganizme v ČN	Uporaba drugega sredstva za nabrekanje
Derivati sulfenske kisline (redukcijski in jedki tisk)	Redukcijski učinek na odpadne vode	Strupeni za mikroorganizme v odpadni vodi	Uporaba druge vrste tiska
Poliakrilati (vezivna sredstva pri pigmentnem tisku)	So težko razgradljivi	Pod mejo toksičnih koncentracij	Zamenjava z razgradljivimi vezivnimi sredstvi
Kvaterne amonijeve spojine (pri pigmentnem tisku)	So težko razgradljive	So toksične za ribe	Uporaba ekološko ustreznih produktov

## 2.4 Končna obdelava

S končno obdelavo (apreturo) dobi tekstilni material želene lastnosti: lepšo zunanost, izboljšano ali spremenjeno površino, lesk, otip in druge posebne lastnosti (vodoodbojnost, UV zaščito itd.). Končno apreturo naneseemo na tekstilni material po barvanju in/ali tiskanju [1].

Sem spadajo naslednje apreture: trdilne, polnilne, obtežilne, mehčalne, za zmanjšanje leska, antistatične in apreture za doseganje specialnih oz. funkcionalnih lastnosti (vodoodbojna in oljeodbojna, protimikrobna, proti mečkanju, proti krčenju, peri – nosi, za zmanjšanje gorljivosti, UV zaščitna itd.).

### 2.4.1 Vpliv končne obdelave na okolje

Vpliv različnih končnih apretur, ki z odpadnimi vodami prehajajo v okolje, je prikazan v preglednicah od 2.7 do 2.10. Vplivi tekstilnih pomožnih sredstev in kemikalij na okolje in njihova toksičnost se nanašajo na koncentracije, ki se uporabljajo pri končni obdelavi tekstilij.

Tabela 2.9: Preparacijska sredstva, antistatične apreture, mehčalci [4]





Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<b>Preparacijska sredstva</b> Kondenzacijski produkti maščobnih kislin, estri fosforne kisline, mineralna olja, silikoni, poliglikoleter masnih kislin, alkilpoliglikoleter, polietilen, kvaterne amonijeve spojine itd.	Visoke vrednosti KPK, obremenitev odpadnih vod s fosforjem, mineralnimi olji in polietilenom, so težko razgradljiva	Alkilfosfati škodijo pljučem in krvnemu obtoku, kvaterne amonijeve spojine so toksične za ribe	Uporaba ekološko ustreznih in biološko razgradljivih produktov
<b>Antistatične apreture</b> Kvaterne amonijeve spojine, ester fosforne kisline, kondenzacijski produkti maščobnih kislin	Visoke vrednosti KPK, obremenitev odpadnih vod s fosforjem	Kožne alergije, kvaterne amonijeve spojine so toksične za ribe	Izbor sredstva glede na namen uporabe (za obdelavo ali na končnem produktu)
<b>Mehčalci</b> Kvaterne amonijeve spojine, silikoni, kondenzacijski produkti maščobnih kislin, poliuretani, parafini itd.	Visoke vrednosti KPK, so težko razgradljivi	Kožne alergije, kvaterne amonijeve spojine so toksične za ribe	Uporaba ekološko ustreznih in biološko razgradljivih produktov

Tabela 2.10: Ognjevarne apreture [4]





Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<b>CELULOZNA VLAKNA</b>			
Fosfonati, fosfati, estri fosforne kisline, spojine fosfonija, sečnina, formaldehid (CH <sub>2</sub> O), antimonov(III) oksid (Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), tetrakis (hidroksimetil) fosfonijev klorid (THPC)	Obremenitev odpadnih vod s fosforjem, dušikom, halogenorganskimi spojinami, visoke vrednosti AOX, pri THPC se sprošča formaldehid	CH <sub>2</sub> O in Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sta rakotvorna, povzročata kožne alergije	Zamenjava s produkti brez formaldehida in halogenov
<b>BELJAKOVINSKA VLAKNA</b>			
Titanove (Ti) in cirkonijeve (Zr) soli, heksafluortitanat, terabromoftalni anhidrid (TBPA)	Obremenitev odpadnih vod s težkimi kovinami in v primeru TBPA sproščanje škodljivega polibromiranega dioksida	Ti in Zr soli škodujejo mikroorganizmom	Uporaba samo na materialih, ki se ne perejo in nimajo stika s kožo
<b>POLIESTRNA VLAKNA</b>			
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , halogen fosforne spojine, ciklični fosfat/ fosfonat	Obremenitev odpadnih vod s fosforjem in halogeni, so težko razgradljivi, visoke vrednosti AOX, pri gorenju se razvija HBr	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> je rakotvoren, alkilfosfati škodijo pljučem in krvnemu obtoku	Uporaba spojin brez halogenov in kemična modifikacija vlaken
<b>POLIAMIDNA VLAKNA</b>			
Spojine fosforja in broma, sečnina in tiosečnina v kombinaciji s formaldehidom	Obremenitev odpadnih vod s tiosečnino, tvorba sulfidov in prisotnost formaldehida	Vpliv na ščitnico, sulfid škodi mikroorganizmom, formaldehid je rakotvoren	Sredstva dodamo že talini pred izpredanjem vlaken

Tabela 2.11: Apreture proti mečkanju in krčenju za celulozo, lepljenje vlaknovin, plastenje [4]










Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<b>Apertura proti mečkanju in krčenju</b> Formaldehidni reagenti: sečninsko formaldehidne in melaminske smole; dimetilol etilen sečnina (DMEU), dimetilol dihidroksi etilen sečnina (DMDHEU), dimetilpropilen sečnina (DMPU)	Odpadne vode, obremenjene z ostanki sredstev, imajo visoke vrednosti KPK, sredstva so težko razgradljiva	Formaldehid je rakotvoren, povzroča kožne alergije, škodljiv za mikroorganizme	Vodenje postopka za doseganje popolnega zamreženja in uporaba apretur brez vsebnosti formaldehida
<b>Lepljenje vlaknovin</b> Poliakrilati (PAC) in poliuretani (PUR) kot veziva	Odpadne vode so obremenjene s PAC in PUR, so težko razgradljivi, delna vsebnost formaldehida	Kožne alergije, škodljivi za mikroorganizme, formaldehid je rakotvoren	Zamenjava z razgradljivimi vezivi, predilne vlaknovine, vezivna vlakna
<b>Plastenje</b> Polivinilkloridi in poliuretanski polimeri, poliakrilati, poliamidi kot vodne disperzije ali v organskih topilih	Obremenitev z dimetilformamidom, izopropanolom, izobutanolom, metiletilketonom, etilacetatom	Izopropanol, metiletilketon in etilacetat učinkujejo narkotično	Uporaba sredstev za plastenje brez topil

Tabela 2.12: Hidrofobne, antimikrobne, fungicidne in oljeodbojne apreture ter apreture za odboj umazanije in odstranjevanje nečistoč [4]

Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
<b>Hidrofobne apreture</b> Parafini skupaj z Zr solmi, maščobne kisline, silikoni v kombinaciji s Cr kompleksi, vodoodbojni polidimetilsiloksani	Odpadne vode so obremenjene z Zr in Cr, visoke vrednosti KPK, so težko razgradljivi	Težke kovine uničujejo mikroorganizme	Izbor produktov, ki ne vsebujejo težkih kovin, halogenih elementov in fenola
<b>Antimikrobne in fungicidne apreture</b> Derivati benzimidazola, Zn soli, heterociklične spojine,	Odpadne vode so obremenjene s težkimi kovinami, delno s fenolnimi in	Težke kovine uničujejo mikroorganizme, halogeni so	Zamenjava s spojinami, ki ne vsebujejo težkih kovin, halogenih

Tekstilna pomožna sredstva in kemikalije 	Vplivi na okolje 	Toksičnost 	Okolju prijazne rešitve 
bifenoli, kositrove organske spojine, klor fenol ester, soli živega srebra, klorirani fenoli, formalin, 5-chloro-2-(2,4-dichlorophenoxy)phenol (C <sub>12</sub> H <sub>7</sub> Cl <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ), kvaterne amonijeve soli	halogen vsebujočimi produkti ter Sn in Hg organskimi spojinami, visoke vrednosti AOX	škodljivi za jetra in ledvice, kositer je škodljiv za živce, klorirani fenoli in formalin so toksični	elementov in fenola, enkapsuliranje in nanos s premazovanjem, uporaba hitozana
<b>Oljeodbojne apreture in apreture za odboj umazanije</b> Fluorogljikovodikova (FC) odbojna sredstva, polimeri, biotski produkti (novejši)	Obremenitev odpadnih vod s polimeri, FC so težko razgradljivi	Škodljivi aerosoli	Optimalno vodenje impregnacijskega postopka
<b>Apreture za odstranjevanje nečistoč (Soil-release)</b> Karboksi apreture s hidroksilnimi skupinami (metil celuloza, škrob hidroksipropil škrob, celulozni acetat itd.), apreture z etoksi skupinami, apreture na osnovi fluoriranih ogljikovodikov (modificirani fluoroplimeri)	Obremenitev odpadnih vod s težko razgradljivimi produkti, visoke vrednosti KPK	Škodljivi aerosoli	Optimalno vodenje impregnacijskega postopka

#### 2.4.2 Trajnostna končna obdelava tekstilij

Podobno kot predobdelava in barvanje je **končna obdelava usmerjena k trajnostno naravnanim postopkom**, kar pomeni predvsem:

- menjavo toksičnih apretirnih sredstev z naravnimi, ki so biorazgradljiva, netoksična in biokompatibilna (biopolimeri, bioaktivne spojine rastlinskega izvora, naravni zamreževalci),
- uporabo encimov za doseganje specialnih efektov (obdelava denima),
- uporabo postopkov z nizkim oz. ultra nizkim kopelnim razmerjem,
- avtomatizacijo in s tem optimiziranje postopkov,

## 2.5 Normativi in monitoring odpadnih vod

Primernost industrijskih odpadnih vod za izpust v vodotoke v Evropski uniji določa Direktiva 91/271/EEC Evropskega parlamenta in Sveta (angl.: *Urban Waste Water Treatment Directive*), ki predpisuje osnovno potrebo po sekundarnem čiščenju pri odvajanju industrijskih odpadnih vod ter mejne vrednosti za izpust v vodotoke (BPK<sub>5</sub> 25 mg/L, KPK 125 mg/L, TOC 37 mg/L, neraztopljene snovi 35 mg/L).

Primernost tekstilnih odpadnih vod za izpust v vodotoke v Sloveniji ocenjujemo na podlagi mejnih vrednosti parametrov onesnaževanja, ki so usklajeni z evropsko zakonodajo in so podani v naslednjih uredbah (Uradni list RS, št. 7/07):

- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz objektov in naprav za proizvodnjo, predelavo in obdelavo tekstilnih vlaken določa posebne zahteve v zvezi z emisijo, in sicer:
  - mejne vrednosti parametrov odpadne vode (preglednica 2.13),
  - posebne ukrepe v zvezi z zmanjševanjem emisije snovi [15].
- Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda iz virov onesnaževanja (Uradni list RS, št. 35/96), ki med drugim predpisuje:
  - mejne vrednosti emisije snovi v tekoče površinske vode in v obalno morje ali kanalizacijo,
  - mejne vrednosti emisije toplote v tekoče površinske vode,
  - vrednotenje emisije snovi in toplote,
  - prepovedi in druge ukrepe zmanjševanja emisije v vode in tla v zvezi z odvajanjem odpadnih vod [16].

**Tabela 2.13: Mejne vrednosti parametrov odpadne vode iz naprav za proizvodnjo tekstilij za odvajanje neposredno v vode in javno kanalizacijo, kot jih predpisuje Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih voda iz objektov in naprav za proizvodnjo, predelavo in obdelavo tekstilnih vlaken (Uradni list RS, št. 7/07) [15]**

Parameter odpadne vode	Izražen kot	Enota	Mejne vrednosti za iztok v vode	Mejne vrednosti za iztok v kanalizacijo
<b>I. SPLOŠNI PARAMETRI</b>				
1. Temperatura		°C	30	40
2. pH vrednost		pH	6,5–9,0	6,5–9,0
3. Neraztopljene snovi		mg/L	80	(a)
4. Usedljive snovi		ml/L	0,5	10
5. Obarvanost:				
– pri 436 nm	SAK	m <sup>-1</sup>	7,0	(b)
– pri 525 nm	SAK	m <sup>-1</sup>	5,0	
– pri 620 nm	SAK	m <sup>-1</sup>	3,0	
<b>II. BIOLOŠKI PARAMETRI</b>				
7. Strupenost za vodne bolhe	S <sub>D</sub>		4	-
8. Biološka razgradljivost		%	70	(h)
<b>III. ANORGANSKI PARAMETRI</b>				
9. Aluminij	Al	mg/L	3,0	(c)
11. Baker*	Cu	mg/L	1,0	1,0
13. Cink*	Zn	mg/L	3,0	3,0
14. Kadmij*	Cd	mg/L	0,1	0,1
15. Kobalt*	Co	mg/L	0,5	0,5
16. Kositer*	Sn	mg/L	1,0	1,0
17. Celotni krom*	Cr	mg/L	2,0	2,0 (1,0(d))
18. Krom – šestvalentni*	Cr(VI)	mg/L	0,1	0,1
21. Svinec*	Pb	mg/L	0,5	0,5
24. Klor*	Cl <sub>2</sub>	mg/L	0,2	0,5
25. Celotni klor *	Cl <sub>2</sub>	mg/L	0,5	1,0
26. Amonijev dušik	N	mg/L	5	(e)
33. Celotni fosfor	P	mg/L	1,0	-
34. Sulfat	SO <sub>4</sub>	mg/L	(f)	400 (f)
35. Sulfid	S	mg/L	0,5	1,0
36. Sulfit	SO <sub>3</sub>	mg/L	1,0	1,0
<b>IV. ORGANSKI PARAMETRI</b>				
37. Celotni organski ogljik (TOC)	C	mg/L	60 (g)	(h)
38. Kemijska potreba po kisiku (KPK)	O <sub>2</sub>	mg/L	200 (i)	(h)
39. Biokemijska potreba po kisiku (BPK <sub>5</sub> )	O <sub>2</sub>	mg/L	30	-
41. Celotni ogljikovodiki*		mg/L	10	20
43. Adsorbiljni organski halogeni* (AOX)	Cl	mg/L	0,5	0,5
44. Lahkohlapani klorirani ogljikovodiki* (LKCH) (j)	Cl	mg/L	0,1	0,2
46. Fenoli*	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	mg/L	0,1	10



Parameter odpadne vode	Izražen kot	Enota	Mejne vrednosti za iztok v vode	Mejne vrednosti za iztok v kanalizacijo
47. Vsota neionskih in anionskih tenzidov		mg/L	1,0	(a)

\* Predpis, ki ureja emisijo snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo

- (a) mejna koncentracija neraztopljenih snovi in tenzidov v industrijski odpadni vodi se določi v okoljevarstvenem dovoljenju na podlagi mnenja upravljavca javne kanalizacije oziroma komunalne ali skupne čistilne naprave o vrednosti, pri kateri še ni škodljivega vpliva na kanalizacijo ali ni motenj pri obratovanju komunalne ali skupne čistilne naprave,
- (b) uporabljajo se določbe tretjega odstavka 3. člena te uredbe,
- (c) mejna vrednost parametra je določena posredno z mejno vrednostjo za neraztopljene snovi,
- (d) če se v isto kanalizacijo odvajajo industrijske odpadne vode iz več naprav za proizvodnjo, predelavo in obdelavo tekstilnih vlaken, ki se čistijo na isti komunalni ali skupni čistilni napravi, je mejna vrednost za odvajanje v javno kanalizacijo 1 mg/L,
- (e) za odpadne vode, ki odtekajo na čistilne naprave z zmogljivostjo, manjšo od 2.000 PE, je mejna vrednost 100 mg/L. Za odpadne vode, ki odtekajo na čistilne naprave z zmogljivostjo, enako ali večje od 2.000 PE, je mejna vrednost 200 mg/L,
- (f) mejna vrednost se določi v skladu s predpisom, ki ureja emisijo snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo,
- (g) če v mesečnem povprečju iz analize 24-urnega reprezentativnega vzorca izhaja, da je vrednost TOC v surovi industrijski odpadni vodi na dotoku v biološko stopnjo čiščenja večja od 400 mg/L, velja namesto mejne vrednosti za TOC mejna vrednost za učinek čiščenja industrijske čistilne naprave, ki ne sme biti manjši od 85 %. Učinek čiščenja se v tem primeru izračunava kot povprečna vrednost razmerja 24-urnih obremenitev odpadne vode, merjeno s TOC, na dotoku in iztoku iz industrijske čistilne naprave,
- (h) odvajanje odpadne vode je dovoljeno, če je stopnja biološke razgradljivosti odpadne vode, izražena z vrednostjo KPK ali TOC, najmanj 70 odstotkov stopnje biološke razgradnje komunalne odpadne vode na komunalni čistilni napravi,

- (i) če v mesečnem povprečju iz analize 24-urnega reprezentativnega vzorca izhaja, da je vrednost za KPK v surovi industrijski odpadni vodi na dotoku v biološko stopnjo čiščenja industrijske čistilne naprave večja od 1.350 mg/L, velja namesto mejne vrednosti za KPK mejna vrednost za učinek čiščenja industrijske čistilne naprave, ki ne sme biti manjši od 80 %. Učinek čiščenja se v tem primeru izračunava kot povprečna vrednost razmerja 24-urnih obremenitev odpadne vode, merjeno s KPK, na dotoku in iztoku čistilne naprave,
- (j) vrednost parametra v tehnološki odpadni vodi se izračuna kot vsota alifatskih kloriranih ogljikovodikov z vreliščem do 150 °C, kot so: diklormetan, 1-1-1-trikloretoan, 1-2-dikloretoan, trikloretoan in tetrakloretoan, izraženih kot Cl.

Monitoring oz. nadzor nad kakovostjo odpadnih vod tekstilne industrije se mora izvajati v skladu z zakonskimi določili in po predpisanih standardiziranih metodah, usklajenih s slovensko in evropsko zakonodajo. To področje v Sloveniji ureja **Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih voda ter o pogojih za njegovo izvajanje** (Uradni list RS, št. 94/14 in 98/15) [17]. Ta pravilnik določa parametre, vrste in obseg prvih meritev in obratovalnega monitoringa odpadnih vod ter metodologijo vzorčenja, merjenja in analiziranja vzorcev, metodologijo merjenja pretoka odpadnih vod, vrednotenje, vsebino poročila o opravljenih prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih vod ter način in obliko sporočanja podatkov o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih vod.

**Prve meritve** so tiste, ki se izvedejo po prvem zagonu novega ali rekonstruiranega vira onesnaževanja in nove ali rekonstruirane komunalne ali skupne ČN, v enakomernih časovnih presledkih in v času, ko je vir onesnaževanja ali čistilna naprava v obratovalnem stanju polne obremenitve. V okviru **obratovalnega oz. emisijskega monitoringa** pa se izvajajo trajne meritve količine odpadne vode in občasne meritve osnovnih in dodatnih parametrov odpadne vode ter količine odpadne vode med vzorčenjem.

Povzročitelj obremenitve (tekstilno podjetje) mora v zvezi z odvajanjem tehnološke odpadne vode iz naprave zagotoviti:

- zamenjavo vhodnih surovin z drugimi, ki manj obremenjujejo vode,

- rabo biološko dobro razgradljivih površinskih sredstev,
- zamenjavo barvil, ki vsebujejo živo srebro (Hg), kadmij (Cd), svinec (Pb), nikelj (Ni), Cr(VI) in druge težke kovine.

Industrijska tehnološka voda ne sme vsebovati: Cr(VI), kloroorganskih nosilcev, arzena (As) in (Hg), alkilfenoletoksilatov iz pralnih in čistilnih sredstev, EDTA, neuporabljenih in neuporabnih kemikalij, barvil in tekstilnih pomožnih sredstev.



## 3 Onesnaženje zraka pri plemenitenju

Številni plemenitilni postopki onesnažujejo zrak z izpusti oz. emisijami trdnih delcev (prašni delci in vlakna), hlapnih organskih spojin (hlapi olj, kislin, topil) in toplogrednih plinov (ogljikov dioksid, ogljikov monoksid, žveplove in dušikove spojine) [9]. V preglednici 3.1 so navedeni glavni izpusti pri različnih postopkih plemenitenja.

Tabela 3.1: Izpusti pri postopkih plemenitenja [9]

Postopek	Vir	Onesnaževalo
Predobdelava	Beljenje in izkuhavanje	Klor, klorov dioksid, hlapne organske spojine iz glikol etra in topil pri izkuhavanju
Barvanje	Barvanje PES, barvanje volne in PA, barvanje z žvepljenimi barvili in anilinskimi barvili	Ocetna kislina, H <sub>2</sub> S, hlapi anilina
Tiskanje	Različne vrste tiska	Ocetna kislina, topila, amonijak
Apretiranje	Apretiranje s smolami, antistatične in mehčalne apreture, termofiksiranje sintetičnih tkanin	Hlapi formaldehida, fluorokarbon, alkilfosfati, hlapne organske spojine
Sušenje	Visokotemperaturni sušilni stroji	Hlapne organske spojine
Skladiščenje kemikalij	Izpusti iz skladiščnih kontejnerjev	Hlapne organske spojine
Proizvodnja energije	Izpusti iz grelcev	Toplogredni plini

### 3.1 Emisije hlapnih organskih spojin

**Hlapna organska spojina** (angl.: *Volatile Organic Compound*, VOC) je katera koli organska spojina in frakcija kreozota s parnim tlakom 0,01 kPa ali več pri temperaturi 20 °C ali spojina z enako hlapnostjo pri določenih pogojih uporabe (iz Uredbe o mejnih vrednostih emisije hlapnih organskih spojin v zrak iz naprav, v katerih se uporabljajo organska topila, Uradni list RS, št. 35/15) [18]. **Halogenirana hlapna organska spojina** v molekuli vsebuje vsaj en atom broma (Br), klora (Cl), fluora (F) ali joda (I).

Nekatere sestavine hlapnih organskih spojin (npr.: akrolein, benzen, toluen) so strupene in pri vdihavanju lahko škodijo pljučem in dihalnim potem (pogostejše pojavljanje in poslabšanje bolezni dihal), kar je potencialno tveganje za nastanek raka pljuč in malignega mezotelioma pri ljudeh in živalih [19]. Poleg tega so nekatere hlapne organske spojine prekursorji pri tvorbi ozona in sekundarnih organskih snovi v trdnih delcih, kar negativno vpliva na okolje.

**Primeri večjega sproščanja hlapnih organskih spojin** pri plemenitenju tekstilij:

- V primeru, da tekstilni material vsebuje ostanke mineralnih olj, plastifikatorje, mehčalna sredstva itd. iz postopkov predobdelave, ti pri visokih temperaturah pri postopku sušenja razpadejo in tvorijo meglico.
- Pri karbonizaciji volne nastajajo jedki kislinski hlapi.
- Pri postopku sušenja in fiksiranja po tiskanju se sproščajo različne organske spojine, kot so alifatski ogljikovodiki ( $C_{10}$ – $C_{20}$ ) iz veziv, monomeri (akrilati, vinilacetati, stiren, akrilonitril, akrilamid, butadien), metanol iz fiksirnih sredstev, drugi alkoholi, estri, poliglikoli iz emulgatorjev, formaldehid iz zamreževalcev in fiksirnih sredstev, amoniak, *N*-metilpirolidon iz emulgatorjev, estri fosforne kisline, fenilcikloheksen iz gostil in veziv itd.
- Pri postopkih končnega apretiranja nastajajo hlapi topil, ki vključujejo strupene spojine, kot so kerozin ali mineralno terpentinovo olje, formaldehid, klorofluorogljikovodike, mono- in diklorobenzen, etil acetat, heksan, stiren itd. Njihovo vdihavanje draži oči in respiratorni sistem ter povzroča številne bolezni dihal (bronhitis, bronhiolitis, astma itd.) [20].

**Zmanjšanje emisij hlapnih organskih spojin v okolje** je mogoče doseči z:

- uporabo alternativnega medija pri plemenitenju oz. uporabo naprednih plemenitilnih postopkov/naprav, pri katerih je za doseganje enakega učinka plemenitenja potrebna manjša količina barvil, kemikalij, tekstilnih pomožnih sredstev in apretirnih sredstev;
- uporabo zaprtih sistemov za barvanje, tiskanje, nanos končne apreture ter sušenje in fiksiranje;
- menjavo hlapnih apretirnih in tekstilnih pomožnih sredstev s sredstvi, ki so dobro obstojna pri visokih temperaturah in ne hlapijo pri postopkih fiksiranja in sušenja ter pozneje pri negi izdelka (likanje).

### 3.2 Emisije toplogrednih plinov

Kemijsko (mokro) plemenitenje tekstilnega materiala obsega različne vrste postopkov in naprave, odvisno od vrste in oblike materiala, ki se plemeniti, ter končnih lastnosti in videza, ki jih/ga želimo doseči. Pri večini postopkov, kjer potrebujemo toplotno energijo (proizvodnja pare za ogrevanje), gre za sežig fosilnih goriv (nafta, premog, mestni plin itd.), pri čemer nastanejo **izpusti (emisije) toplogrednih plinov**, kot so **ogljikov dioksid (CO<sub>2</sub>)**, **ogljikov monoksid (CO)**, **vodna para (H<sub>2</sub>O)**, **žveplove oksidi (SO<sub>x</sub>)** in **dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>)** [21]. Raziskovalci so izračunali, da pri kontinuiranem plemenitenju bombažne tekstilije nastane približno 50 % izpustov pri sušenju, 40 % pri pranju in parjenju ter 10 % pri sami obdelavi tekstilije.

Na energijsko intenzivnost postopkov (porabo energije) vplivajo zelo različni dejavniki, kot so:

- predobdelava: odvisna je od vrste materiala in končnih lastnosti – bombaž zahteva več postopkov predobdelave kot volna; naravna vlakna so bolj predobdelana kot sintetična;
- barvanje/tiskanje: odvisno od oblike materiala – kontinuirni in diskontinuirni postopki barvanja; nekatere tkanine so samo beljene, druge so barvane ali potiskane ter tretje barvane in potiskane;

- končno plemenitenje: odvisno od vrste materiala ter zahtevanih končnih lastnosti in otipa gredo lahko posamezni tekstilni materiali skozi več faz končnega plemenitenja (fizikalno-mehanskih in/ali kemičnih);
- pranje: med posameznimi fazami je postopek pranja;
- sušenje in termofiksiranje: med posameznimi fazami je postopek sušenja [5].

V tekstilni proizvodnji so potrebne različne vrste energije za delovanje strojev in izvajanje procesov, za klimatiziranje proizvodnje, osvetlitev itd. **Električna energija** je glavna vrsta energije za hlajenje, regulacijo temperature, osvetlitev, delovanje računalnikov, električnih motorjev, kompresorjev in črpalk pri vseh postopkih izdelave tekstilij. Medtem ko se za predenje in izdelavo tkanin porabi kar 75–80 % celotne električne energije, poraba za kemijske postopke plemenitenja znaša približno 15–20 % [5, 22].

V primerjavi z drugimi postopki pri izdelavi tekstilnega materiala so **postopki plemenitenja zelo velik porabnik toplotne energije**:

- 45–75 % za kemijske (mokre) postopke plemenitenja (predobdelava, barvanje in pranje),
- 15–40 % za postopke sušenja in fiksiranja (sušilno-razpenjalni stroji, parilniki itd.) ter
- 8–18 % za mehanske postopke plemenitenja (sanforiziranje, kalandriranje itd.) in prežračevanje [5, 23].

Poraba energije na kilogram tekstilnega materiala bistveno vpliva na končno ceno izdelka. Odvisna je od vrste vlaken, oblike tekstilnega materiala, vrste in lastnosti stroja, vrste postopka in dolžine postrojenja.

Mera za količino toplogrednih plinov, ki se sproščajo v okolje v celotnem življenjskem ciklu posameznega tekstilnega materiala (od vzgoje rastlin, izdelave tekstilije in oblačila, transporta, trgovine, nege oblačila do trenutka, ko oblačilo zavržemo), je tako imenovani **ogljčni odtis** (angl.: *Carbon Footprint*), ki se podaja v enotah CO<sub>2</sub> [24, 25].

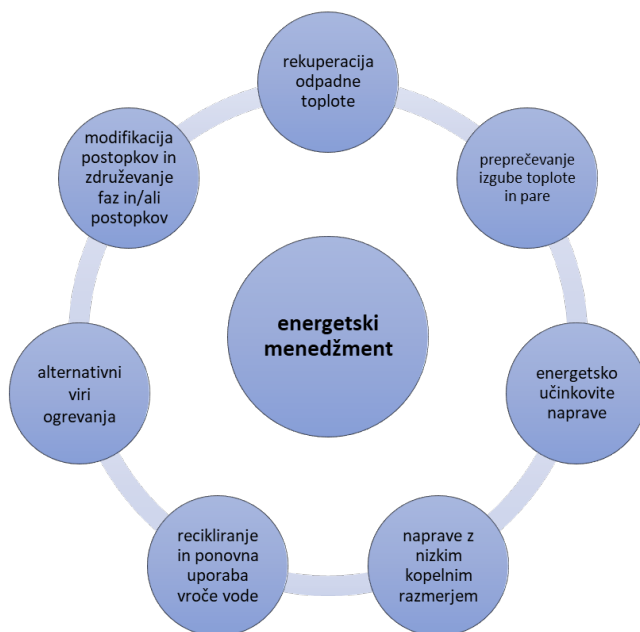


Ogljični odtis se lahko ovrednoti na dva načina:

- **primarni odtis** spremlja emisije ogljika neposredno preko porabe energije – poraba fosilnih goriv za elektriko, ogrevanje, transport itd.,
- **sekundarni odtis** se nanaša na posredne emisije ogljika (življenjski cikel izdelkov in trajnost).

Zato je najučinkovitejši način za zmanjšanje ogljičnega odtisa tekstilnega izdelka zmanjšanje količine energije, potrebne za njegovo proizvodnjo, ali zmanjšanje odvisnosti od goriv, ki sproščajo ogljik [24].

Slika 3.1 prikazuje primer energetskega menedžmenta pri plemenitenju tekstilij.



Slika 3.1: Elementi energetskega menedžmenta pri plemenitenju tekstilnega materiala [21]



## 4 Alternativni mediji pri plemenitenju

Postopki plemenitenja (predobdelava, barvanje, tiskanje in končna obdelava) so velik porabnik vode, pri čemer nastanejo velike količine odpadne vode, ki vsebuje strukturno različna barvila, kemikalije, tekstilna pomožna sredstva, kovinske ione itd. Kljub prizadevanjem za zmanjšanje porabe vode z optimiziranjem strojne opreme, recikliranjem vode, čiščenjem in ponovno uporabo odpadne vode je poraba vode v tekstilni industriji še vedno previsoka. Pri barvanju po postopku izčrpavanja se porabi približno 100–150 L vode na 1 kg tekstilnega materiala, odvisno od vrste vlaken, barvila in naprave [26].

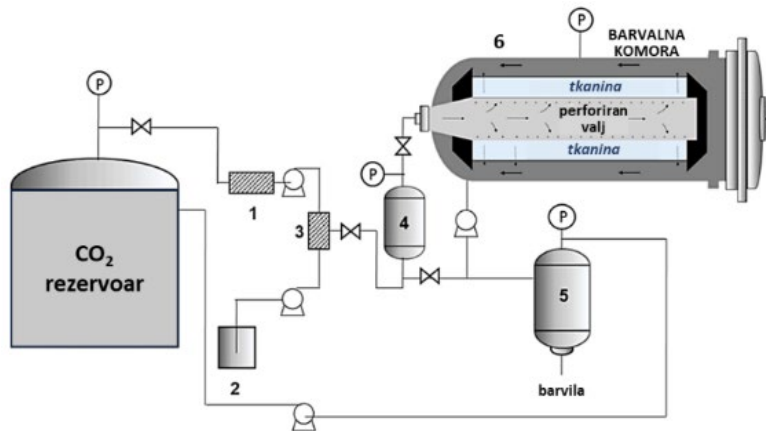
V zadnjem času proizvajalci razvijajo naprave in postopke, ki namesto vode (topilo za barvila in apretirna sredstva) uporabljajo druge medije, kot so superkritični ogljikov dioksid ( $scCO_2$ ), zrak, pena ali dušikova atmosfera (inertni  $N_2$ ). Ker vlakna pri obdelavi niso omočena kot v primeru obdelave v vodnem mediju, naknadno sušenje ni potrebno oz. je minimalno, kar pomeni bistven prihranek pri energiji in s tem manjši ogljični odtis. Prav tako je manjša poraba barvil, kemikalij in tekstilnih pomožnih sredstev in s tem onesnaženost odpadnih voda.

## 4.1 Superkritični CO<sub>2</sub>

Superkritična tekočina je stanje snovi nad kritično temperaturo in tlakom (kritična točka spojine) [27]. Nad to točko plinasto in tekoče agregatno stanje snovi ne obstajata več. Superkritična tekočina ima tako nekatere lastnosti podobne plinom (dobro difundiranje v material in nizko viskoznost) in druge podobne tekočinam (gostota in stisljivost) ter tako dobro sposobnost raztapljanja. S spreminjanjem temperature in tlaka spreminjamo njihovo gostoto; če tlak pri kritičnih pogojih povišamo štirikrat, se gostota približno podvoji in približa gostoti tekočin, sposobnost difundiranja in viskoznost pa ostaneta takšni, kot ju imajo plini.

Najpogosteje uporabljena superkritična tekočina za plemenitenje tekstilij je superkritični ogljikov dioksid (scCO<sub>2</sub>) [27, 28]. CO<sub>2</sub> je brez vonja in okusa, visoke stopnje čistosti, ni strupen, ni vnetljiv, ni koroziven, se komercialno proizvaja, se enostavno transportira, je enostaven za uporabo in cenovno dostopen. Kritična točka CO<sub>2</sub> je v območju, ki je dosegljivo s tehničnimi sredstvi ( $T_c = 31,1 \text{ }^\circ\text{C}$  in  $P_c = 73,8 \text{ bar}$ ). Zaradi nepolarosti in visoke gostote scCO<sub>2</sub> zelo dobro raztaplja hidrofobne snovi, kot so disperzna barvila.

ScCO<sub>2</sub> se pri plemenitjenju tekstilij najpogosteje uporablja za »suho« oz. »brezvodno« **barvanje poliestrnih vlaken** (PES) z disperznimi barvili, za kar pri konvencionalnem barvanju v vodnem mediju potrebujemo visoko temperaturo ali dodatek carrierja. Industrijska shema sistema za barvanje s scCO<sub>2</sub> je prikazana na sliki 4.1 [29]. Tkanina se navije na perforiran valj v visokotlačni barvalni komori. CO<sub>2</sub> se pri kritični temperaturi in tlaku pretvori v scCO<sub>2</sub> in se skupaj z raztopljenim barvilom črpa v barvalno komoro, kjer skozi luknjice perforiranega valja kroži skozi tkanino izmenično v obeh smereh, od znotraj navzven in obratno. Enakomeren pretok scCO<sub>2</sub> (z barvilom) skozi tkanino je odvisen od vrste in strukture tkanine, vrste in koncentracije barvila ter procesnih parametrov v barvalni komori (hitrost pretoka, čas obdelave, temperatura in tlak).



Slika 4.1: Shema sistema za barvanje s scCO<sub>2</sub>: (1) hladilni sistem, (2) posoda s sotopilom, (3) mešalo, (4) posoda za barvilo, (5) ločevalnik za oborjeno barvilo, (6) visokotlačna barvalna komora [30]

Postopek barvanja poteka pri temperaturi nad 70 °C in tlaku nad 180 barov [27]. V ekspaniranem tekočem stanju CO<sub>2</sub> prodre v tekstilna vlakna in med postopkom deluje kot sredstvo za nabrekanje, kar poveča difuzijo barvil v vlakna. Temperatura steklastega prehoda vlaken se zniža, kar pospeši hitrost prodiranja barvila v tekstil. Disperzno barvilo, raztopljeno v scCO<sub>2</sub>, prodre globoko v pore in kapilarno strukturo PES vlaken, kar zagotavlja njihovo učinkovito obarvanje. Po postopku barvanja se preostali CO<sub>2</sub> uplini, presežek barvila se obori, čisti CO<sub>2</sub> pa se reciklira s črpanjem nazaj v barvalno komoro. Pri barvanju ni treba dodajati kemikalij, soli in tekstilnih pomožnih sredstev.

#### **Prednosti uporabe scCO<sub>2</sub> pri barvanju PES namesto vodne kopeli:**

- brez dodajanja tekstilnih pomožnih sredstev, soli in kemikalij za uravnavanje pH,
- raztapljanje barvila je mogoče nadzorovati s tlakom,
- v superkritični tekočini je razpršenost delcev barvila večja, zato je difuzija hitrejša,
- penetracija barvila v vlakno je hitrejša, ker ni površinske napetosti,
- 50 % manjša poraba energije kot v primeru konvencionalnega barvalnega postopka,
- sušenje po barvanju ni potrebno (zaradi odsotnosti vode),

- CO<sub>2</sub> je mogoče reciklirati (do 90 %), saj se plin ne kontaminira med procesom,
- krajši časi barvanja,
- neizčrpano barvilo je mogoče pridobiti nazaj (v obliki praška),
- ne nastajajo odpadne kopeli [27, 28].

S scCO<sub>2</sub> je poleg PES mogoče barvati tudi druga naravna (celulozna in beljakovinska) in sintetična vlakna (PP, PA in PAN), vendar se pri barvanju pojavi več problemov oz. omejitev, kot so nehomogenost obarvanja, manjše nabrekanje celuloznih vlaken in s tem manjša difuzija barvil, slaba topnost polarnih barvil (reaktivna, direktna itd.), slabše izčrpanje barvil in manjša globina obarvanj, slabše mehanske lastnosti vlaken itd. [27, 31]. Poleg tega je začetna investicija za nabavo opreme precej visoka.

ScCO<sub>2</sub> se lahko kot alternativni medij uporablja tudi za predobdelavo tekstilnih materialov (izkuhanje) in za nanos končne apreture (obdelava proti insektom, antimikrobna obdelava, hidrofobna obdelava, nanos fluorescentnih in fotokromnih pigmentov itd.) [32].

## 4.2 Zrak

Tehnologija obdelave tkanin z zračnim tokom (angl.: *airflow*) ali zračnim curkom (angl.: *air-jet*) je podobna tehnologiji obdelave z vodnim curkom (angl.: *jet*), saj se v obeh primerih tkanina obdeluje v obliki pramena v zaprtem sistemu. Razlika med sistemoma (z zračnim in vodnim tokom) je v tem, da se pri obdelavi z zračnim tokom za gibanje oz. transport tekstilnega materiala skozi sistem namesto vode uporablja zrak.

Industrijska naprava za **barvanje z zračnim tokom** je prikazana na sliki 4.2. [33]. Tkanino v napravi je treba zašiti v neskončen trak, pri čemer jo predhodno napeljemo skozi vodila mimo šob. Puhalo v komoro vpihuje visokotlačno mešanico zraka in pare, ki omogoča enakomerno gibanje tkanine (do 1000 m/min). Barvalna kopel (barvilo, soli, kemikalije in TPS v vodnem mediju) se najprej vbrizga v visokotlačno mešanico zraka in pare ter nato v obliki aerosola nadzorovano in enakomerno razprši na premikajočo tkanino preko niza šob. Velika hitrost pršenja omogoča, da barvilo prodre globoko v vlakna. Pri barvanju se uporablja zelo nizko

kopelno razmerje (KR), od 1 : 2 do 1 : 5. Odvečna barvalna kopel se zbira pod tkanino v zbiralniku in se znova uporabi za naslednji cikel barvanja. Po barvanju je mogoče kontinuirano izpiranje na isti napravi s pršenjem namesto pralne kopeli, kar prihrani velike količine vode in skrajša čas obdelave.



Slika 4.2: Industrijska naprava za barvanje z zračnim curkom

V preglednici 4.1 je prikazana primerjava vhodnih parametrov barvanja s klasičnim vodnim curkom in zračnim curkom.

Tabela 4.1: Primerjava konvencionalnega barvanja z vodnim curkom in barvanja z zračnim curkom [31]

Vhodni parametri	Enota	Konvencionalno barvanje, KR 1 : 8 do 1 : 12	Barvanje z zračnim curkom, KR 1 : 4,5
TPS	g/kg	12–72	4–24
Sol	g/kg	80–960	20–320
Barvilo	g/kg	5–80	5–80
Voda	L/kg	100–150	20–80
Para	kg/kg	3,6–4,8	1,8–2,4
Elektrika	kWh/kg	0,24–0,35	0,36–0,42

**Prednosti uporabe zraka pri barvanju namesto vodne kopeli:**

- zelo nizko kopelno razmerje, 1 : 2 (sintetična vlakna) in 1 : 3 do 1 : 5 (naravna vlakna),
- prihranek pri energiji za 40 % v primerjavi s konvencionalnimi barvalnimi napravami,
- krajši čas obdelave za ~25 %,
- nižji proizvodni stroški,
- nižja napetost tekstilij pri obdelavi,
- nizka poraba vode in majhna količina odpadne vode [31, 33].

**4.3 Pena**

Pena je disperzija plina (zraka) v tekočini (vodi) in je namesto vodne kopeli medij za nanos barvil, kemikalij in/ali apretirnih sredstev v ustrezni koncentraciji na tekstilni material [31]. Uporablja se tudi za nanašanje manjših količin polimera. Postopek nanosa pene je lahko kontinuiran ali diskontinuiran.

**4.3.1 Kontinuiran postopek plemenitenja s peno**

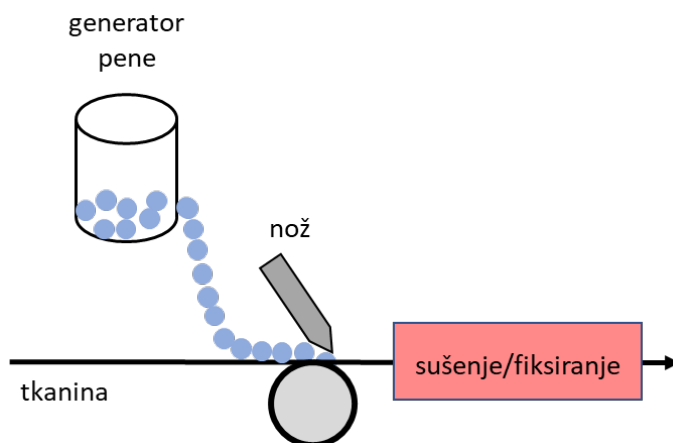
Postopek impregniranja s peno poteka v naslednjem zaporedju (slika 4.3):

1. generiranje pene skupaj z barvilom/kemikalijami/apretirnim sredstvom;
2. nanos pene skupaj z barvilom/kemikalijami/apretirnim sredstvom na tkanino;
3. razporeditev pene in difuzija barvila/kemikalij/apretirnega sredstva v tkanino;
4. razpad pene pri sušenju;
5. fiksiranje barvila/apretirnega sredstva na tkanino [34].

V generatorju pene ali mešalniku pene se stisnjen zrak vodi skozi zaprt sistem v tekoči medij (voda), ki se pod pritiskom prisilno speni (volumen se poveča za 5- do 20-krat). Od trenutka, ko pena izstopi iz mešalne glave, tlak postopoma upada in do trenutka, ko teče iz izhodne cevi, ima fino celično strukturo. Generatorji so opremljeni z dovršenimi nastavitvami in krmilnimi napravami, ki omogočajo oblikovanje pene konstantne sestave. Stopnja omočenosti tkanine in hitrost razpada

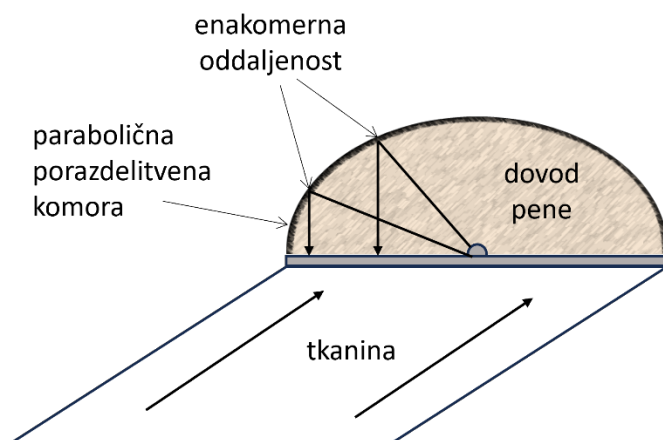


pena sta dva bistvena faktorja, ki ju je treba pri tem načinu plemenitenju tekstilij skrbno spremljati.



Slika 4.3: Shematski prikaz impregniranja s peno (nanos s pomočjo noža)

V primerjavi s klasičnim impregniranjem, pri katerem je tekstilni material popolnoma potopljen v vodno kopel, peno v obliki premaza površinsko nanašamo na tekstilni material s pomočjo noža ali valjev. Nanos je lahko enostranski ali obojestranski [34, 35]. Prav tako je mogoče na lično in hrbtno stran tekstilije nanesti različna sredstva. Običajno je količina nanesenega sredstva med 2 in 3 % glede na suho maso materiala. Na sliki 4.4 je prikazana shema sistema za nanos apretirnih sredstev s pomočjo pene.



Slika 4.4: Shema sistema za parabolični nanos pene [35, 36]

**Prednosti uporabe pene** v primerjavi z vodno kopeljo so:

- nizek ožemalni učinek (25–35 % za bombaž in 10–20 % za sintetična vlakna),
- do 80 % manjša poraba vode,
- večja hitrost nanosa,
- manjša poraba energije pri sušenju (40–70 %),
- možnost enostranskega nanosa,
- manjša deformacija površine,
- manjša poraba kemikalij,
- manjša možnost nastanka prog [34].

**Slabosti uporabe pene** v primerjavi z vodno kopeljo so:

- nizka stabilnost pene in zato slaba ponovljivost nanosa,
- nepopolno omočena površina, če je nanosena premajhna količina pene,
- neenakomerno omočena površina zaradi različne vsebnosti vlage v tkanini,
- neenakomerno omočena površina zaradi neenakomernega odtekanja pene,
- nižja stabilnost penaste formulacije pri višji koncentraciji barvila.

#### 4.3.2 Diskontinuiran postopek plemenitenja s peno

Pri postopku izčrpavanja s peno se tekočina skozi pršilo izpusti v boben; vrtenje se nadaljuje v hladnem stanju 25 minut, med njim se pena, ki nosi barvilo/kemikalije/apretirno sredstvo, enakomerno porazdeli po celotnem bobnu [35]. Po 25–30 minutah se temperatura kopeli dvigne s pomočjo pare ali vročega zraka na temperaturo, ki je potrebna za obdelavo (40–90 °C), odvisno od vrste barvila/apretirnega sredstva in vrste tkanine. Postopek obdelave poteka eno uro, pri čemer se barvilo/apretirno sredstvo fiksira na tkanino.

Celoten cikel je mogoče programirati tako, da se izvede katero koli željeno zaporedje postopkov, kot so barvanje, izpiranje, končna obdelava, centrifugiranje in sušenje. Na tak način se prihrani pri vodi in tudi energiji. Kopelno razmerje je 1 : 8. Poleg tega je količina odpadne vode majhna.

#### 4.4 Dušikova atmosfera

Industrijsko napravo in postopek barvanja denima v obliki pramena z žveplenimi in indigo barvili v dušikovi atmosferi oz. z inertnim dušikom ( $N_2$ ) je razvilo podjetje MASTER S.R.L. (Italija) [30]. Tehnologijo je mogoče namestiti tudi na že obstoječe klasične barvalne linije.

V primeru barvanja v atmosferi dušika je redukcija indiga popolna, pri čemer je velikost delcev levko oblike barvila v nanometrih, kar izboljša učinkovitost barvanja. Zaradi nanovelikosti je boljše tudi fiksiranje barvila, kar izboljša obstojnost, jakost obarvanja in nasičenost v primerjavi s klasičnim barvanjem v vodnem mediju. Poleg tega se prostornina barvalne kopeli zmanjša za več kot polovico, kar ima za posledico manjšo porabo kemikalij.

**Prednosti barvanja v dušikovi atmosferi** v primerjavi s klasičnim postopkom so:

- od 50 do 80 % manjša poraba  $Na_2S_2O_4$  in NaOH,
- manjša poraba in boljše fiksiranje barvila,
- možnost ponovne uporabe barvila,
- do 80 % manjša poraba vode pri pranju,
- do 30 % manjša poraba energije,
- možnost izdelave novih, izvirnih obarvanj, ki jih ni možno izvesti s klasično tehniko barvanja,
- pri barvanju z žveplenimi barvili ni potrebna uporaba parilnika.



## 5 Alternativna plemenitilna sredstva, barvila in kemikalije

Trend pri plemenitenju tekstilij gre v smer razvoja trajnostnih, okolju prijaznih tekstilnih materialov, pri čemer se za njihovo izdelavo (med proizvodnim procesom) porabi manj energije, vode in kemikalij. Ta trend je deloma posledica prej predstavljenih zaostrenih izpustov CO<sub>2</sub> in vladnih omejitev v zvezi z odpadnimi vodami in uporabo kemikalij. Primeri uporabe alternativnih sredstev pri plemenitenju namesto zdravju in okolju škodljivih kemikalij so: kationska sredstva za predobdelavo celuloznih vlaken, encimi, biopolimeri in bioaktivne spojine, naravna zamreževalna sredstva in naravna barvila.

### 5.1 Kationska sredstva za predobdelavo celuloznih vlaken

Namen kationske predobdelave je spremeniti površinski naboj celuloznih vlaken v vodnem mediju (iz negativnega naboja v pozitiven) in s tem povečati afiniteto celuloze do negativno nabitih reaktivnih in direktnih barvil pri konvencionalnem tekstilnem plemenitenju [12]. Rezultat ionskega privlaka med kationsko obdelanim bombažem in barvili je večje izčrpavanje barvila, povečanje interakcij med barvilom in vlaknom, manjša poraba elektrolita (soli), manjše izpiranje barvila, manjša poraba vode in energije pri barvanju/pranju ter manjša količina odpadnih barvil in soli v

odpadni vodi. Pri kationski predobdelavi se eterificira primarna hidroksilna skupina na celulozi, lastnosti osnovnega materiala pa ostanejo nespremenjene.

Kationska predobdelava celuloznih vlaken lahko poteka na tri načine:

- direktna predobdelava s kemikalijami, ki vsebujejo ustrezne funkcionalne skupine, ki reagirajo s hidroksilnimi ( $-OH$ ) skupinami celuloze,
- uporaba veziva, kot je dimetilol dihidroksi etilen sečnina (DMDHEU), ki reagira tako z  $-OH$  skupinami celuloze kot s funkcionalnimi skupinami kationskega sredstva,
- polimerizacija s pripenjanjem (angl.: *graft polymerization*), pri kateri se monomerne ali polimerne kationske spojine uvajajo v celulozo [14].

Vsak od naštetih načinov ima prednosti in slabosti.

Spojine za kationsko predobdelavo lahko razdelimo v dve skupini glede na molekulsko maso:

- **monomerne spojine**, kot so epoksi spojine, kvaterne spojine klorotriazinskega tipa, *N*-metilolakril amid, holin klorid itd., in
- **polimerne spojine**, kot so poliepiklorhidrin dimetilamin, polimeri tipa poliamid epiklorhidrin, poli-(4-vinilpiridin) kvaterne amonijeve spojine, dendritični polimeri in biopolimeri, kot so hitozan, škrob in njuni derivati [14].

Vse spojine, ki se uporabljajo za kationsko predobdelavo, tako monomerne kot polimerne, imajo omejitve. Monomerne spojine imajo relativno nizko substantivnost, slabo toplotno stabilnost in neprijeten vonj, polimerne pa slabo obstojnost proti svetlobi in vplivajo na spremembo barvnega odtenka. Bolj zapletena je struktura spojine, več sinteznih korakov je potrebnih za njeno izdelavo, zato je dražja. Za optimalno kationsko predobdelavo je tako treba pazljivo izbrati ustrezno sredstvo in metodo nanosa.

V zadnjem času je velik poudarek na razvoju biorazgradljivih kationskih sredstev, ki se enostavno nanesejo na tekstilni material in tako ne ogrožajo zdravja ljudi in ne onesnažujejo okolja.

## 5.2 Encimi

V tekstilni industriji se zaradi visokih stroškov proizvodnje in ekološke problematike intenzivno proučujejo alternativni procesi, ki z izkoriščanjem naravnih virov uporabljajo neagresivne in ekološko čiste spojine, kot so encimi. **Encimi (gr.: *zymae* – droži)** ali fermenti so so beljakovine ali beljakovinski kompleksi, ki so sposobni katalizirati biokemijsko reakcijo in jih zato imenujemo tudi biokatalizatorji [37]. Encimi so torej sposobni cepiti ali hidrolizirati in tvoriti ali sintetizirati kemične vezi drugih spojin, ne da bi se pri tem sami porabili ali spremenili.

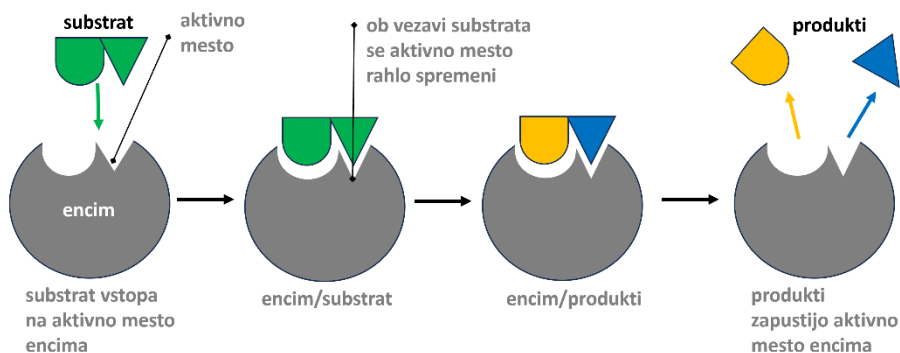
Encime delimo po njihovem izvoru na diastatične (proizvajajo jih različni sladi), pankreatinske (nahajajo se v prebavnih traktih različnih prežvekovalcev) in bakterijske amilaze (proizvajajo jih različne bakterije, npr.: *Bacillus subtilis*) [4, 38]. Za vsakega od približno 3200 do zdaj identificiranih encimov je značilna specifična katalitska aktivnost. Za klasifikacijo encimov se uporablja sistem, ki ga je leta 1961 uvedla komisija za encime pri mednarodni zvezi za biokemijo (nem.: *Internationale Union für Biochemie*, IUB) in označuje vsak encim s specifično klasifikacijsko številko in oznako EC. Glede na specifičnost biokemijskega procesa se encimi delijo v šest glavnih skupin, in sicer na:

- oksidoreduktaze (EC 1),
- transferaze (EC 2),
- hidrolaze (EC 3),
- liaze (EC 4),
- izomeraze (EC 5) in
- ligaze – sinteaze (EC 6).

Encimi so kot proteinski kompleksi sestavljeni iz približno 20 različnih  $\alpha$ -aminokislin, ki so njihova primarna struktura [39]. Za aminokislino sta značilni aminska ( $-\text{NH}_2$ ) in karboksilna ( $-\text{COOH}$ ) skupina, vezani na istem ogljikovem atomu v L-konfiguraciji, ter stranske verige z različnimi funkcionalnimi skupinami, kot jih imajo različni aromatski in alifatski ostanki. Posamezni segmenti polipeptidne verige se med seboj intramolekularno (znotraj molekule) povezujejo s sekundarnimi nekovalentnimi vezmi. Zaporedje aminokislin, vezanih v proteinsko verigo, določa strukturo in delovanje encima.

Za encime je značilno specifično delovanje [40]. Vsak encim izvaja točno določeno in samo eno funkcijo na točno določenem mestu substrata. Aktivno mesto encima, kjer poteka kataliza, je sestavljeno iz ožjega katalitičnega centra in mesta vezave substrata. Aktivno mesto encima je zelo majhno in togo ter odvisno od celotne tridimenzionalne strukture encima. Pri reakciji encim veže substrat in ga razcepi na manjše molekule ali dogradi.

Najenostavnejša razlaga delovanja encima je s pomočjo modela ključ – ključavnica [41]. Aktivno mesto encima – ključavnica, ki ima natančno definirano togo strukturo, se lahko prilega le v zanj prilegajočo obliko substrata – ključ (slika 5.1). Pogoj za takšno biokemično reakcijo je medsebojna bližina substrata in encima.



Slika 5.1: Mehanizem delovanja encima po principu ključ – ključavnica [41]

Pomemben podatek je tudi aktivnost encimov, ki pove, koliko substrata sodeluje v neki reakciji pri določeni količini encima v določenem času. Na aktivnost encimov močno vplivajo pogoji uporabe, saj večina encimov optimalno deluje v temperaturnem območju 30–70 °C in v nevtralnem pH mediju. Uporaba encimov v razmerah, ki zanje niso primerne, pomeni razgradnjo tridimenzionalne strukture – denaturiranje, kar posledično vpliva predvsem na njihovo aktivnost.

**Prednosti plemenitenja z encimi** so v primerjavi s konvencionalnimi metodami predvsem nižja temperatura obdelave in manjša poraba vode zaradi manjšega števila izpiranj. Poleg tega so encimi biorazgradljivi, mogoče jih je tudi reciklirati in znova uporabiti kot biokatalizatorje [42].



Obdelava tekstilnih materialov z encimi povzroča:

- i) povečanje hidrofilitnosti, saj encimi z reakcijo hidrolize ali oksidacije odstranijo določene snovi (nečistoče, voske, škrob itd.) s površine materiala;
- ii) vpeljavo novih funkcionalnih skupin na površino.

**Najpogosteje uporabljeni encimi** pri plemenitenju (oz. bioplemenitenju) tekstilij so:

- amilaze – razškrobljenje,
- pektinaze – izkuhavanje oz. odstranjevanje nečistoč pri surovem bombažu,
- lakaze – beljenje bombaža in oksidacija reduktivnih barvil,
- katalaze in oksidaze – odstranjevanje vodikovega peroksida po beljenju,
- celulaze – biopoliranje tkanin in celuloznih oblačil, peskanje denima,
- proteaze – obdelava proteinskih vlaken (svila, volna), mehčanje in sprememba otipa, preprečevanje luščenja in čiščenje površin, boljše drapiranje, »postaran« videz na oblačilih, izboljšano udobje,
- lipaze – odstranjevanje naravnih trigliceridov pri odstranjevanju nečistoč ali prisotnih pri razškrobljenju [38, 39].

Posamezne postopke plemenitenja z encimi je mogoče združiti v en postopek, zaradi česar se zmanjša poraba vode, energije in kemikalij, zmanjša se količina odplak in poveča produktivnost. Uspešni primeri združevanja faz so: razškrobljenje/izkuhavanje/beljenje, razškrobljenje/izkuhavanje/reaktivno barvanje, razškrobljenje/beljenje/barvanje ter izkuhavanje/biopoliranje in/ali barvanje [42]. Prav tako je mogoče med seboj kombinirati posamezne encime za povečanje učinka obdelave, na primer: kombinacija lipaze s pektinazo za povečanje učinkovitosti bioizkuhavanja bombažne tkanine ter kombinacija amilaze, celulaze in lakaze za končno obdelavo denima.

Slabi strani plemenitenja z encimi v primerjavi s klasičnimi postopki sta neenakomernost obdelave (v primeru izkuhavanja) in višja cena postopka, saj je pridobivanje encimov (izolacija, čiščenje) razmeroma drag postopek.

## **Encimatsko izkuhavanje s pektinazami**

Encimatsko izkuhavanje s pektinazami v kombinaciji s površinsko aktivnimi sredstvi (omakalna sredstva in emulgatorji) in kompleksirnimi sredstvi lahko nadomesti alkalni postopek izkuhavanja [4].

Prednosti izkuhavanja z encimi v primerjavi z alkalnim izkuhavanjem so:

- 20–50 % manjša poraba vode za izpiranje,
- ni potrebe po NaOH kot v primeru alkalnega izkuhavanja,
- 20–40 % nižje vrednosti BPK in KPK v odpadni vodi,
- krajši čas obdelave.

## **Encimatsko odstranjevanje odvečnega vodikovega peroksida s peroksidazami**

Po beljenju z vodikovim peroksidom ( $H_2O_2$ ) na površini materiala ostane 10–15 %  $H_2O_2$ , ki ga je treba popolnoma odstraniti pred postopkom barvanja/tiskanja s pomočjo redukcijskega sredstva in intenzivnega izpiranja, za kar se porabi velika količina vode in energije, izpiralna odpadna voda pa je obremenjena z redukcijskim sredstvom, ki vsebuje žveplo [42]. Pri encimatskem odstranjevanju odvečnega vodikovega peroksida s peroksidazami encimi katalizirajo redukcijo (razpad)  $H_2O_2$  na kisik in vodo, ne da bi pri tem povzročili negativno reakcijo z materialom ali barvilom pozneje pri barvanju.

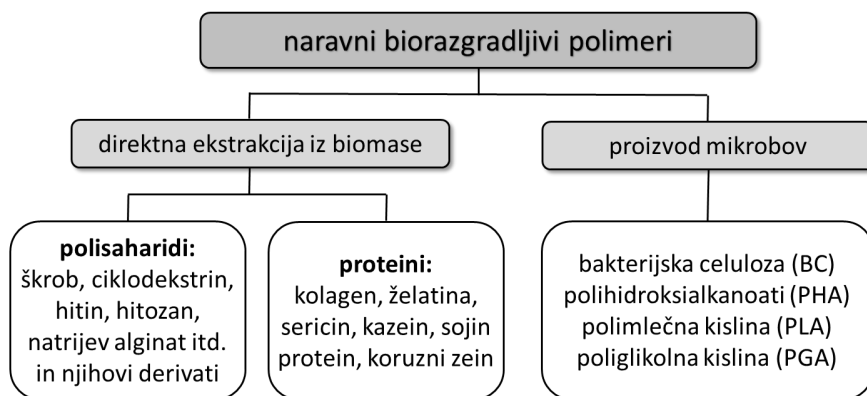
## **Biopoliranje denima s celulazami**

Za biopoliranje denima po barvanju se uporabljajo celulaze namesto peskanja z vulkanskim kamenjem za doseganje ponošenega oz. postaranega videza [38, 40]. Pri tem postopku se razgradijo obarvani celulozni fibrili na površini materiala v zelenem vzorcu. Da se izognemo poškodbam tkanine, je treba nadzirati količino encimov in čas obdelave. Postopek obdelave se konča s spremembo temperature in/ali pH, pri čemer se encimi denaturirajo.

## 5.3 Biomateriali

### 5.3.1 Biopolimeri

Za končno obdelavo celuloznih tekstilij se namesto nevarnih kemikalij in sintetičnih polimerov lahko uporabljajo tudi nekateri biopolimeri, ki so netoksični, biorazgradljivi, biokompatibilni, prijazni do okolja in varni za uporabo [40]. Slika 5.2 prikazuje razvrstitev biopolimerov glede na njihov proces nastanka.

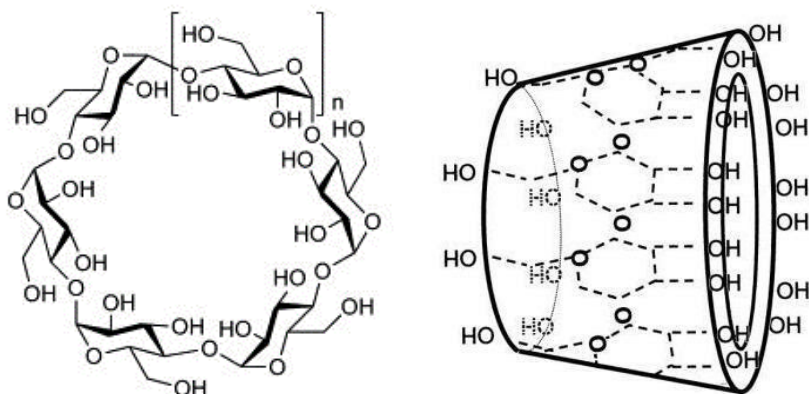


Slika 5.2: Razvrstitev biorazgradljivih polimerov glede na proces nastanka in vire [37]

**Hitozan** je linearni amino polisaharid, ki je sestavljen iz naključno porazdeljenih  $\beta$ -1,4 povezane enote D-glukozamina in N-acetil-D-glukozamina. Pridobivamo ga z alkalno deacetilacijo **hitina** (zunani skelet kozic in drugih rakov). Hitozan deluje protimikrobno proti različnim vrstam bakterij in gliv, zato se uporablja kot sredstvo za antibakterijsko obdelavo tekstilij. Hitozan, modificiran hitozan in njegovi derivati se uporabljajo tudi kot ognjevarna apretura in apretura proti mečkanju. Glavna pomanjkljivost hitozana je njegova slaba sposobnost vezanja na celulozno tkanino, kar lahko izboljšamo z uporabo sredstva za zamreženje.

**Ciklodekstrini** so ciklični oligosaharidi, ki jih pridobivamo z encimsko razgradnjo škroba iz krompirja, koruze, riža itd. Kemična struktura ciklodekstrina je sestavljena iz enot glukoze, ki so povezane z  $\alpha$ -1,4-glikozidnimi vezmi, da tvorijo prisekan stožec, z notranjim hidrofobnim prostorom in zunanjo hidrofilno površino, zaradi posebne razporeditve hidroksilnih skupin (slika 5.3). Zaradi specifične oblike lahko v svoji notranjosti veže različne organske molekule (gostujoče molekule) s

tvorjenjem kompleksa gostitelj – gost [40]. Za plemenitenje celuloznih tekstilij se najpogosteje uporablja modificiran  $\beta$ -ciklodekstrin, ki je topen v vodi in se obstojno veže na tekstilni material. Uporablja se za antibakterijsko obdelavo tekstilij, kot UV zaščitna apretura in kot apretura za nadzorovano sproščanje zdravilnih učinkovin, dišav, repelentov itd. v medicinske in kozmetične namene.

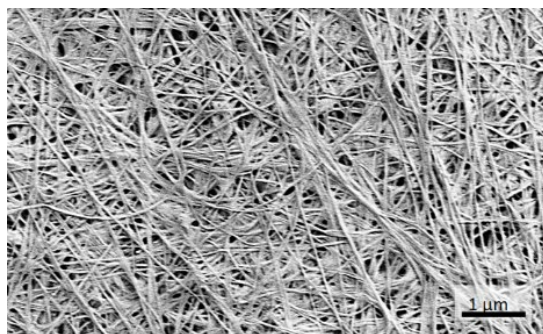


Slika 5.3: Kemijska struktura ciklodekstrina:  $n = 1$  je  $\alpha$ -ciklodekstrin,  $n = 2$  je  $\beta$ -ciklodekstrin,  $n = 3$  je  $\gamma$ -ciklodekstrin

**Natrijev alginat** je naravni polisaharid, ki ga pridobivamo iz morskih alg in je sestavljen iz naključno porazdeljenih poliguluronatnih (poli-G) in polimanuromatnih (poli-M) polimerov in njihovih kopolimerov. Natrijev alginat je slabo topen v hladni vodi; vodna raztopina je zelo viskozna. Uporablja se kot sredstvo za hidrofilno obdelavo tekstilij.

**Bakterijska celuloza (BC)** je nanovlaknat biopolimer (slika 5.4) z unikatno kombinacijo lastnosti, kot so ultra čistost, ki izhaja iz njene 100-% celulozne kemijske sestave, visoka kristaliničnost, trdota, absorptivnost in biokompatibilnost. (S. Gorgieva, U. Jančič, E. Cepec, J. Trček, "Production efficiency and properties of bacterial cellulose membranes in a novel grape pomace hydrolysate by *Komagataeibacter melomenus* AV436<sup>T</sup> and *Komagataeibacter xylinus* LMG 1518," *International Journal of Biological Macromolecules*, let. 244, str. 125368, 2023.) BC proizvajajo gramnegativne, nepatogene bakterije, med katerimi je najbolj proučevan sev *Komagataeibacter xylinum*. Zaradi izjemne mehanske trdnosti in velike specifične površine BC njeno vključevanje v procese plemenitenja povečuje natezno trdnost tekstilnih materialov, pri tem pa tudi prispeva k izboljšanju mehkebe in udobja. Z

BC obdelane tkanine kažejo izboljšane lastnosti odvajanja vlage – boljše fiziološko ugodje. V naravni obliki BC ne daje protimikrobne zaščite, je pa zelo učinkovita kot substrat za dodajanje protimikrobnih sredstev in molekul že v fazi njene produkcije ali pozneje. Porozna struktura BC omogoča tudi učinkovito absorpcijo in zadrževanje barvil, s čimer se izboljšata obstojnost obarvanja in živahnost barvnih tonov pobarvanih tekstilij.



Slika 5.4: Morfologija BC, posneta z vrstičnim elektronskim mikroskopom

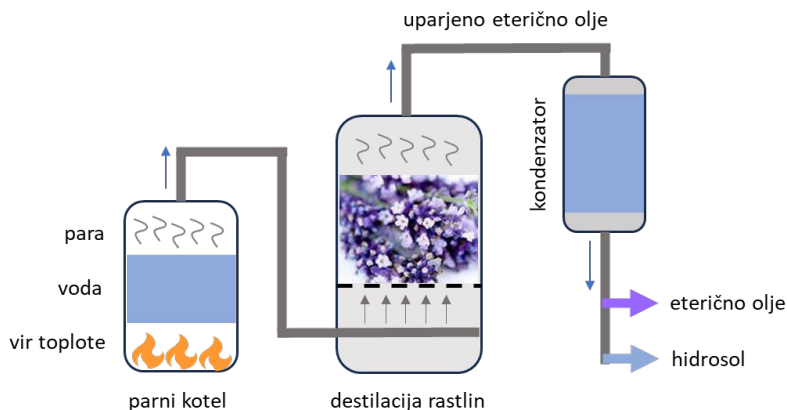
Poleg prej omenjenih se za funkcionalno plemenitenje uporabljajo tudi drugi biopolimeri, kot so sericin, pektin, sirotka, kazein, lignin itd., kot naravna sredstva za protimikrobno, ognjevarno in UV zaščitno obdelavo tekstilij.

### 5.3.2 Bioaktivne spojine rastlinskega izvora

Bioaktivne spojine rastlinskega izvora se razlikujejo po svoji strukturi in kemični sestavi. Uporabljajo se za končno obdelavo tekstilij namesto okolju nevarnih sintetičnih kemikalij za zagotavljanje protimikrobnih učinkov, kot repelenti in UV zaščitne apreture. Bioaktivne snovi, ki jih pridobivajo iz različnih delov rastlin, kot so lubje, listi, korenine in cvetovi, vsebujejo fenolne spojine, kinone, flavonoide, tanine, polisaharide in eterična olja, ki imajo odlične protimikrobne lastnosti.

Celulozne tekstilije, apretirane z **ekstrakti** iz aloe vere, zelenega čaja, bazilike, rastline *Achyranthes aspera* itd., odlično antibakterijsko delujejo proti gramnegativnim in grampozitivnim organizmom ter glivičnim patogenom.

**Eterična olja** iz rastlin, kot so nageljnova žbica, sivka, rožmarin, cimet itd., vsebujejo mešanico različnih aromatskih spojin, ki dajejo zaščito pred širokim spektrom mikrobov. Postopek parne destilacije rastlin je shematsko prikazan na sliki 5.5. Na tekstilni material se eterična olja lahko nanesejo z različnimi tehnikami (impregniranje, izčrpavanje, pršenje itd.) skupaj z zamreževalci, ki povečajo njihovo obstojnost proti pranju in drgnjenju.



Slika 5.5: Shema suhe parne destilacije eteričnega olja iz rastlin

#### 5.4 Sredstva za zamreženje

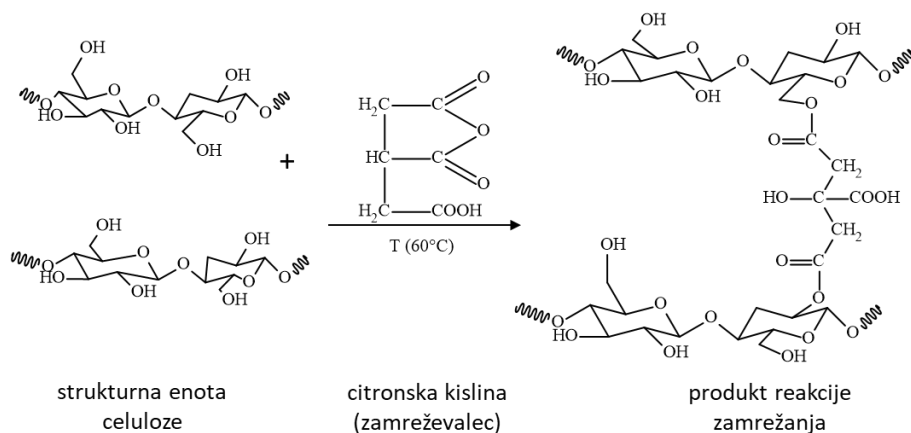
Naravna in regenerirana celulozna vlakna (viskoza) so zaradi svojih strukturnih značilnosti nagnjena k mečkanju. Predvsem regenerirana celulozna vlakna v vodnem mediju močno nabrekajo in se krčijo, kar povzroči znižanje trdnosti v mokrem. Da bi zmanjšali mečkanje in krčenje, vlakna obdelamo s sredstvi za zamreženje (zamreževalci), pri čemer se celulozne verige s kemično reakcijo medsebojno povežejo in se na ta način struktura stabilizira. Proces se imenuje zamreženje (angl.: *crosslinking*).

Glede na način vezanja lahko zamreževalce razdelimo na:

- zamreževalce, ki (samo)polimerizirajo in tako zamrežijo celulozo – pri tem nastanejo 3D zamreženi polimeri;
- zamreževalce, ki povežejo oz. zamrežijo celulozo (celulozni reaktanti) – molekule zamreževalnih sredstev, ki vsebujejo dva ali več reaktivnih

končnih skupin, tvorijo kovalentne vezi s hidroksilnimi skupinami celuloze [43].

Najpogosteje uporabljeno sredstvo za zamreženje celuloze je (modificirana) dimetiloldihidroksietilen sečnina (DMDHEU), ki je dobro odporna proti pranju, kloru in hidrolizi [40]. Slaba stran uporabe DMDHEU je, da se že med postopkom plemenitenja oz. kasneje pri uporabi sprošča formaldehid, ki negativno vpliva na zdravje ljudi in okolje. Zato v zadnjem času razvijajo zamreževalce, ki ne sproščajo formaldehida, kot so dialdehidi (gliksal in glutaraldehid), acetali, polikarbonsilne kisline (citronska kislina na sliki 5.6, 1,2,3,4-butantetrakarbonsilna kislina – BTCA), fosforna kislina in derivati silicijevega dioksida oz. silike ( $\text{SiO}_2$ ) [43].



Slika 5.6: Shema zamreženja celuloze s citrsko kislino

Poleg tega, da stabilizirajo celulozna vlakna, se sredstva za zamreženje uporabljajo tudi za povečanje obstojnosti protimikrobnih, negorljivih in vodoodbojnih sredstev pri končni obdelavi tekstilij, v zadnjih letih pa tudi za stabilizacijo biopolimerov (npr.:  $\beta$ -ciklodekstrina) in zamreženje nanodelcev.

## 5.5 Naravna barvila

Naravna barvila so obarvane spojine, ki nastajajo v celicah živega organizma. Anorganskih pigmentov po tej definiciji ne prištevamo mednje [4, 13]. Naravna barvila so biološko razgradljiva, manj toksična in redkeje vzrok alergij. Nekatera barvila imajo tudi antioksidativne in antibakterijske lastnosti.

Slaba stran teh barvil je, da so na razpolago v omejenih barvnih tonih, zagotavljajo manjšo količino barvalne komponente in slabše obstojnosti. Poleg tega barvanje z naravnimi barvili poteka v več fazah in daljši čas, za ekstrakcijo barvila je potrebna dodatna naprava, kar ima za posledico višje proizvodne stroške v primerjavi s sintetičnimi barvili.

Naravna barvila lahko delimo glede na:

- izvor: barvila živalskega, rastlinskega in bakterijskega izvora ter barvila iz večceličnih organizmov (glive),
- kemijsko strukturo: derivati kinona, indigoidna, karotenoidna, piridinska, flavonoidna, derivati dihidropirana, betalainska in taninska barvila itd.,
- metodo nanosa: jedkalna, reduktivna, direktna, kislja, bazična in disperzna,
- topnost: topna in netopna.

Postopek barvanja z naravnimi barvili poteka v treh fazah [44]:

1. **Ekstrakcija:** Naravno barvilo oz. barvno komponento je treba ekstrahirati iz naravnega vira (različni deli rastlin, insekti, školjke, glive) pred postopkom barvanja. Za to lahko uporabimo različne načine. Pri klasičnem postopku poteka ekstrakcija barvila v vreli vodi, v kislem, alkalnem ali nevtralnem pH, pri različnem kopelnem razmerju (1 : 5, 1 : 10, 1 : 20 itd.) tako dolgo, da se ekstrahira vse barvilo, kar lahko traja od nekaj ur do več dni, odvisno od vrste vira. Pogost način je tudi ekstrakcija v izbranem topilu na napravi Soxhlet. Med sodobne metode ekstrakcije spadajo: (mikro)ekstrakcija v trdni fazi, ekstrakcija v superkritični tekočini (npr.  $\text{scCO}_2$ ), tekoča ekstrakcija pod pritiskom, ekstrakcija s pomočjo mikrovalov, ekstrakcija s pomočjo površinsko aktivnih sredstev itd. [45].
2. **Barvanje:** Najpreprostejši postopek barvanja je obdelava tekstilije v ekstrakcijski kopeli barvila pri visoki temperaturi (odvisno od vrste vlakna). Čas barvanja določa ekstrahirana barvalna komponenta (barvilo) in lahko traja različno dolgo. V barvalno kopel lahko dodamo tudi  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (Glauberjeva sol), ki deluje kot egalizator in hkrati povečuje stopnjo izčrpanja. Z dodatki baz ali kislin lahko tkanine niansiramo, saj so številna naravna barvila občutljiva na pH. Za uravnavanje alkalnega medija se največ uporabljata amonijak ( $\text{NH}_4$ ) in natrijev karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) oz. soda, za kisel



medij pa oksalna, mravljična in očetna kislina. Pri barvanju bombaža je priporočljivo uporabiti taninsko kislino, ki je v lubju dreves in grmičevja.

3. **Fiksiranje barvila:** Samo nekaj naravnih barvil je substantivnih, druga je treba na vlakna vezati z uporabo anorganskih oksidov ali soli (čimž), ki z barvilom tvorijo drugače obarvan kompleks. Čimže so spojine, v katerih so prisotne kovine, npr. železov(II) sulfat(VI) ( $\text{FeSO}_4$ ), aluminijev sulfat(VI) ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), kalijev dikromat(VI) ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), kositrov(II) klorid ( $\text{SnCl}_2$ ), bakrov(II) sulfat(VI) ( $\text{CuSO}_4$ ) itd. Včasih so kot čimže uporabljali: urin, pepel, rastlinske šiške, sok divjega jabolka, stare žeblje, lonce itd. Izbira kombinacije naravnega barvila in čimže odločilno vpliva na končno barvo in obstojnost obarvanj. Tekstilne materiale lahko obdelamo s čimžami pred in med barvanjem ali po njem. Slaba stran obdelave s čimžami je visoka koncentracija kovin v odpadnih vodah. V zadnjem času se trend vrača k uporabi biološko razgradljivih čimž (biočimže) na osnovi tanina, ki jih pridobivajo iz različnih rastlin, kot so akacija, evkaliptus, tamarinda, granatno jabolko itd., in so okolju prijaznejša.

### 5.5.1 Naravna barvila iz odpadnih produktov

Vsebnost barvalne komponente pri večini virov naravnih barvil je majhen odstotek njihove skupne trdne mase (2–4 %), kar pomeni, da je za barvanje 1 kg tekstilnega materiala potrebna velika količina vira barvila [46]. To lahko privede do čezmernega izkoriščanja naravnih virov. Primer: za 1 kg rdečega barvila *Cochineal*, ki ga pridobivajo iz posušenih uši, živečih na kaktusih, je potrebnih kar 150.000 uši. Prav tako gojenje rastlin za ekstrakcijo naravnih barvil ne sme konkurirati gojenju poljščin za pridelavo hrane, saj lahko ogroža varnost preskrbe s hrano. Če bi v tekstilni industriji uporabljali izključno naravna rastlinska barvila za barvanje bombaža, bi za gojenje rastlin potrebovali ~30 % vseh svetovnih obdelovalnih površin [47].

Bolj trajnosten in okolju prijaznejši vir naravnih barvil za barvanje tekstilij so rastlinski materiali iz odpadne hrane in neužitnih **stranskih proizvodov kmetijstva in živilske industrije** (olupki, lupine, tropine, semena), **odpadki iz gozdarstva** in lesnopredelovalne industrije (odpadlo listje, lubje posekanih dreves itd.) in v zadnjem času **invazivne, tujerodne rastlinske vrste** (ambrozija, japonski dresnik, zlata rozga, rudbekija itd.), katerih širjenje povzroča ekološko in/ali gospodarsko škodo [46, 47].

Po vsem svetu se zavrže ~30 % oz. ~1,3 Gt vse hrane na leto, od tega v EU nastane približno 88 Mt odpadne hrane [48]. Največ odpada (do 60 %) predstavljata **odpadno sadje in zelenjava**, ki sta bogat vir barvalnih komponent. Za pridobivanje naravnih barvil se lahko uporabijo tudi neužitni deli sadja, kot so olupki granatnega jabolka in lupine rdeče čebule, tropine rdečega grozdja, črnih oliv, buč in paradižnika, listi evkaliptusa, lupine orehov, mandljev in arašidov, semena indiga, manga, tamarinde in žafranike, zavrženi/uporabljeni cvetovi ognjiča, korenine rabarbare, listi korenja itd. (preglednica 5.1).

**Tabela 5.1: Potencialni obseg proizvodnje naravno barvanih tkanin v EU iz najbolj obetavnih stranskih produktov, ki vsebujejo antocianine, kinone ali karotenoide za obarvanje [48]**

Naravno barvilo/vir	Količina stranskega produkta v EU (Mt)	Količina barvila (kt)	Količina stranskega produkta (kg), ki zadošča za obarvanje 1 m <sup>2</sup> tkanine		Ocenjena proizvodnja naravno barvane tkanine v EU (km <sup>2</sup> )	
			Bombaž	Volna	Bombaž	Volna
<b>Antocianini</b>						
Tropine rdečega grozdja	14,6	299	1,16	0,76	12.603	19.157
Lupine rdeče čebule	3,1	28,4	2,59	1,70	1194	1814
Tropine črnih oliv	7,4	6,1	28,62	18,83	258	393
<b>Kinoni</b>						
Zelene lupine oreha	0,086	2,0	1,03	0,68	84	127
Korenine rabarbare	0,12	0,56	0,84	0,55	148	255
Odpad fižola	0,42	0,015	115,15	75,76	3,69	5,6
<b>Karotenoidi</b>						
Tropine paradižnika	7,0	723	0,23	0,15	30.453	46.288
Lupine buč	1,0	1,1	21,16	13,92	46	70
Listi korenja	2,2	2,1	24,96	16,42	89	135

### 5.5.2 Bakterijska barvila

Bakterijski/sekundarni metaboliti so stranski produkti pri rasti bakterij ter so razmeroma nov in malo raziskan vir naravnih barvil z izjemnim potencialom za barvanje različnih tekstilnih materialov v zelo intenzivne in obstojne odtenke. Poleg barve imajo ti metaboliti pomembne dodatne lastnosti, kot so močno protimikrobno delovanje proti različnim patogenom, protirakavo delovanje, antioksidativno delovanje, UV zaščitne lastnosti itd. [49].

**Bakterijska (ali mikrobn) barvila** niso strupena in ne dražijo kože, njihova potencialna uporaba ponuja možnosti razvoja novih trajnostnih pristopov k barvanju. Barvila niso topna v vodi, po izolaciji in sušenju so v obliki prahu in se uporabljajo kot vodne suspenzije in ne raztopine [50].

Več bakterijskih sevov je sposobnih proizvajati barvila, ki tvorijo kemijske vezi s funkcionalnimi skupinami vlaken in obarvajo tekstilni material (preglednica 5.2) [49]. Te bakterije so izolirane iz različnih virov, kot so zemlja, voda, rastline, žuželke itd. Najpomembnejši rodovi bakterij, ki proizvajajo barvila, so *Serratia*, *Streptomyces* in *Pseudomonas*. Z njimi lahko dosežemo različne barvne odtenke, vključno z rožnato, rdeče oranžno, rumeno, modro, zeleno itd. Pri tem je treba upoštevati, da je mogoče z istim bakterijskim barvilom na različnih tkaninah dobiti različne odtenke. Odtенок je odvisen tudi od procesnih parametrov pri barvanju, kot so temperatura, pH in vrsta čimže.

**Tabela 5.2: Bakterije in barvila, ki jih proizvajajo, ter njihova uporaba za barvanje tekstilnih materialov [49]**

Bakterija/barvilo	Tekstilni material	Obarvanje	Sol/čimža
<i>Chromobacterium violaceum</i> UTM5/violacein	Bombaž, svila, viskoza, PES	Temno modro	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , $\text{FeSO}_4$ , $\text{CuSO}_4$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$
<i>Janthinobacterium</i> <i>lividu</i> /violacein	PA 6,6	Škrlatno	/
<i>Serratia marcescens</i> SB08/prodigiosin	Bombaž, svila	Rožnato	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
<i>Serratia</i> <i>marcescens</i> /prodigiosin	Bombaž, PA 6, PES	Rožnato	/
<i>Serratia rubidaea</i> /prodigiosin	Bombaž, volna, PES	Rožnato	$\text{FeSO}_4$ , $\text{CuSO}_4$ , $\text{NaHCO}_3$
<i>Serratia sakuensis</i> /prodigiosin	Bombaž, svila, volna	Rdeče rožnato	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
<i>Rhodonellum psychrophylum</i> GL8/prodigiosin	Bombaž, svila, viskoza	Rdeče	$\text{NaCl}$
<i>Streptomyces virginiae</i> /melanin	Volna	Svetlo rjavo	/
<i>Pseudomonas</i> <i>aureginosa</i> /piocianin	PES	Rumeno	/
<i>Serratia</i> sp. KH- 1/prodigiosin	Bombaž, volna	Rožnato	$\text{FeSO}_4$ , $\text{CuSO}_4$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
<i>Pseudomonas</i> sp. HOB1/indigo	Bombaž	Modro	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
<i>Streptomyces</i> sp. NP4/prodigiosin	Viskoza	Rdeče modro	/



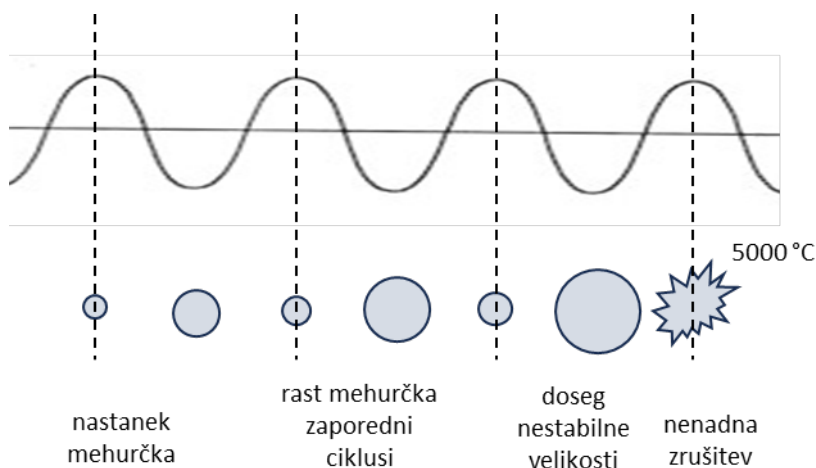
## 6 Alternativni postopki plemenitenja

Alternativni postopki plemenitenja so ekonomsko in okoljsko sprejemljivejši v primerjavi s tradicionalnimi kemijskimi (mokrimi) postopki obdelave tekstilij. Sem spadajo:

- postopki predobdelave – obdelava s plazmo, ozonom, snopom elektronov, souporaba ultrazvoka in UV sevanja, ki modificirajo površino vlaken tako, da povečajo njeno hidrofilnost in s tem omogočijo lažje in hitreje navzemanje in vezanje barvila, kemikalij in apretirnih sredstev;
- napredni postopki nanosa barvil in apretirnih sredstev – digitalni tisk in pršenje;
- specialne tehnike obdelave – obdelava z laserjem, (elektro)kemično oplaščenje in naprevanje tekstilij s kovinskimi nanodelci, s katerimi dosegamo specifične funkcionalne lastnosti tekstilnih materialov, kot so postaran videz, perforacija materiala, izdelava 3D struktur, električna prevodnost itd.

## 6.1 Souporaba ultrazvoka

Ultrazvok (UZ) je zvok s frekvenco, višjo od 20 kHz, ki ga človeško uho ne zazna [51]. Moč ultrazvoka lahko povzroči oz. pospeši številne kemijske reakcije in procese, kot so močno mešanje, dispergiranje, emulzifikacija, odzračevanje in nastanek prostih radikalov s pomočjo znanega **fenomena »kavitacije«**. Kavitacija se pojavlja pod vplivom ultrazvočnega valovanja v tekočem mediju, ki povzroči nastanek ciklov visokega in nizkega tlaka, to pa nastanek majhnih plinskih mehurčkov ali votlin (cavitas) in njihovo postopno rast ter na koncu, ko dosežejo določeno velikost, njihovo eksplozivno zrušitev (slika 6.1).



Slika 6.1: Nastanek in porušitev mehurčkov pri kavitaciji [52]

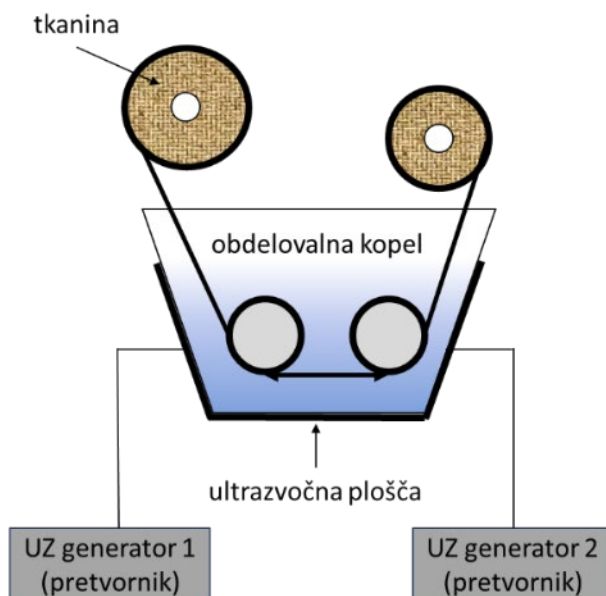
Nenadna in eksplozivna zrušitev mehurčka lahko povzroči vroče točke (angl.: *hot spots*) – lokalno visoko temperaturo, visok tlak, sunek valovanja ter s tem natančen in sunkovit pretrg določene kemične vezi. Na učinek ultrazvoka (pojav kavitacije) v tekočinah vplivajo različni parametri, kot so frekvenca ultrazvoka, viskoznost raztopine, površinska napetost raztopine, zračni tlak, plin v mehurčkih, zunanji tlak, temperatura in intenziteta ultrazvoka [52].

Ultrazvočna naprava je sestavljena iz dveh glavnih komponent: generatorja in pretvornika. Generator pretvarja izmenični tok 50–60 Hz v visokofrekvenčno električno energijo, ki se nato dovede do pretvornika, kjer se energija pretvori v mehansko vibracijo [51]. Za ustvarjanje ultrazvočnih valov se lahko uporabijo

mehanski, piezoelektrični ali magnetni pretvorniki. Sistem pretvornika vibrira vzdolžno (longitudinalno), pri čemer prenaša valove v tekoči medij. Ko se ti valovi širijo, pride do pojava drobnih votlin (kavitacij), ki je opisan v prejšnjem odstavku.

### Souporaba UZ pri postopkih predobdelave

Ultrazvočna metoda se učinkovito uporablja v različnih postopkih predobdelave naravnih in sintetičnih tekstilij, kot so razškrabljanje, izkuhavanje, beljenje, mercerizacija in pranje (slika 6.2).



Slika 6.2: Shema UZ sistema za razškrabljanje, beljenje in mercerizacijo [53]

### Souporaba UZ pri barvanju

Veliko raziskav je bilo opravljenih na temo souporabe ultrazvoka pri barvanju različnih vrst vlaken (bombaž, volna, poliester itd.) z reaktivnimi, kislimi in disperznimi barvili [51]. Pri postopkih barvanja je glavni cilj difuzija barvil (ob pomoči kemikalij in TPS) iz vodne kopeli v vlakno. UZ obsevanje kopeli povzroči večjo in bolj enakomerno razporeditev barvila na površini vlaken in zato večjo difuzijo barvila v notranjost vlaken pri nižji temperaturi in nižji koncentraciji barvila,

kemikalij in TPS kot brez uporabe ultrazvoka. Postopek souporabe UZ je mogoče enostavno implementirati v obstoječe plemenitilne postopke/naprave.

**Prednosti souporabe UZ pri plemenitenju:**

- prihranek energije zaradi nižjih temperatur in krajšega časa obdelave,
- manjša poraba barvil in kemikalij, zaradi česar se onesnaženje odpadne vode zmanjša za 20–30 %,
- povečanje produktivnosti zaradi krajšega časa obdelave [53].

Souporaba UZ pri plemenitenju tekstilij je **omejena** s:

- kinetiko reakcije – čas fiksiranja je odvisen od narave barvil in kemikalij in
- temperaturo – čeprav višja temperatura pospeši delovanje UZ, lahko previsoka temperatura poškoduje tekstilni material [42].

## 6.2 Obdelava z ozonom

Ozon ( $O_3$ ) je močan oksidant, ki je v ozračju. Lahko pa se proizvede tudi sintetično, izključno *in situ* (na kraju samem), ker je zelo reaktiven plin in ga ni mogoče shraniti ali prevažati. Napravo, ki se uporablja za obdelavo tekstilnega materiala z  $O_3$ , sestavljajo tri komponente:

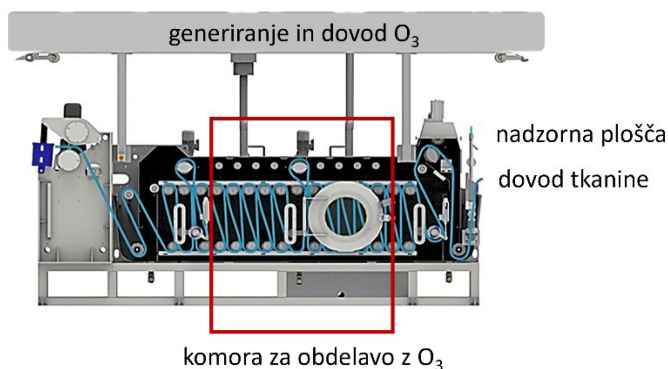
- generator  $O_3$ ,
- steklena cilindrična cevka (aplikator za nanos  $O_3$ ) in
- komponenta za razgradnjo  $O_3$  v kisik ( $O_2$ ).

Kisik se iz jeklenke pod tlakom dovaja v generator, ki zagotavlja ustrezno koncentracijo mešanice  $O_3$  in  $O_2$ . Mešanica se vodi v stekleno cilindrično cevko z razpršilcem na dnu.  $O_3$  lahko nastane fotokemično, elektrolitsko, radiokemično in s plazemsko (korona) razelektrivijo.

$O_3$  se lahko na tekstilni material nanaša kot plinasta ali pa kot vodna faza, ki je bolj praktična za mokre postopke plemenitenja. Uporaba plinaste faze zahteva posebne zrakotesne stroje z neprepustnimi tesnili zaradi škodljivega vpliva  $O_3$  na zdravje ljudi in okolje. V tekstilni industriji se  $O_3$  uporablja za obdelavo denima, predobdelavo,



barvanje in končno obdelavo bombaža, barvanje in čiščenje poliestra, obdelavo tekstilnih odpadnih vod in odstranjevanje barvil. Shema kontinuirne linije za plemenjenje tekstilij z  $O_3$  je prikazana na sliki 6.3.



Slika 6.3: Shematski prikaz plemenjenja tekstilij z  $O_3$

### Obdelava denima z $O_3$

$O_3$  se uporablja predvsem za obdelavo – peskanje denima (džinsa) namesto vulkanskega kamenja, biopoliranja z encimi ali beljenja s hipokloridom, saj se zaradi visokega oksidacijskega potenciala  $O_3$  indigo in druga barvila razgradijo (razbarvajo) brez dodajanja vode in kemikalij. Običajno se obdeluje celoten material, lahko pa se  $O_3$  z nadzorovano hitrostjo lokalno poprši po določenem delu tekstilije. Pri tem nastanejo razbarvani vzorci različnih oblik. Poleg denima se na tak način obdelujejo tudi drugi tekstilni izdelki, kot so majice, srajce, hlače in oblačila za prosti čas.

### Beljenje celuloznih vlaken z $O_3$

$O_3$  se lahko uporablja tudi za beljenje celuloznih vlaken namesto vodikovega peroksida ( $H_2O_2$ ), ki je konvencionalno belilno sredstvo, pri čemer dosegamo primerljivo belino, vendar pa se polimerizacijska stopnja celuloze nekoliko zniža (znižanje trdnosti). Oksidacijski potencial  $O_3$  je 2,07 eV,  $H_2O_2$  pa 1,77 eV. Na stopnjo beline vplivajo številni parametri, kot so koncentracija  $O_3$ , čas nanosa in kombinacija  $O_3$  z drugimi tehnologijami (ultrazvok, UV, plazma itd.).

### Poobdelava (čiščenje) poliestra z O<sub>3</sub>

Z O<sub>3</sub> je mogoča tudi poobdelava (čiščenje) poliestra (PES) po barvanju z disperznimi barvili namesto okolju škodljive reduktivne poobdelave. Poleg tega je v različnih študijah opisana uporaba O<sub>3</sub> v kombinaciji z ultrazvokom, UV, plazmo za doseganje različnih učinkov (hidrofilnost, hidrofobnost, povečana sposobnost navzemanja barvil in tiskarskih gošč itd.) na površini različnih tekstilnih materialov (celulozna, beljakovinska in sintetična vlakna).

#### Prednosti uporabe O<sub>3</sub> pri plemenitjenju tekstilij so:

- manjša poraba energije, ker postopek poteka pri sobni temperaturi,
- do 50 % manjši izpusti CO<sub>2</sub>,
- do 80 % manjša poraba vode,
- brez uporabe kemikalij,
- za obdelavo je potreben zelo kratek čas, zato je produktivnost povečana,
- ni nevarnih odpadkov zaradi razgradnje O<sub>3</sub> v kisik,
- obdelava higienskih izdelkov, kot so rjuhe, povoji, robčki, hidrofilna bombažna vata itd., zaradi dezinfekcijskih lastnosti O<sub>3</sub>,
- nižji stroški obdelave v primerjavi s konvencionalnimi mokrimi postopki plemenitjenja [54].

#### Slabosti uporabe O<sub>3</sub> pri plemenitjenju tekstilij so:

- porumenelost materiala, ki jo lahko preprečimo z naknadno obdelavo z encimi (katalaze), redukcijskim pranjem itd.,
- izguba trdnosti tekstilij zaradi neustreznega doziranja O<sub>3</sub>,
- možnost korozije kovinskih delov in poškodb plastičnih delov plemenitilnih strojev pri končnih postopkih plemenitjenja zaradi visokega oksidacijskega potenciala O<sub>3</sub>,
- visoki začetni stroški nabave naprave,
- stalen nadzor O<sub>3</sub> v okolici naprave in alarmni sistem za morebitna puščanja,
- vnetljivost in eksplozivnost O<sub>3</sub>,
- nujnost proizvodnje na kraju samem zaradi neprimernosti O<sub>3</sub> za skladiščenje.

### 6.3 Obdelava s plazmo

Plazma je četrto agregatno stanje snovi, poleg tekočega, trdnega in plinastega. Nastane pri delni ali popolni ionizaciji plinov oziroma plinske zmesi v elektromagnetnem ali električnem polju ter vsebuje nabite in nevtralne delce, kot so: elektroni, ioni, atomi, molekule, prosti radikali, vzbujene molekule in fotoni. Število prostih anionov je približno enako številu pozitivnih ionov, zato kaže plazma na zunaj nevtralen značaj. Ker so delci v plazmi (to je v ionizacijskem plinu) električno nabiti, prevaja električni tok [55].

Pri obdelavi tekstilnega materiala s plazmo izjemno aktivni plazemski radikali in elektroni trčijo ob izpostavljeno površino tekstila, kjer lahko pretrgajo kovalentne vezi in ustvarijo proste radikale. Aktivirana tekstilna površina se nato zlahka združi z vzbujenim plinom in zagotovi kemično reaktivne skupine, ki so kovalentno vezane na površino substrata. Z izbiro plina (Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), vodne pare ali kombinacije plinov je mogoče doseči želeno površinsko modifikacijo.

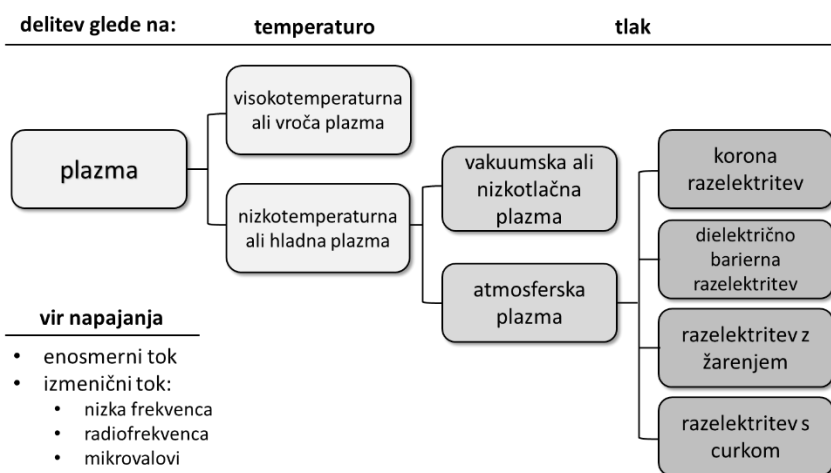
Plazma učinkuje na površino tekstilnega materiala na štiri načine:

- **čiščenje ali jedkanje** – odstranjevanje organskih nečistoč (olj in maščob) s površine za povečanje učinka nadaljnjih postopkov obdelave (barvanje, tiskanje, končno apretiranje); možna je tudi sterilizacija površine – uničevanje mikroorganizmov, kot so spore, glivice, bakterije in virusi;
- **aktivacija površine** – nastanek novih funkcionalnih skupin na površini, kot so hidroksilne (–OH) in karboksilne (–COOH) skupine;
- **pripenjanje kemijskih skupin** (aminske, karboksilne, na osnovi fluora in kisika), ki nastanejo med obdelavo s plazmo, na površino za izboljšanje adhezije in omočljivosti tkanin, pretvorbo hidrofobne površine v hidrofilno ali povečanje hidrofobnosti in/ali oljeodbojnosti;
- **polimerizacija** – monomeri v plinasti fazi, kot so ogljikovodiki (metan, etilen in acetilen), organosilicijevi monomeri (SiH<sub>4</sub> in SiCl<sub>4</sub>) ali nenasičeni fluoroogljikovodiki (C<sub>3</sub>F<sub>6</sub> in C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>), se vbrizgajo v plazmo, pri čemer se monomeri v plazmi aktivirajo in povežejo med seboj in na tekstilno površino z namenom funkcionalizacije površine tekstilnega materiala. Pri tem se, odvisno od uporabljenih monomerov in pogojev procesa, poveča hidrofobnost ali hidrofilnost tekstilije, izboljšajo se dielektrične lastnosti,

toplotna stabilnost, odpornost proti praskam, oljeodbojnost, zmanjša se trenje, poveča se sposobnost zaviranja gorenja in barierne lastnosti, odvisno od uporabljenega monomera in procesnih parametrov [56].

Površina tkanine, ki je izpostavljena delovanju plazme, se modificira fizikalno (poveča se hrapavost) in kemično. Mehanske lastnosti tkanine ostanejo nespremenjene, saj je obdelava omejena na zgornjo molekularno plast vlaken do globine nekaj 10 nm.

Plazemsko tehnologijo lahko razvrstimo glede na temperaturo, vir napajanja ali tlak (slika 6.4).



Slika 6.4: Osnovna razvrstitev plazemskih tehnologij [56]

Glede na **temperaturo** delimo plazmo na:

- **visokotemperaturno ali vročo plazmo**, ki se približa lokalnemu termodinamičnemu ravnovesju, pri čemer je temperatura elektronov lahko nad 9727 °C, plin pa je močno ioniziran. Visokotemperaturna plazma se lahko uporablja za raztapljanje ali izvedbo protikorozijske zaščite, toplotnih pregrad, premazov proti obrabi itd.;
- **nizkotemperaturno ali hladno plazmo**, ki je termodinamično neravnovesna in deluje med 0,1 in 100 Pa. Uporablja se lahko za modifikacijo površine, od preprostih topografskih sprememb do kemijskih

sprememb in nanosov, ki lahko zelo spremenijo površinske lastnosti osnovne tkanine.

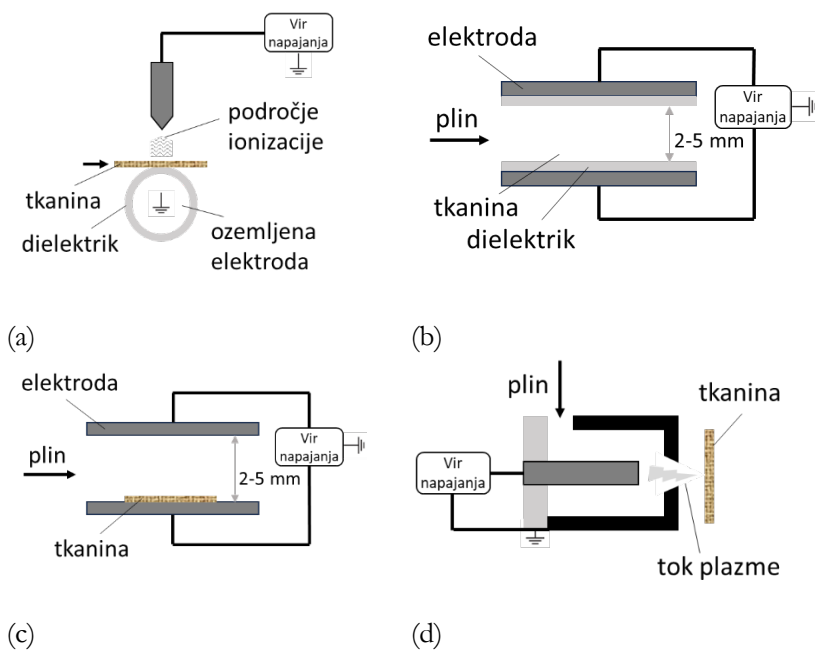
Za **proizvodnjo plazme** se lahko uporablja:

- enosmerni električni tok (angl.: *Direct Current*, DC),
- izmenični električni tok (angl.: *Alternating Current*, AC) v treh frekvencah:
  - nizka frekvenca (50–450 kHz),
  - radiofrekvenca (13,56 ali 27,12 MHz),
  - mikrovalovi (915 MHz ali 2,45 GHz).

**Nizkotemperaturno ali hladno plazmo**, ki se najpogosteje uporablja pri plemenitenju tekstilij, delimo **glede na tlak** na [55-57]:

- **vakuumsko ali nizekotlačno plazmo**, ki deluje pri tlaku  $10^{-2}$  do  $10^{-3}$  mbar, za kar se uporabljajo zaprti sistemi. S to vrsto plazme dosegamo visoko koncentracijo reaktivnih spojin, enakomernost površinske modifikacije, dobro stabilnost in ponovljivost, vendar so zaradi ohranjanja velikih posod pod vakuumom ti sistemi zelo dragi. Prav tako vakuumske plazme ni mogoče uporabljati v klasični kontinuirni proizvodnji liniji – površina, ki jo je mogoče obdelati, je omejena z dimenzijami plazemske komore;
- **atmosfersko plazmo**, ki deluje pri atmosferskem tlaku in se zato lahko uporablja za kontinuirano obdelavo tekstilnih materialov. Glede na način vzbujanja ionizacije plinov delimo atmosfersko plazmo na:
  - **korona razelektritev** (slika 6.5a) – je proces, v katerem med dvema asimetričnima elektrodama (kovinska igla in prevodna plošča ali tanka žica v kovinskem valju), ločenima z režo, ki vsebuje zrak, nastane električno polje. Tok teče od elektrode do nevtralnega plina, ki se ionizira, in nastane plazma. Sistem uporablja visoko napetost izmeničnega toka z visoko frekvenco. Sistem je lahko pozitiven ali negativen, odvisno od izhodne polaritete. Slaba stran korona razelektritve pri obdelavi tekstilije je majhen volumen plazme in točkovna razelektritev, kar vpliva na neenakomerno obdelavo površine;
  - **dielektrično barierno razelektritev** (slika 6.5b) – nastane zaradi električne razelektritve med dvema elektrodama, ločenima z izolacijsko pregrado. Sistem uporablja visoko napetost izmeničnega toka z nižjo frekvenco.

- Običajno je sistem zgrajen iz simetrično razporejenih ploščatih elektrod, ločenih z dielektrično plastjo debeline 0,1–10 mm, ki vsebuje delovni plin;
- **razelektritev z žarenjem** (slika 6.5c) – nastane, ko napetost, ki deluje na nizkotlačni plin, preseže njegovo mejno napetost in povzroči njegovo ionizacijo. Deluje v stabilnem režimu, pri nizkem toku (do nekaj deset mA);
  - **razelektritev s curkom** (slika 6.5d) – je homogena neravnovesna razelektritev pri tlaku okolice. Razelektritev je mogoče ustvariti z uporabo različnih plinov, kot so zrak, dušik, žlahtni plini in mešanice žlahtnih plinov z reaktivnimi plini. Razelektritev je mogoče ustvariti pri vseh frekvencah (od nizke frekvence do mikrovalov).



Slika 6.5: Shematski prikaz različnih obdelav z atmosfersko plazmo: (a) korona razelektritev, (b) dielektrična barierna razelektritev, (c) razelektritev z žarenjem in (d) razelektritev s curkom [57]

Na sliki 6.6 je prikazan industrijski plazemski sistem obdelave poliestra z dušikom namesto obdelave s triklorocetno kislino. Po podatkih Evropske agencije za kemikalije (ECHA) triklorocetna kislina povzroča hude opekline kože in poškodbe oči ter je zelo strupena za vodne organizme z dolgotrajnimi učinki.



Slika 6.6: Industrijska naprava Plasma Primer Coater (Coating Plasma Innovation, Francija)

**Prednosti uporabe** plazemske tehnologije so:

- enostavnost postopka,
- brez uporabe vode, kemikalij in topil,
- kratek čas obdelave, 30–40 s (hitrost obdelave je 5–50 m/min),
- brez naknadnega sušenja, kar zmanjša porabo energije v primerjavi s klasičnimi postopki plemenitenja.

#### 6.4 **Souporaba ultravijoličnega sevanja**

Ultravijolična (UV) svetloba je razdeljena na tri področja:

- UVA spekter z valovnimi dolžinami 315–400 nm,
- UVB spekter z valovnimi dolžinami 280–315 nm in
- UVC spekter z valovnimi dolžinami 100–280 nm [12].

Dolgotrajna izpostavljenost UV sevanju krajših valovnih dolžin običajno negativno vpliva na organske spojine (krajša je valovna dolžina, bolj energetsko intenzivno je UV sevanje), saj lahko povzroča prekinitev kemične vezi in s tem spremembo mehanskih in optičnih lastnosti tekstilnih materialov [1, 58]. Ob kontroliranih pogojih UV sevanje deluje na tekstilni material na različne načine, kot so

dezinfekcija, čiščenje, pripenjanje, fotozamreženje, fotopolimerizacija, fiksiranje itd. Pri tekstilnem plemenitju se UV sevanje lahko uporablja v postopkih predobdelave, barvanja, tiskanja ali končne obdelave, pri čemer je mogoče doseči specifično površinsko modifikacijo. UV obsevanje skupaj z blago oksidacijo lahko izboljša nekatere lastnosti bombažnih in volnenih vlaken, kot so odpornost proti pilingu, nabrekanje v vodi in sposobnost obarvanja.

### **Prednosti UV obdelave so:**

- enostavna aplikacija, ki ne potrebuje drage in sofisticirane opreme,
- trajnost in obstojnost obdelave,
- nizka poraba energije,
- do okolja prijazna tehnologija.

### **Beljenje celuloznih vlaken s $H_2O_2$ /UV**

Pri beljenju celuloznih vlaken UV deluje kot katalizator za razgradnjo  $H_2O_2$  (oksidacija) [12, 59]. Pri izpostavljenosti svetlobi kratkih (254 nm – UVC) in srednjih (312 nm – UVB) valovnih dolžin v nevtralnem ali rahlo alkalnem mediju  $H_2O_2$  razpade v dva zelo reaktivna hidroksilna radikala ( $\cdot OH$ ), ki hitro in enostavno oksidirata različne obarvane organske spojine, kot so ostanki lignina in naravni pigmenti (beljenje celuloznih vlaken), pri čemer dosegamo primerljive beline kot pri beljenju samo s  $H_2O_2$ .

Prednost postopka beljenja z UV/ $H_2O_2$  v primerjavi s klasičnim postopkom s  $H_2O_2$  je obdelava pri sobni temperaturi, kar bistveno zmanjša porabo energije in s tem ogljični odtis. Slaba stran uporabe UV je, da prosti radikali lahko razgradijo tudi vezi v glavni celulozni verigi, kar vpliva na znižanje trdnosti tekstilnega materiala.

### **Predobdelava in poobdelava bombaža z UV**

Predobdelava bombaža z UV in naknadno barvanje izboljša sposobnost navzemanja reaktivnih in naravnih barvil (večja jakost barvila) ter poveča obstojnost barvil na tkanini [58]. Posledično se zmanjša poraba barvil in kemikalij ter obarvanje odpadnih vod.



Pri naknadni obdelavi obarvanih bombažnih tkanin z UV svetlobo (lahko tudi v obliki vzorca) pa pride do bledenja barve – efekt različnega obarvanja površine.

### **Tiskanje s souporabo UV svetlobe**

Pri tiskanju s pomočjo UV svetlobe tiskarska pasta vključuje spojino, ki je občutljiva za UV svetlobo [60]. Pri nanosu na material s pomočjo šablonskega tiska se odtisne vzorec, ki je neobarvan, po obsevanju z UV svetlobo pa se njegova barva razvije.

### **Končna obdelava s souporabo UV svetlobe**

S površinsko obdelavo bombažnih tkanin z ustreznimi kemikalijami s souporabo UV svetlobe za fiksiranje in pripenjanje lahko dosežemo olje- in/ali vodoodbojne lastnosti tekstilnega materiala [58, 60]. Prav tako se lahko UV obsevanje uporablja skupaj s hitozanom za zagotavljanje proti pranju odporne protimikrobne obdelave tudi pri nizki koncentraciji hitozana.

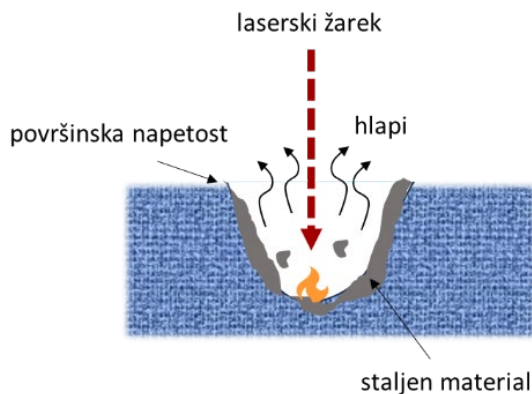
## **6.5 Obdelava z laserjem**

Laser (ime izhaja iz angleškega akronima LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, torej »ojačanje svetlobe s spodbujenim sevanjem«) je naprava, ki za vir energije uporablja pojav stimuliranega sevanja (emisije) in ojačanja svetlobnega sevanja. Laser oddaja intenziven žarek svetlobe (elektromagnetno valovanje), ki ima naslednje značilnosti: veliko intenziteto, pravilno porazdelitev intenzitete po preseku žarka, majhno divergenco, koherentnost in značilno valovno dolžino. Ko žarek zadene površino tekstilnega materiala, se visoko intenzivna svetloba absorbira in pretvori v toploto, ki modificira površino tekstilije.

Pri plemenitenu tekstilnih izdelkov se laserska tehnologija uporablja za:

- **obdelavo denima** namesto peskanja z vulkanskim kamenjem, biopoliranja z encimi ali beljenja s hipokloritom; laserski žarek odstrani tanko plast indigo barvila s površine materiala (slika 6.7) v obliki določenega vzorca (s pomočjo strojnega krmiljenja) brez prisotnosti vode in kemikalij – dobimo videz ponošenega džinsa. Običajno se obdeluje že izdelano oblačilo (npr.: hlače);

- **predobdelavo (aktivacijo površine)** – nastanek novih hidrofilnih skupin ( $-OH$  in  $-COOH$ ) na površini hidrofobnih sintetičnih vlaken (PES, PA, PP), zaradi česar se poveča njihova sposobnost omakanja in s tem navzemanje barvila in apretirnih sredstev;
- **barvanje in tiskanje** – modificiranje barv glede na vzorec;
- **graviranje** – odstranjevanje materiala do določene globine (vtiskovanje vzorca) z nadzorovanjem moči  $CO_2$  laserskega žarka za doseganje kontrasta ali za izvedbo svetlobnega jedkanja obarvanega materiala;
- **perforacijo** – luknjanje tekstilnega materiala z nizom luknjic v določenem vzorcu in velikosti (npr.: perforirana zgornja plast športne obutve), s čimer dosežemo prezračevalne lastnosti ali edinstvene dekorativne učinke končnega izdelka;
- **izdelavo površinske teksture in 3D učinkov na tekstilu** – spremenita se videz in oblika tekstilije, poleg tega pa se lahko izboljšajo funkcionalne lastnosti tekstilije, kot so izolacija, absorpcija, kompresija itd. 3D površinske učinke s pomočjo laserja lahko uvedemo v postopke plemenitenja, kot so devoré obdelava, kosmatenje in polstenje volne [61].



Slika 6.7: Shematski prikaz laserske obdelave denima

**Prednosti uporabe laserja** v primerjavi s konvencionalnimi tehnologijami:

- do 67 % manjša poraba vode,
- brez uporabe kemikalij,
- do 62 % manjša poraba energije,

- ni potrebe po večkratnem pranju,
- manjša količina odpadne vode,
- manjši proizvodni stroški,
- možnost izdelave manjših serij/kolekcij – proizvodnja na zahtevo (angl.: *on-demand*),
- za obdelavo je potreben kratek čas, zato je povečana produktivnost.

**Pomanjkljivosti laserske tehnologije**, ki preprečujejo njeno praktično uporabo:

- zelo visoki začetni stroški nabave laserske naprave,
- potrebni so usposobljeni operaterji strojev in oblikovalci,
- pogosto je po laserski obdelavi treba ročno popraviti videz peskanega vzorca, da se ustvari bolj naraven videz, kar podraži in upočasni izdelavo končnega produkta.

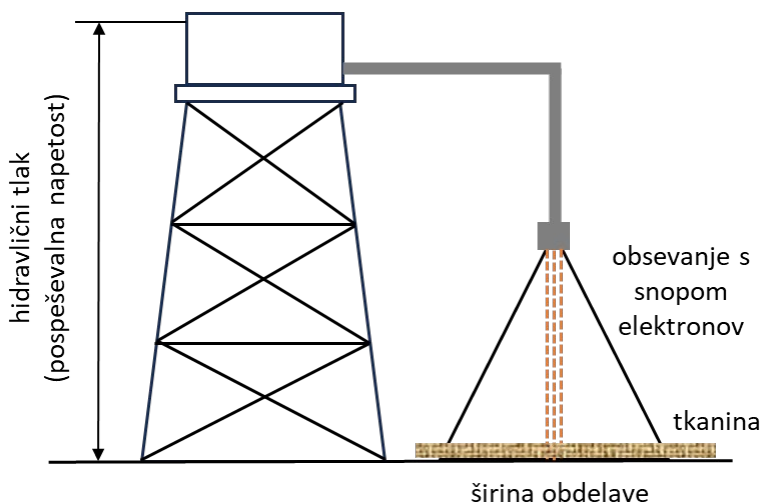
## 6.6 Obsevanje s snopom elektronov

Obsevanje s snopom (žarkom) elektronov (angl.: *Electron Beam Irradiation*, EBI) je novejši postopek površinske obdelave tekstilnih materialov (slika 6.8) za spreminjanje njihovih kemijskih in fizikalnih lastnosti ter izboljšanje kakovosti izdelka. Poleg tega se EBI pogosto uporablja za strjevanje polimerov in kompozitov, modifikacijo polimerov, čiščenje vode, sterilizacijo medicinskih pripomočkov, v prehranski industriji itd.

Postopek je razdeljen na tri faze:

1. **fizikalna faza**, v kateri pospešeni (primarni) elektroni oz. snop elektronov prenašajo svojo energijo na površino tekstilnega materiala, kar povzroči nastanek reaktivnih spojin (vzbujena stanja, ioni in sekundarni elektroni),
2. **fizikalno-kemijska faza**, v kateri se novonastale reaktivne spojine pretvorijo v polimerne radikale, in
3. **kemijska faza**, v kateri lahko nastali polimerni radikali sprožijo vrsto reakcij na površini tekstilnega materiala, kot so zamreženje, pripenjanje monomerov, radikalska polimerizacija in degradacija polimernih verig; na tak način polimerni radikali učinkovito modificirajo površino tekstilije in tako izboljšajo hidrofилnost, absorpcijo in obstojnost barvil, adhezijo

apretirnih sredstev itd., odvisno od surovinske sestave tekstilnega materiala (PES, PP, PA, bombaž itd.) in procesnih parametrov (čas, doza obsevanja, temperatura) [63].



Slika 6.8: Shema obsevanja tkanine s snopom elektronov [63]

Sistem za obsevanje s snopom elektronov je sestavljen iz:

1. napajalne enote za proizvodnjo enosmernega toka visoke napetosti,
2. pospeševalnika za proizvodnjo in pospeševanje elektronov; za modificiranje tekstilnih površin se uporabljajo večinoma nizkoenergijski pospeševalniki elektronov (od 0,15 do 0,5 MeV),
3. okna v ustrezni širini za obsevanje s pospešenimi elektroni,
4. vakuumske naprave, ki vzdržuje enako količino pospeševanja elektronov, in
5. krmilne enote za upravljanje in krmiljenje celotnega sistema [63].

V primerjavi s konvencionalnimi tehnologijami plemenitenja, ki za površinsko modifikacijo uporabljajo velike količine vode, močne alkalije, kisline in tekstilna pomožna sredstva, so **prednosti obsevanja z elektronskim žarkom**:

- okolju prijaznejša tehnologija brez kemikalij,
- nizka poraba energije,
- enostavnost delovanja,
- hitra obdelava.

## 6.7 Nanos s pršenjem

Obdelava s pršenjem je enostavna metoda brezstičnega nanosa tanke plasti apretirnega sredstva (v obliki kapljic) na površino tekstilnega materiala [40, 64]. Brezstični nanos preprečuje, da bi se vlakna, delci ali pigmenti prenesli s površine materiala v apreturino kopel, ki jo je zato mogoče ponovno uporabiti za obdelavo naslednje tkanine, odvisno od kemične stabilnosti apreture.

Postopek zagotavlja prilagodljivost v smislu nanašanja na točno določeno lokacijo, enostavno vzdrževanje in visoko stopnjo enakomernosti zaradi enotne velikosti kapljic [65]. Poleg tega sistem omogoča pršenje mokro na mokro (brez vmesnega sušenja) in pršenje na eno ali obe strani tkanine z enako ali različno apreturo. S to tehniko je mogoče nanesti različne vrste funkcionalnih apretur, kot so protimikrobna, vodoodbojna in ognjevarna apretura, trdilna in mehčalna sredstva itd.

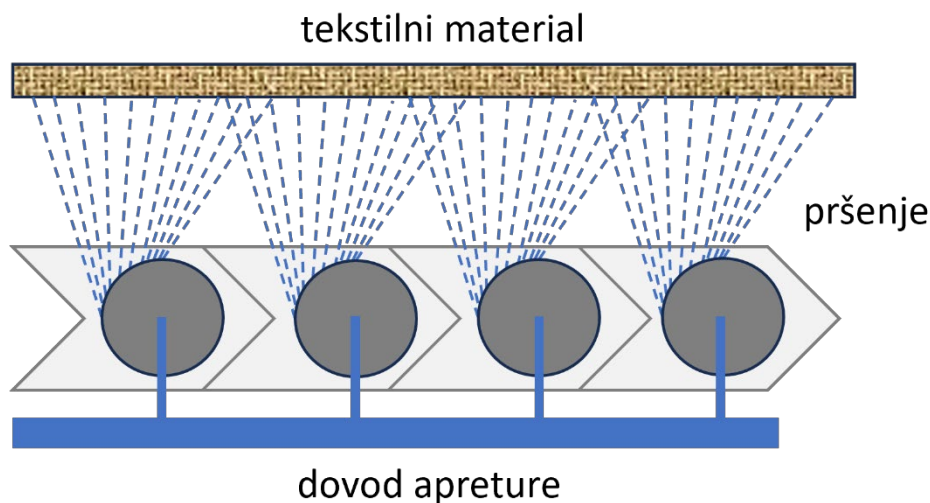
**Prednosti pršenja** v primerjavi s konvencionalnimi tehnologijami:

- zaradi minimalnega nanosa apreture se porabi manjša količina vode,
- do 60 % manjša poraba kemikalij,
- do 70 % manjša poraba energije za sušenje v primerjavi s klasičnim postopkom impregniranja na foulardu [65].

Obstajajo različne tehnike in sistemi pršenja [66]. Najbolj pogosti pršilni sistemi delujejo na stisnjen zrak. Zaradi velike hitrosti zraka, ki prehaja skozi tok tekočine (apreture) z nizko hitrostjo, nastane trenje, pri čemer se oblikujejo drobne kapljice apreture za nanos na površino tkanine. Ta tehnika daje dobro kakovost končne obdelave pri velikih hitrostih in lahko učinkovito in enakomerno pokrije površino nehomogene tekstilije. Za zagotavljanje enakomernega nanosa je treba pripraviti stabilno suspenzijo apreture z ustrezno viskoznostjo in nadzorovati parametre atomizacije pripravljene suspenzije. V primeru preveč viskozne suspenzije (nizka temperatura ali visoka koncentracija apreture) lahko pride do težav pri oblikovanju finih kapljic oz. do zamašitve šob za pršenje.

Sistemi nanosa s pršenjem so lahko odprti ali zaprti. V zaprti komori so razmere nadzorovane (določen tlak, idealna temperatura, pretok zraka in vlažnost), omogočeno je odvajanje hlapnih substanc in prašnih delcev, zaradi česar se zmanjša onesnaženje zraka.

Na sliki 6.9 je shematsko prikazan detajl za brezstični nanos apretur s pršenjem na industrijski napravi [65]. Princip delovanja naprave temelji na natančnem doziranju apreturne kopeli na hitro rotirajoče diske. Pri tem se oblikujejo drobne (mikro) kapljice apreture, ki zaradi nastavljivih drsnikov enakomerno omočijo celotno površino tekstilije. Količina nanosa je nadzorovana z nastavljivo hitrostjo vrtenja diskov. Posebna prednost naprave je tudi preprosta zamenjava različnih apretur z vgrajenim avtomatskim čiščenjem in spiranjem.



Slika 6.9: Detajl pršenja na industrijski napravi za brezstični površinski nanos apretur

## 6.8 (Elektro)kemični postopki nanosa kovin

(Elektro)kemični postopki nanosa kovin na tekstilni material (metalizacija), kamor spadata brezelektrično oplasčenje in elektrokemično oplasčenje tekstilij, so novejši postopki plemenitenja tekstilij za doseganje funkcionalnih lastnosti, kot so električna prevodnost za e-tekstilije (pametne tekstilije), zaščita pred elektromagnetnim sevanjem in radijskimi valovi, antimikrobne lastnosti itd. [67]. Ti dve tehniki se

uporabljata predvsem za izdelavo tiskanega vezja (angl.: *Printed Circuit Board*, PCB) oz. elektronskega sklopa, ki ponuja mehansko podporo in električno povezavo elektronskih komponent preko bakrenega prevodnika.

Podjetja, kot so Shieldex-Stratex GmbH (Bremen, Nemčija) [68], Nano3D Systems LLC (Corvallis, OR, ZDA) [69], Soliani EMC (Como, Italija) [70], Faraday Defense (Kalamazoo, MI, ZDA) [71] itd., proizvajajo raznovrstne metalizirane tekstilije po (elektro)kemičnih postopkih za različna področja: medicino, vojsko, gradbeništvo, letalsko in avtomobilsko industrijo, šport in prosti čas (zaščitna in pametna oblačila) itd.

### 6.8.1 Brezelektrično opllašanje

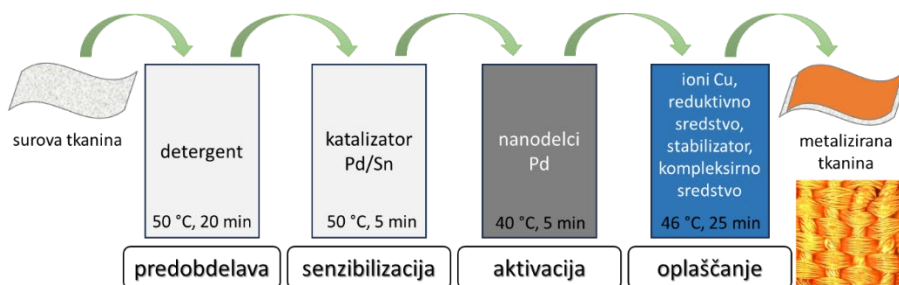
Brezelektrično opllašanje (angl.: *electroless plating*) je postopek, pri katerem iz vodne raztopine kemično (brez uporabe zunanega električnega toka) na površino elektroneprevodnih materialov (tiskana vezja, steklo, plastika, keramika in tekstil) nanesemo posamezne kovinske nanodelce, kot so baker (Cu), srebro (Ag), nikelj (Ni), zlato (Au), platina (Pt) in paladij (Pd), ali polzlitine, kot so nikelj-volfram (Ni-W), baker-nikelj (Cu-Ni) itd., pri čemer se na površini obdelanih materialov tvori tanka kovinska, elektroprevodna plast [72].

Nanodelci Au, Pt in Pd zagotavljajo visoko električno prevodnost, vendar so precej dragi in se redkeje uporabljajo za oplasčenje tekstilij [67]. Najpogosteje se za brezelektrično oplasčenje tekstilij uporabljajo nanodelci Cu, Ag in Ni. Cu je sorazmerno poceni in enostaven za uporabo, zagotavlja visoko električno prevodnost, enakomerno debelino oplasčanja, ima dobre fizikalne in mehanske lastnosti. Slaba stran nanosa Cu je, da sčasoma oksidira (pod vplivom vode, znoja, visokih temperatur) in s tem izgubi elektroprevodne lastnosti, kar lahko preprečimo z nanosom tanke plasti zaščitnega hidrofobnega sloja (npr.: silike). Ag zagotavlja visoko električno prevodnost, biokompatibilnost, stabilnost in antibakterijske lastnosti, vendar je pred brezelektričnim Ag oplasčanjem treba modificirati površino tekstilnega materiala s sredstvi, ki izboljšajo vezavo med delci Ag in tekstilijo. Ni ima dobre elektroprevodne in magnetne lastnosti, odlično odpornost proti koroziji in obrabi, enostavno ga enakomerno nanesemo itd. Ker pa lahko povzroči alergijski kontaktni dermatitis, ni primeren za aplikacije, ki so v tesnem stiku s kožo.

Postopek brezelektričnega oplaščenja lahko poteka po celotni površini tekstilije ali v obliki kompleksnega vzorca za izdelavo fleksibilnega elektronskega vezja, senzorja tlaka, temperature, senzorja za nadzor gibanja ali hidracije, monitorja srčnega utripa itd. na tekstilijah za oblačila, pohištvo, obutev itd.

Celoten postopek brezelektričnega oplaščenja je sestavljen iz štirih povezanih faz z vmesnim in končnim izpiranjem ter sušenjem (slika 6.10):

1. **predobdelava** (čiščenje površine) – poteka v vodni raztopini z uporabo neionskega detergenta, pri temperaturi 40–90 °C, 10–40 minut, odvisno od vrste tekstilije;
2. **senzibilizacija** površine – obdelava površine (omakanje) s katalizatorjem, najpogosteje s koloidno raztopino Pd/Sn ali raztopino kositrovega klorida ( $\text{SnCl}_2$ );
3. **aktivacija** površine – obdelava površine z nanodelci, kot so Ag, Au in Pd, ali njihovimi mešanici;
4. **brezelektrično oplaščenje** – obdelava tkanine v kopeli, ki vsebuje vir kovinskih ionov (kovinske soli  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$  itd.), redukcijsko sredstvo, kompleksirno sredstvo, stabilizator, pufer in površinsko aktivno sredstvo. Redukcijsko sredstvo je potrebno za pretvorbo kovinskih ionov v raztopini elektrolita v kovinske atome na tekstiliji. Ta katalitična redoks reakcija poteka v alkalnem mediju. Rezultat je enakomerno oplaščenje tekstilije s tankim slojem kovine, ki ovije celotno površino posameznega vlakna [67, 72].



Slika 6.10: Shematski primer postopka brezelektričnega oplaščenja tekstilij s Cu ioni [72]



Najpogosteje uporabljeno redukcijsko sredstvo pri postopku brezelektričnega oplaščenja je formaldehid zaradi nizke cene, visoke učinkovitosti in enostavne uporabe [67]. Zaradi toksičnosti formaldehida in nastajanja nevarnih plinastih produktov (VOC) med postopkom oplaščenja se v zadnjem času laboratorijsko preizkušajo okolju prijaznejša reductivna sredstva, kot so amin-boran, dimetilamin-boran, natrijev borohidrid, hidrazin hidrat, glioksilna (oksoocetna) kislina, glukoza itd.

**Prednosti brezelektričnega oplaščenja** v primerjavi z drugimi tehnikami metalizacije, ki se uporabljajo na tekstilnih površinah, kot so nanašanje kovinskih delcev in situ, brizganje s plamenom in oblokom, naparevanje in vakuumsko nanašanje, so naslednje:

- doseganje boljše prevodnosti obdelanih tekstilij,
- trajnost nanosenih kovinskih delcev,
- večja enakomernost nanosenih kovinskih delcev,
- industrijska izvedljivost postopka,
- razmeroma nizki stroški postopka,
- nizka temperatura obdelave [67].

Poleg naštetih prednosti se postopek lahko izvaja na različnih vrstah in oblikah tekstilnih materialov.

Pomanjkljivost brezelektričnega postopka oplaščenja je, da je treba kopel, ki vsebuje vir kovinskih ionov, neprekinjeno nadzorovati, saj mora biti koncentracija kovinskih ionov v njej ves čas oplaščenja tekstilije dovolj visoka, da zagotovimo enakomeren nanos kovinske (elektroprevodne) plasti.

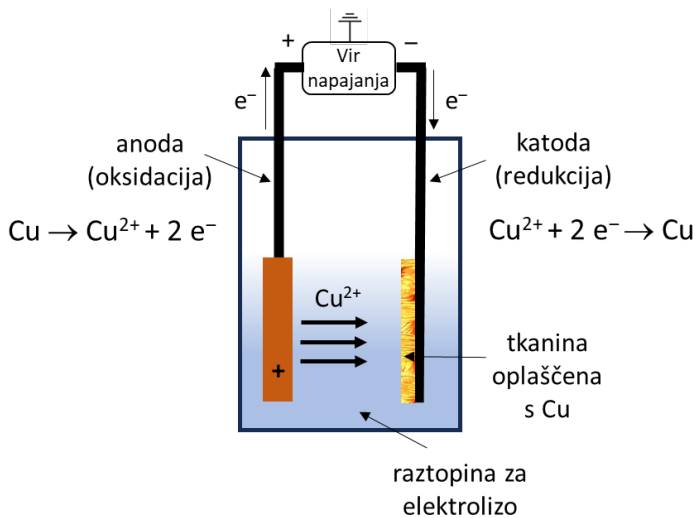
### 6.8.2 Elektrokemično oplaščenje

Elektrokemično oplaščenje ali galvanizacija (angl.: *electrochemical deposition* ali *electroplating*) je postopek, pri katerem iz raztopine kovinskih soli na površino električno prevodnih materialov (prevoden tekstil) nanese kovinske ione ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  itd.) s pomočjo enosmernega električnega toka, pri čemer se na površini obdelanih materialov tvori obstojna elektroprevodna plast oz. film [67].

Sistem (elektrokemična celica) je sestavljen iz treh elektrod (slika 6.11):

- referenčne elektrode,
- nasprotne elektrode in
- delovne elektrode (prevodna tkanina) [73].

Zunanji napajalnik zagotavlja električni tok. Ko skozi raztopino kovinskih soli steče zadosten tok, se kovinski ioni reducirajo na delovni elektrodi v obliki tanke kovinske plasti. Pred elektrokemično obdelavo je treba tekstilijo očistiti, da se odstranijo nečistoče in se kovinski ioni lažje ter enakomerneje nanesejo na površino.



Slika 6.11: Shematski prikaz elektrokemičnega opláščanja s Cu [73]

**Prednosti elektrokemičnega opláščanja** v primerjavi z drugimi tehnikami metalizacije:

- nadzorovano prilagajanje debeline in morfologije s spreminjanjem procesnih parametrov, kot so koncentracija in sestava elektrolita, čas nanašanja, jakost uporabljenega toka itd.,
- razmeroma nizki stroški postopka,
- enostavnost postopka,
- obstojnost nanesenih kovinskih delcev [67].

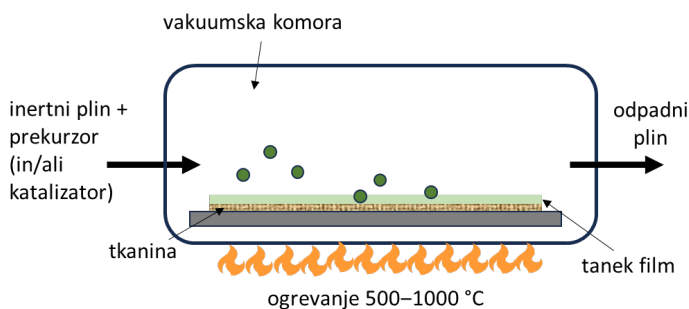
Glavna pomanjkljivost elektrokemičnega oplaščenja s kovinami je, da mora biti material, ki ga želimo obdelati, električno prevoden, sicer električni tok ne more teči [67]. Ker tekstil običajno deluje kot naravni izolator, ga je pred postopkom elektrokemičnega oplaščenja treba predobdelati na način, da postane električno prevoden. To lahko dosežemo z nanosom kovinskih nanodelcev (Ag, Cu, Ni itd.) in kovinskih oksidov (ZnO), prevodnih polimerov (poliakrilnitril – PANI, polipirol – PPy itd.) ali materialov na osnovi ogljika (grafen, ogljikove nanocevke itd.).

## 6.9 Napreovanje

Napreovanje (angl.: *Vapour Deposition*, VD) je novejši postopek plemenitjenja tekstilij za doseganje funkcionalnih lastnosti, kot so električna prevodnost za e-tekstilije (pametne tekstilije), hidrofobnost, odpornost proti oljem in madežem, odboj toplote, antimikrobne lastnosti, UV zaščitne lastnosti, zaščita pred elektromagnetnim sevanjem itd. Postopek je kombinacija izhlapevanja in pršenja [67]. Kot prekursor za nanos na tekstilije se lahko uporabljajo skoraj vse vrste anorganskih materialov (kovine, zlitine, spojine in zmesi) in nekatere organske spojine. Pri postopku se prekursor v vakuumu upari in kondenzira na tekstilijo brez uporabe topil, pri čemer se na površini tekstilije tvori tanek film.

### 6.9.1 Kemično napreovanje

Kemično napreovanje (angl.: *Chemical Vapour Deposition*, CVD) je metoda vakuumskega nanašanja enega ali več prekursorjev v plinasti fazi na površino ogretega substrata (tekstilije), pri čemer se zaradi kemijske reakcije na površini substrata tvori tanek sloj filma (slika 6.12) [67]. Pri tem pogosto nastajajo tudi hlapni stranski produkti, ki se odstranijo s pretokom plina skozi reakcijsko komoro.



Slika 6.12: Shematski prikaz CVD postopka obdelave tekstilije [74]

Poznamo različne tehnike CVD:

- CVD pri atmosferskem tlaku,
- CVD pri nizkem tlaku,
- CVD organokovinskih spojin,
- laserski CVD,
- fotokemični CVD,
- CVD v kombinaciji s plazmo (PE-CVD) [74].

Postopek CVD sestavljajo naslednje faze:

- transport molekul prekursorja v reaktor,
- difuzija prekursorja do površine tkanine,
- adsorpcija prekursorja na površini,
- reakcija na površini: razpad molekul prekursorja na površini in vključitev v trdno plast,
- rekombinacija molekularnih stranskih produktov in desorpcija v plinasto fazo [75].

Reaktorji so lahko vodoravni ali navpični, odvisno od smeri plina glede na položaj tekstilije, ki se obdeluje. Ko plini prekursorja tečejo po površini ogretega tekstilnega materiala v reaktorju, nastala kemijska reakcija tvori trdno fazo, ki se nanese na tekstilni material v obliki tankega filma ( $\sim 1000 \mu\text{m}$ ), pri čemer temperatura pomembno vpliva na proces reakcije.

### 6.9.2 Fizikalno naparevanje

Postopek fizikalnega naparevanja (angl.: *Physical Vapour Deposition*, PVD) je v nekaterih pogledih podoben CVD, le da je pri PVD prekursor, tj. material, ki ga je treba nanesti na tekstilno površino, v trdni obliki, medtem ko se pri CVD prekursorji v reakcijsko komoro vnesejo v plinasti obliki [74].

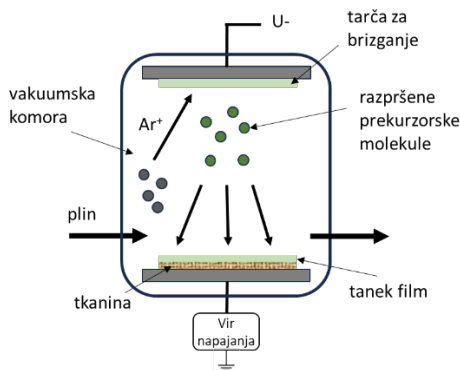
Postopek PVD je sestavljen iz treh korakov:

- generiranje hlapov prekuzorskih molekul (hlapi čistih kovin in njihove zlitine),
- transport ioniziranih ali nevtralnih hlapov do površine tekstilnega materiala,
- kondenzacija hlapov prekuzorja na tekstilnem materialu in tvorjenje tankega filma na površini ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) [75].

Poznamo različne tehnike PVD:

- napajanje s katodnim oblokom,
- PVD z elektronskim žarkom,
- napajanje z izhlapevanjem,
- impulzno lasersko napajanje in
- napajanje z brizganjem: magnetronsko brizganje, brizganje z enosmernim tokom, brizganje z radijsko frekvenco in reaktivno brizganje [67, 75].

Med omenjenimi postopki je napajanje z **magnetronskim brizganjem** (slika 6.13) najpogosteje uporabljen postopek za nanašanje tanke plasti kovin (Cu, Ti, Ag, Al, W, Ni, Sn, Pt), kovinskih oksidov ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ , ZnO) in nekovinskih spojin (Si, grafit, keramika) na različne vrste in oblike tekstilnih materialov [76]. Poleg tega je s pomočjo magnetronskega brizganja mogoče tekstilijo po celotni površini enakomerno obarvati v različnih (kovinskih) odtenkih, vključno z zlato, bronasto, antracitno, črno itd.



Slika 6.13: Shematski prikaz napajanja tekstilije z brizganjem [76].

**Prednosti postopka PVD** v primerjavi s konvencionalnimi tehnologijami:

- visoka učinkovitost in do okolja prijazen postopek,
- uporaba prekurzorjev v obliki čistih plinov in kovin namesto dragih, kompleksnih in običajno strupenih kemičnih spojin,
- možnost izdelave različnih kompozitnih slojev (multipleksna tehnologija),
- neomejene možnosti na področju izdelave oplaščenih materialov z nanosom različnih prekurzorjev, pri čemer dobimo različne lastnosti premazov; fizikalno-mehanske, kemijske in funkcionalne (toplotne, antibakterijske, protikorozijske, elektroprevodne, itd.) [67, 76].

Glavna **pomanjkljivost metode PVD** je nezadostno vezanje (adhezija) nanosenih plasti zaradi nehomogenosti tekstilne površine, kar lahko povzroči neenakomernost v funkcionalnih lastnostih na večjih površinah – nihanja v električni prevodnosti [67].

Podjetje AGC Plasma Technology Solutions (Charleroi, Belgija) [77] je proizvajalec opreme za plemenjenje tekstilij s tehnikama PE-CVD in PVD z magnetronskim brizganjem za doseganje oljeodbojnega učinka, hidrofilnosti/hidrofobnosti in električne prevodnosti. Njihovi sistemi za diskontinuirano in kontinuirano širinsko obdelavo omogočajo naparevanje prekurzorja s hitrostjo od 0,1 do 10 m/min in enakomernost nanosa do širine tekstilije 3,2 m.

## 6.10 Digitalni tisk

Digitalni tisk tekstilij se je pojavil v 90. letih za izdelavo prototipov in tiskanje majhnih serij. Od takrat se je tehnologija hitro razvijala [78]. Pri digitalnem tisku gre za brezkontaktno tehnologijo, ki deluje podobno kot tiskalnik za papir. To omogoča hitro odzivnost in veliko prilagodljivosti predvsem pri vzorčenju.

Odtis (barva in oblika vzorca) na tekstilu se določi s pomočjo računalnika, kar se digitalno prenese na napravo. Črnilo se v obliki kapljic štirih barvil (angl.: *Cyan-Magenta-Yellow-Key(Black)*, CMYK) preko šob prenese na tekstilni material, kjer se ustvari slika. Več kapljic ene barve je ena »pika« (angl.: *dot per inch*, dpi) oz. resolucija. Rastrski program postavi te kapljice drugo na drugo ali drugo poleg druge, odvisno od odtenka, jakosti odtisa in oblike vzorca. Hranjenje in arhiviranje osnovnih

predlog dezenov ne zahtevata velikih odlagalnih skladiščnih površin, saj so podatki shranjeni na nosilcu podatkov v digitalni obliki.

Novejši digitalni tiskalniki so predvsem hitrejši (slika 6.14) [79]. Večje hitrosti dosegajo z uporabo večjega števila tiskalnih glav z večjim številom šob. Hitrosti tiskanja že presegajo 1000 m<sup>2</sup>/h ter so tako po hitrosti povsem konkurenčni klasičnim filmskim ploskim in rotacijskim avtomatskim tiskalnikom. Resolucije tiskanja pa so do 1440 dpi.



**Slika 6.14: Kontinuirna linija postopka digitalnega tiska preprog - tiskanje, sušenje, pranje, sušenje**

Brizgalni tiskalniki se delijo na dve glavni skupini:

1. tiskalniki s kontinuirnim curkom in
2. impulzni (angl.: *drop-on-demand*) tiskalniki [78].

Ključni komponenti, ki določata delovanje tiskalnika, sta vrsta in število tiskalnih glav v napravi. Od tega so odvisne produktivnost, zanesljivost, kakovost in cena tiskalnika. Hitrost tiskanja je odvisna tudi od zahtevane natančnosti tiskanja (resolucije), sestave in konstrukcije materiala, ki ga tiskamo, vrste črnila, pa tudi od dobre priprave blaga na tisk in vzdrževanja strojev, da med tiskanjem ni zastojev.

Za digitalni tisk se uporabljajo predvsem reaktivna barvila (bombaž in viskoza), kislila barvila (volna in poliamid), disperzna in substantivna barvila (poliester), redkeje reduktivna barvila in pigmenti (na tiskalnikih z manjšimi hitrostmi tiskanja). Tiskarska črnila imajo nizko viskoznost, da lahko stečejo skozi šobo; za primerjavo, tiskarska gošča za filmski ploski tisk ima viskoznost  $\sim 5000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , medtem ko ima črnilo za digitalni tisk viskoznost  $3\text{--}15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

**Prednosti digitalnega tiska** v primerjavi s konvencionalnim filmskim (ploskim ali rotacijskim) tiskom so:

- manjša poraba energije,
- manjša poraba vode (ni treba prati tiskarske opreme),
- indirektna metoda tiska (tiskarske šablone niso potrebne),
- višja stopnja fiksiranja,
- potrebna je manjša paleta barvil,
- skoraj ni ostanka barvil (manjša onesnaženost odpadnih vod) in
- fleksibilnost proizvodnje, hitra menjava vzorcev in neomejeno vzorčenje [78].



## 7 Alternativne tehnike sušenja in ogrevanja

Postopke sušenja oz. odstranjevanja odvečne vode iz tekstilnega materiala lahko razdelimo glede na stopnjo sušenja na pedsušenje, vmesno sušenje in končno sušenje [2, 40]. Konvencionalno toplotno sušenje (konvekcijsko z vročim zrakom ali kondukcijsko v direktnem stiku z ogrevano površino) pri plemenitenu tekstilnih materialov je eden energetsko najbolj intenzivnih in zato dragih procesov, saj poteka pri visokih temperaturah in daljši čas, zahteva kompleksno postrojenje, izgube toplote so velike, kar povzroča veliko okoljskih in varnostnih težav [80]. Kot alternativa konvencionalnim postopkom so v nadaljevanju predstavljene tehnike sušenja in ogrevanja z infrardečim (IR) sevanjem, mikrovalovi in radijskimi valovi (angl.: *Radio Frequency*, RF).

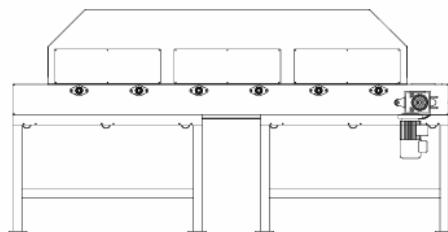
### 7.1 IR sušenje

IR sevanje je elektromagnetno valovanje s frekvencami od 430 THz do 300 GHz in valovnimi dolžinami od 700 nm do 1 mm [80]. Uporablja se predvsem za pedsušenje tekstilnega materiala v kombinaciji s konvencionalnimi postopki sušenja. IR sušilni sistemi prenašajo toploto z obsevanjem in delujejo neposredno na vodo in druga topila na tekstilu, kar povzroči njihovo izhlapevanje, medtem ko tekstilni material in okoliški zrak ostaneta hladna. Globina prodora IR sevanja v

tekstil je odvisna od valovne dolžine sevanja. Krajša ko je valovna dolžina, globlje v material lahko prodira. Običajno pa globina prodora IR sevanja ni večja od ~1,5 mm. Za sušenje tekstilnega materiala se lahko uporabljajo IR žarnice ali IR paneli (slika 7.1).



(a)



(b)

**Slika 7.1: (a) Industrijski sistem sušenja tkanine s šestimi IR paneli (Top Digitext srl, Italija) in (b) shema sistema [81]**

Prednosti IR sušenja in ogrevanja v primerjavi s konvencionalnim postopkom so:

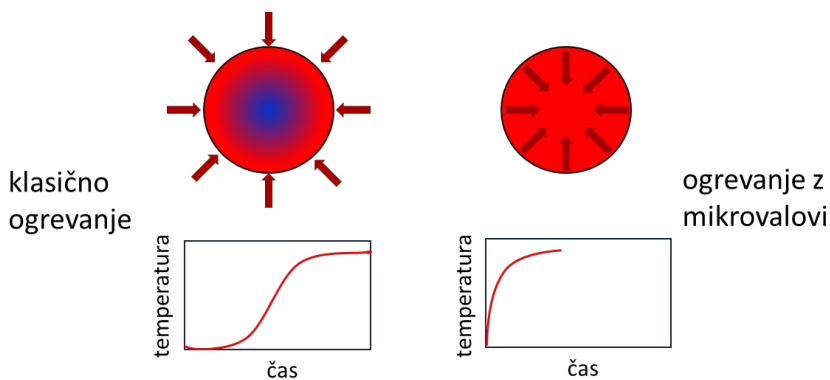
- velika hitrost ogrevanja in krajši čas sušenja, kar poveča produktivnost,
- enostavna instalacija in delo z opremo,
- enostaven nadzor temperature,
- manjše postrojenje [80].

## 7.2 Ogrevanje in sušenje z mikrovalovi

Mikrovalovi so elektromagnetni valovi s frekvencami od 300 GHz do 300 MHz in valovnimi dolžinami od 1 mm do 1 m [12]. Energija mikrovalov se uporablja v različnih industrijskih procesih kot alternativa običajnim tehnikam ogrevanja. Mikrovalovi prodirajo v material in tam zaradi spremembe polarnosti visokofrekvenčnega polja dipolne molekule nihajo pod vplivom izmeničnega polja. To nihanje se pretvarja v toploto in material se ogreje.

Ogrevanje in sušenje z mikrovalovi je bistveno drugačno od konvencionalnih postopkov (slika 7.2). Konvencionalno ogrevanje poteka pri visokih temperaturah in daljši čas, pri čemer toplota počasi prehaja s površja v notranjost materiala [82]. Pri ogrevanju z mikrovalovi je ogrevanje zelo hitro, enakomerno in istočasno po

celotnem volumnu materiala. V tekstilni industriji se energija mikrovalov uporablja za segrevanje, sušenje, kondenzacijo, barvanje, končno plemenitenje in modificiranje površine materialov.



Slika 7.2: Razlika med klasičnim ogrevanjem in ogrevanjem z mikrovalovi [82]

**Prednosti uporabe mikrovalov** v primerjavi s konvencionalnimi tehnikami ogrevanja:

- ni direktnega onesnaževanja zraka (indirektno onesnaževanje, zaradi uporabe elektrike je manjše kot v primeru konvencionalnega ogrevanja),
- lokalizirano ogrevanje, kar zmanjša izgubo energije,
- hitrejšo ogrevanje in sušenje, kar poveča produktivnost in zmanjša porabo energije,
- bolj enakomerno ogrevanje [80, 82].

Pri uporabi mikrovalov za ogrevanje je treba dosledno upoštevati varnostne ukrepe, saj je čezmerna izpostavljenost mikrovalovnemu sevanju nevarna za zdravje ljudi.

### 7.3 RF sušenje

Radijski valovi oz. RF sevanje je elektromagnetno valovanje s frekvencami od 300 GHz do 3 Hz in valovnimi dolžinami od 1 mm do 100.000 km [83]. RF sušenje deluje na molekularni ravni, podobno kot sušenje z mikrovalovi, le da zaradi daljših valovnih dolžin RF sevanje učinkoviteje prodre v tekstilni material v primerjavi z mikrovalovi.

RF sušilne komore, ki se uporabljajo pri plemenitjenju tekstilnega materiala, so sestavljene iz:

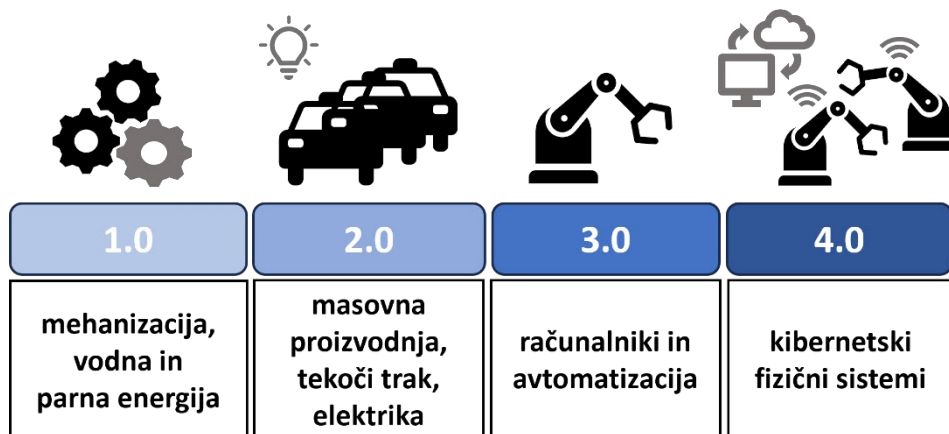
- visokofrekvenčnega generatorja (oscilator), ki proizvaja RF valovanje,
- aplikatorja oz. elektrod, ki so lahko vzporedne perforirane plošče ali palične elektrode z razpršenim poljem, kjer poteka sušenje, in
- sistema za odvajanje zraka [84].

Molekule z visoko polarnostjo (kot je voda) se enostavno segrejejo, ko so izpostavljene električnemu polju (medmolekularno trenje), ki nastane zaradi delovanja visokofrekvenčnega izmeničnega toka. Ko je dovedene dovolj RF energije, voda izhlapi iz tekstilnega materiala – material se posuši. Čas sušenja z RF sevanjem je odvisen od vrste tkanine, odstotka vlage v tkanini in želene stopnje sušenja.

## 8 Tekstilna industrija 4.0

Pri industriji 4.0 gre za digitalno preobrazbo proizvodnje, pri čemer celotno delovanje temelji na podatkih in se upravlja z digitalnimi sistemi. Vizija industrije 4.0 je, da so vse naprave povezane *on-line*, na neki način pa je tudi inteligentna in do določene stopnje sposobna sprejemanja lastnih odločitev. Končni cilj so tako imenovane »pametne tovarne« s kibernetскими fizičnimi sistemi, ki so sposobni samostojne izmenjave informacij, sprožanja dejanj in neodvisnega nadzora drug drugega.

Ročnega dela je bistveno manj, potreba po nekvalificiranih delavcih je manjša, zaradi česar so stroški dela nižji, proizvodni cikli so hitrejši z višjo stopnjo natančnosti in ponovljivosti. Pri tem so bistvenega pomena ključne tehnologije, kot so kibernetiski fizični sistemi, internet stvari (angl.: *Internet of Things*, IoT), računalništvo v oblaku (angl.: *cloud computing*) in kognitivno računalništvo.



Slika 8.1: Štiri »industrijske revolucije«, kot jih definira nemško industrijsko-znanstvenoraziskovalno združenje [85]

Tako kot druge gre tudi **tekstilna industrija** v korak s časom in v proizvodni proces vključuje napredne in pametne tehnologije, kot so umetna inteligenca (angl.: *Artificial Intelligence*, AI), strojno učenje, strojni vid, uporaba masovnih podatkov (angl.: *big data*), sisteme za avtomatizacijo, 3D simulacije itd. Sodobna tehnologija z več možnostmi prilagajanja in hitrejšim prihodom izdelkov na trg utira pot do unikatnega, stroškovno učinkovitega, trajnostnega in visokokakovostnega tekstilnega izdelka. Prav tako **avtomatizacija** vpliva na nižjo porabo vode in energije, manjšo količino odpadkov, odpadnih vod in emisij toplogrednih plinov ter na večjo produktivnost, varnost pri delu in optimalno izrabo časa za manipulacijo in transport (pol)izdelka.

**Primer vpeljave nove tehnologije pri barvanju in/ali tiskanju** je avtomatiziran sistem za shranjevanje, tehtanje in doziranje barvil, kemikalij in/ali pomožnih sredstev, ki ima številne prednosti:

- delavci nimajo več neposrednega stika s kemikalijami in barvili med tehtanjem, transportom in doziranjem, zaradi česar je delovno mesto varnejše,
- manjša potreba po nekvalificirani delovni sili,
- nevarnost razlitja barvil in kemikalij je zmanjšana na minimum,
- sistem nadzoruje natančne količine zalog in zagotavlja predlog naročil, če zaloge padejo pod določeno količino,

- večja natančnost pri tehtanju in doziranju ter s tem večja ponovljivost pri barvanju/tiskanju, kar vpliva na manjšo porabo barvil in kemikalij ter večjo produktivnost [86].

Največja ovira pri vpeljevanju digitalizacije v tekstilno proizvodnjo so prilagoditev obstoječih procesov in s tem povezani stroški. Posodobitev obstoječih strojev, opreme in sistemov je zelo draga investicija, zato morajo pri podjetjih, ki se odločijo za vpeljavo digitalizacije, koristi prevladati nad stroški.

### 8.1 Načrtovanje virov podjetja

Najboljša strategija za celotno dobavno verigo v tekstilni industriji je vzpostavitev inteligentnih integracijskih sistemov za analizo globalnih potrošniških trendov, optimiziranje proizvodnega procesa na podlagi povpraševanja potrošnikov ter doseganje skrajšanja roka dobave in višje kakovosti tekstilnega izdelka [87].

Ena izmed najpogosteje uporabljenih rešitev za digitalno preobrazbo je vpeljava sistema za načrtovanje virov podjetja (angl.: *Enterprise Resource Planning*, ERP), ki je prilagodljiv in povezljiv sistem digitalnih vsebin, s katerimi si podjetja pomagajo pri poslovanju – upravljanju procesov na ravni celotnega podjetja, od financ, kadrov, dobavne verige, prodaje, marketinga, logistike, proizvodnje, upravljanja odnosov s strankami do kakovosti itd. [88].

### 8.2 Simulacija procesov in sledenje materialu

Digitalizacija proizvodnje lahko vključuje tudi simulacijo posameznega procesa na osebem računalniku [89]. Na tak način je možna optimizacija procesnih parametrov in medsebojno prilagajanje proizvodnih faz, še preden se proizvodnja sploh začne. S kodiranjem posameznega polizdelka (npr.: bala 1000 m surove bombažne tkanine) je mogoče tudi sledenje polizdelku skozi proizvodni cikel.

### 8.3 Spremljanje delovanja sistemov v realnem času

Proizvajalci tekstilnih strojev naslednje generacije uvajajo celovite senzorske (senzorji za temperaturo, vlago itd.) in vizualne sisteme – strojni vid za spremljanje delovanja različnih proizvodnih procesov in posameznih procesnih parametrov v realnem času z zbiranjem podatkov in uporabo interneta stvari ali umetne inteligence [6, 89].

Izredno kratek odzivni čas od zaznane težave, ki se pojavi med proizvodnjo, vpliva na manjšo porabo energije, vode, odpad in proizvodne stroške. Poleg tega se lahko hranjeni masovni podatki uporabijo tudi za strojno učenje in napovedovanje vzdrževanja strojne opreme ter preprečevanje morebitnih okvar. Za preprečevanje zaustavitve sistemov je na voljo tudi programska oprema za pomoč preko oddaljenih storitev (pomoč na daljavo).

Primeri uporabe senzorjev pri plemenitju tekstilij za spremljanja procesov v realnem času:

- **Barvanje in beljenje:** amperometrični senzor omogoča sprotno kontrolo koncentracije redukcijskega sredstva pri barvanju ali oksidacijskega sredstva (odstranitev vodikovega peroksida po beljenju) na tkaninah. Na tak način preprečimo čezmerno uporabo kemikalij.
- **Barvanje z redukcijskimi barvili:** s spremljanjem redoks potenciala je mogoče natančno določiti čas, ko se redukcijsko sredstvo popolnoma izpere. Ko je ta točka dosežena, se izpiranje samodejno ustavi in se v kopel doda oksidant. S tem se prihrani tehnološka voda, zmanjša poraba kemikalij in zniža onesnaženje vode.
- **Barvanje:** sprotno merjenje kemične potrebe po kisiku – KPK (in določanje razmerja med KPK in koncentracijo barvila) med postopkom pranja in izpiranja pri diskontinuiranih postopkih barvanja. Ko je koncentracija barvila in TPS v izpiralni kopeli dovolj nizka, se postopek izpiranja samodejno ustavi. S sprotnim merjenjem KPK se prihrani veliko vode in energije v primerjavi s klasičnimi sistemi [6].

**Strojni vid** (angl.: *machine vision*) vključuje nedestruktivne tehnike, s katerimi določamo specifične lastnosti (gladkost, deformacije itd.) in morfologijo izbrane tekstilije brez fizičnega poseganja v material [6, 42]. Najpogosteje gre za vizualno vrednotenje, pri čemer je povzetek rezultatov v realnem času posredovan ustreznemu operaterju, ki sprejme končno odločitev (zaustavitev stroja, odprava napake itd.). Primeri uporabe strojnega vida pri plemenitju tekstilij:

- **Digitalni tisk:** kontinuirano uravnavanje tiskarske glave na neenakomerni površini tkanine. Poleg tega sistem vizualno analizira deformacijo tekstilije.



- **Mokri postopki plemenitenja:** zaznavanje poškodb in napak na robovih tkanin.

**Apretiranje:** določanje gladkosti tkanine (kakovost) z uporabo sistema z več kamerami, ki zaznavajo/prepoznavajo hrapavost, nagubanje, odebelitve itd. na površini z več kot 90-% verjetnostjo.



# Literatura

- [1] K. Stana-Kleinschek, O. Šauperl, *Kemični postopki apretiranja*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Oddelek za tekstilne materiale in oblikovanje, 2007.
- [2] K. Stana-Kleinschek, D. Fakin, V. Golob, S. Jeler, I. Soljačič, A. Majcen Le Marechal, *Osnove plemenitenja tekstilij*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Oddelek za tekstilstvo, 2002.
- [3] A. Ojstršek, "Vloga različnih nosilcev biomase pri čiščenju tekstilnih barvalnih odpadnih vod," Univerza v Mariboru, Maribor, 2007.
- [4] D. Fakin, "Ekologija plemenitilnih procesov, Zbrano gradivo," Fakulteta za strojništvo, 2021.
- [5] J. Zhang, X. Qian, J. Feng, "Review of carbon footprint assessment in textile industry," *Ecofeminism and Climate Change*, let. 1, št. 1, str. 51-56, 2020.
- [6] A. Hasanbeigi, *Energy-efficiency improvement opportunities for the textile industry*, University of California: eScholarship, 2010. [Online]. Dosegljivo: <https://escholarship.org/content/qt6jw8s2gz/qt6jw8s2gz.pdf>. [Datum dostopa: 27.8.2024.]
- [7] *Uredba o izvajanju Uredbe (ES) o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij (REACH)*. 2008, U. I. RS, št. 23, str. 2086.
- [8] *Uredba o izvajanju Uredbe (ES) št. 1272/2008 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 16. decembra 2008 o razvrščanju, označevanju in pakiranju snovi ter zmesi, o spremembi in razveljavitvi direktiv 67/548/EGS in 1999/45/ES ter spremembi Uredbe (ES) št. 1907/2006*. 2010, U. I. RS, št. 56, str. 8529.
- [9] T. Toprak, P. Anis, "Textile industry's environmental effects and approaching cleaner production and sustainability, an overview," *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, let. 2, št. 4, str. 429-442, 2017.
- [10] Innovation in Textiles. Dosegljivo: <https://www.innovationintextiles.com/new-routes-to-efficiency-with-thermex-and-econtrol/> [Datum dostopa: 27.8.2024.]
- [11] A. Raj, A. Chowdhury, S. W. Ali, "Green chemistry: its opportunities and challenges in colouration and chemical finishing of textiles," *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, let. 27, str. 100689, 2022.
- [12] S. K. B. C. Panda, K. Sen, S. Mukhopadhyay, "Sustainable pretreatments in textile wet processing," *Journal of Cleaner Production*, let. 329, str. 129725, 2021.
- [13] D. Fakin, *Barvanje*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2009.
- [14] A. D. E. G. A. Wolela, "Major Development in Cotton Coloration: A Review," *Advanced Research in Textile Engineering*, let. 7, št. 2, str. 1078, 2022.
- [15] *Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz objektov in naprav za proizvodnjo, predelavo in obdelavo tekstilnih vlaken*. 2007, U. I. RS, št. 7, str. 609.
- [16] *Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda iz virov onesnaževanja*. 1996, U. I. RS, št. 35, str. 2953.
- [17] *Pravilnik o prvih meritvah in obratovnem monitoringu odpadnih voda ter o pogojih za njegovo izvajanje*. 2014, U. I. RS, št. 94, str. 10507.
- [18] *Uredba o mejnih vrednostih emisije hlapnih organskih spojin v zrak iz naprav, v katerih se uporabljajo organska topila*. 2015, U. I. RS, št. 35, str. 3957.
- [19] W. Qian *et al.*, "Quantification and assessment of chemical footprint of VOCs in polyester fabric production," *Journal of Cleaner Production*, let. 339, str. 130628, 2022.

- [20] A. Majcen Le Marechal, B. Križanec, S. Vajnhandl, J. Volmajer Valh, "Textile finishing industry as an important source of organic pollutants," v *Organic pollutants ten years after the Stockholm convention-environmental and analytical update*, T. Puzyn and A. Mostrag Eds. Rijeka, Croatia: IntechOpen, 2012, str. 29-54.
- [21] F. Uddin, "Energy management and energy crisis in textile finishing," *American Journal of Energy Research*, let. 2, št. 3, str. 53-59, 2014.
- [22] J. Lim, H. Lee, H. Cho, J. Y. Shim, H. Lee, J. Kim, "Novel waste heat and oil recovery system in the finishing treatment of the textile process for cleaner production with economic improvement," *International Journal of Energy Research*, let. 46, št. 14, str. 20480-20493, 2022.
- [23] E. Ozturk, N. C. Cinperi, M. Kitis, "Improving energy efficiency using the most appropriate techniques in an integrated woolen textile facility," *Journal of Cleaner Production*, let. 254, str. 120145, 2020.
- [24] M. Jain, "Ecological approach to reduce carbon footprint of textile industry," *International Journal of Applied Home Science*, let. 4, št. 7/8, str. 623-633, 2017.
- [25] A. Athalye, "Carbon footprint in textile processing," *Colourage*, let. 59, št. 12, str. 45-47, 2012.
- [26] S. S. Muthu, M. A. Gardetti, *Sustainability in the textile and apparel industries*. Springer, 2020.
- [27] M. L. Goni, N. A. Ganan, R. E. Martini, "Supercritical CO<sub>2</sub>-assisted dyeing and functionalization of polymeric materials: A review of recent advances (2015–2020)," *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, let. 54, str. 101760, 2021.
- [28] A. G. Hassabo, M. Zayed, M. Bakr, A. El-Aziz, H. Othman, "Applications of Supercritical Carbon dioxide in Textile Finishing: A Review," *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, let. 19, št. 2, str. 179-187, 2022.
- [29] DyeCoo technology for sustainable textiles with waterless dyeing. Textile Magazine. Dosegljivo: <https://www.indiantextilemagazine.in/dyecoo-technology-sustainable-textiles-waterless-dyeing/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [30] *Prospekti proizvajalcev strojne opreme za plemenitnje tekstilnih materialov*.
- [31] M. T. Abate, M. G. Tadesse, "Airflow, foam, and supercritical carbon dioxide dyeing technologies," v *Innovative and Emerging Technologies for Textile Dyeing and Finishing*, L. J. Rather and A. S. Haji, Mohd Eds.: Scrivener Publishing LLC, 2021, str. 137-164.
- [32] H. Eren, O. Avinc, S. Eren, "Supercritical carbon dioxide for textile applications and recent developments," v *IOP conference series: Materials science and engineering*, 2017, let. 254, št. 8, str. 082011.
- [33] THEN AIRFLOW® Synergy, Aerodynamic High Temperature Piece Dyeing Machine. Dosegljivo: <https://www.fongs.eu/machines/then-airflow-synergy/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [34] M. Mohsin, S. Sardar, "Development of sustainable and cost efficient textile foam-finishing and its comparison with conventional padding," *Cellulose*, let. 27, št. 7, str. 4091-4107, 2020.
- [35] "Foam Applications on Textiles," Cotton Incorporated, Weston Parkway, NC, ZDA, 27.8.2024 2011. [Splet]. Dosegljivo: <https://www.cottoninc.com/wp-content/uploads/2017/12/TRI-4009-Foam-Applications-on-Textiles.pdf> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [36] Gaston Systems. Dosegljivo: <https://gastonsystems.com/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [37] Z. Chen, W. Yu, Z. Du, "Study of electrothermal properties of silver nanowire/polydopamine/cotton-based nanocomposites," *Cellulose*, let. 26, št. 10, str. 5995-6007, 2019, doi: 10.1007/s10570-019-02506-w.
- [38] B. M. Eid, N. A. Ibrahim, "Recent developments in sustainable finishing of cellulosic textiles employing biotechnology," *Journal of Cleaner Production*, let. 284, str. 124701, 2021.
- [39] R. Paul, E. Genesca, "The use of enzymatic techniques in the finishing of technical textiles," v *Advances in the dyeing and finishing of technical textiles*, M. L. Gulrajani Ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd., 2013, str. 177-198.
- [40] A. K. R. Choudhury, *Principles of textile finishing*. Sawston: Woodhead Publishing Ltd., 2017.

- [41] Delovanje encimov. Dosegljivo: <https://eucbeniki.sio.si/kemija9/1108/index7.html> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [42] A. Hasanbeigi, L. Price, "A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry," *Journal of Cleaner Production*, let. 95, str. 30-44, 2015.
- [43] T. Harifi, M. Montazer, "Past, present and future prospects of cotton cross-linking: New insight into nano particles," *Carbohydrate polymers*, let. 88, št. 4, str. 1125-1140, 2012.
- [44] A. Ojstršek, D. Fakin, "Natural Dyeing of Wool Using *Junglans regia* (Common Walnut) Leaf Extract," let. 62, št. 4, 2019.
- [45] S. Adeel, S. Rafi, M. A. Mustaan, M. Salman, A. Ghaffar, "Animal based natural dyes: A short review," v *Handbook of renewable materials for coloration and finishing*, Y. Mohd Ed. Beverly: Scrivener Publishing LLC, 2018, str. 41-74.
- [46] D. Singhee, "Review on natural dyes for textiles from wastes," v *Chemistry and Technology of Natural and Synthetic dyes and pigments*, A. K. Samanta, N. S. Awwad, and H. M. Algarni Eds. London, UK: IntechOpen, 2020, str. 99-122.
- [47] J. Arora, P. Agarwal, G. Gupta, "Rainbow of Natural Dyes on Textiles Using Plants Extracts: Sustainable and Eco-Friendly Processes," *Green and Sustainable Chemistry*, let. 07, št. 01, str. 35-47, 2017, doi: 10.4236/gsc.2017.71003.
- [48] K. Phan, K. Raes, V. Van Speybroeck, M. Roosen, K. De Clerck, S. De Meester, "Non-food applications of natural dyes extracted from agro-food residues: A critical review," *Journal of Cleaner Production*, let. 301, str. 126920, 2021.
- [49] A. Kramar, M. M. Kostic, "Bacterial secondary metabolites as biopigments for textile dyeing," *Textiles*, let. 2, št. 2, str. 252-264, 2022.
- [50] C. K. Venil, L. Dufossé, P. Velmurugan, M. Malathi, P. Lakshmanaperumalsamy, "Extraction and application of pigment from *Serratia marcescens* SB08, an insect enteric gut bacterium, for textile dyeing," *Textiles*, let. 1, št. 1, str. 21-36, 2021.
- [51] S. Vajnhandl, A. M. Le Marechal, "Ultrasound in textile dyeing and the decolouration/mineralization of textile dyes," *Dyes and Pigments*, let. 65, št. 2, str. 89-101, 2005.
- [52] M. M. Hassan, K. Saifullah, "Ultrasound-assisted sustainable and energy efficient pre-treatments, dyeing, and finishing of textiles—A comprehensive review," *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, let. 33, str. 101109, 2023.
- [53] Using ultrasound for more efficient, more sustainable and faster textile treatment. PresseBox. Dosegljivo: <https://www.pressebox.com/pressrelease/weber-ultrasonics-gmbh/Using-ultrasound-for-more-efficient-more-sustainable-and-faster-textile-treatment/boxid/1024743> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [54] Ozone clean technologies - G2 Dynamic. Dosegljivo: <https://www.jeanologia.com/g2dynamic/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [55] J. Peran, S. Ercegović Ražić, "Application of atmospheric pressure plasma technology for textile surface modification," *Textile research journal*, let. 90, št. 9-10, str. 1174-1197, 2020.
- [56] A. Hassabo, E. El-Sayed, "Recent advances in the application of plasma in textile finishing (A Review)," *Journal of Textile Coloration and Polymer Science*, let. 18, str. 33-43, 2021.
- [57] M. Naebe, A. N. M. A. Haque, A. Haji, "Plasma-assisted antimicrobial finishing of textiles: A review," *Engineering*, let. 12, str. 145-163, 2022.
- [58] F. Ferrero, G. Migliavacca, M. Periolatto, "UV treatments on cotton fibers," v, *Cotton Research*, I. Y. Abdurakhmonov, Ed., Rijeka, Croatia: IntechOpen, 2016, str. 233-298.
- [59] N. Wang, P. Tang, C. Zhao, Z. Zhang, G. Sun, "An environmentally friendly bleaching process for cotton fabrics: mechanism and application of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system," *Cellulose*, let. 27, str. 1071-1083, 2020.
- [60] H. Bahria, Y. Erbil, "UV technology for use in textile dyeing and printing: Photocured applications," *Dyes and Pigments*, let. 134, str. 442-447, 2016.
- [61] I. Nemeša, V. Kaplan, "Završna obrada tekstila laserom," *Tekstilna industrija*, let. 1, št. 7, str. 33-38, 2019.

- [62] Dosegljivo: <https://tonello.com/en/macchina/the-laser-dual/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [63] T. Abou Elmaaty, S. Okubayashi, H. Elsis, S. Abouelenin, "Electron beam irradiation treatment of textiles materials: a review," *Journal of Polymer Research*, let. 29, št. 4, str. 117, 2022.
- [64] B. G. Pattankude, A. Balwan, "A Review On Coating Process," *International Research Journal of Engineering and Technology*, let. 6, št. 3, str. 7980-7984, 2019.
- [65] WEKO Offers Precise Fluid Application to Nonwovens. Nonwovens Industry. Dosegljivo: [https://www.nonwovens-industry.com/contents/view\\_breaking-news/2016-10-27/weko-offers-precise-fluid-application-to-nonwovens/](https://www.nonwovens-industry.com/contents/view_breaking-news/2016-10-27/weko-offers-precise-fluid-application-to-nonwovens/) [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [66] Z. O. Basyigit, "Application technologies for functional finishing of textile materials," v *Textiles for Functional Applications*, B. Kumar Ed. London, UK: Intech Open, 2021, str. 101-122.
- [67] A. Ojstršek *et al.*, "Metallisation of Textiles and Protection of Conductive Layers: An Overview of Application Techniques," *Sensors*, let. 21, št. 10, May 18 2021, doi: 10.3390/s21103508.
- [68] Shieldex-Stratex GmbH. Dosegljivo: <https://www.shieldex.de/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [69] Nano3D Systems LLC. Dosegljivo: <https://nano3dsystems.com/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [70] Soliani EMC. Dosegljivo: <https://www.solianiemc.com/en/products/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [71] Faraday Defense. Dosegljivo: [https://shop.faradaydefense.com/?utm\\_term&utm\\_campaign&utm\\_source=adwords&utm\\_medium=ppc&hsa\\_acc=1230616009&hsa\\_cam=18400306748&hsa\\_grp&hsa\\_ad&hsa\\_src=x&hsa\\_tgt&hsa\\_kw&hsa\\_mt&hsa\\_net=adwords&hsa\\_ver=3&gad\\_source=1&gclid=EAIaIQobChMI2YajyNWZiAMVrUJBAh1uDTedEAAYASAAEgKMDfD\\_BwE](https://shop.faradaydefense.com/?utm_term&utm_campaign&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=1230616009&hsa_cam=18400306748&hsa_grp&hsa_ad&hsa_src=x&hsa_tgt&hsa_kw&hsa_mt&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMI2YajyNWZiAMVrUJBAh1uDTedEAAYASAAEgKMDfD_BwE) [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [72] A. Ojstršek, N. Virant, D. Fox, L. Krishnan, A. Cobley, "The Efficacy of Polymer Coatings for the Protection of Electroless Copper Plated Polyester Fabric," *Polymers*, let. 12, št. 6, Jun 3 2020, doi: 10.3390/polym12061277.
- [73] A. Ali *et al.*, "Multifunctional electrically conductive copper electroplated fabrics sensitizes by in-situ deposition of copper and silver nanoparticles," *Nanomaterials*, let. 11, št. 11, str. 3097, 2021.
- [74] P. M. Rytlewski, K. Jagodziński, B. "Metallization of Polymers and Textiles," v *Textile Finishing - Recent Developments and Future Trends*, K. B. Mittal, T Ed. Hoboken, NJ, USA: Scrivener Publishing LLC, 2017.
- [75] P. Miśkiewicz, I. Frydrych, A. Cichocka, "Application of Physical Vapor Deposition in Textile Industry," *Autex Res. J.*, let. 22, št. 1, 2022.
- [76] S. Shahidi, B. Moazzenchi, M. Ghoranneviss, "A review-application of physical vapor deposition (PVD) and related methods in the textile industry," *Europ. Phys. J.*, let. 71, št. 3, str. 31302, 2015.
- [77] AGC Plasma Technology Solutions - Textiles. Dosegljivo: [https://www.agc-plasma.com/industries/textile?\\_gl=1\\*1ddzn43\\*\\_up\\*MQ..&gclid=EAIaIQobChMI19zY3s6XiAMV9JaDBx3gmAiBEAAYASAAEgTNEvD\\_BwE](https://www.agc-plasma.com/industries/textile?_gl=1*1ddzn43*_up*MQ..&gclid=EAIaIQobChMI19zY3s6XiAMV9JaDBx3gmAiBEAAYASAAEgTNEvD_BwE) [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [78] P. Forte Tavčer, "ITMA 2015-Digitalni tisk tekstila," *Tekstilec*, let. 59, št. 3, 2016.
- [79] COLARIS.PRINTING. Dosegljivo: <https://www.zimmer-kufstein.com/en/content/colaris-inkjet-printing> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [80] W. Carr, H. Lee, H. Ok, "Drying of Textile Products," v *Handbook of Industrial Drying A*. Mujumdar Ed., 3rd Edition ed.v. Boca Raton: CRC Press, 2006, ch. 781-791.
- [81] Oven drying with infrared panels. Dosegljivo: <https://www.topdigitex.com/wp-content/uploads/2023/10/OVEN-DRYING-WITH-INFRARED-PANELS.pdf> [Datum dostopa: 27.8.2024].

- [82] Everything you need to know about microwave drying machine In 2024. Dosegljivo: <https://www.foodmachineryint.com/es/everything-you-need-to-know-about-microwave-drying-machine-in-2024/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [83] A. Yavaş, A. Özgüney, "Saturated steam-assisted radio frequency fixation of reactive printed cotton fabrics," *Color. Technol.*, let. 127, št. 3, str. 179-185, 2011.
- [84] Radio Frequency (RF) Dryer in Textile Industries. Fibre2Fashion. Dosegljivo: <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/7354/radio-frequency-rf-dryer-in-textile-industries> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [85] C. Roser. A Critical Look at Industry 4.0. Dosegljivo: <https://www.allaboutlean.com/industry-4-0/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [86] Automation for powder dyes SCC. Dosegljivo: <https://colorservice.eu/automation-for-powder-dyes-scc/> [Datum dostopa: 27.8.2024].
- [87] F. K. Konstantinidis, I. Kansizoglou, K. A. Tsintotas, S. G. Mouroutsos, A. Gasteratos, "The role of machine vision in industry 4.0: A textile manufacturing perspective," v IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, New York, USA, 2021.
- [88] W.-H. Tsai, "Green production planning and control for the textile industry by using mathematical programming and industry 4.0 techniques," *Energies*, let. 11, št. 8, str. 2072, 2018.
- [89] F. Pirola, M. Zambetti, C. Cimini, "Applying simulation for sustainable production scheduling: a case study in the textile industry," *IFAC-PapersOnLine*, let. 54, št. 1, str. 373-378, 2021.





# EKOLOGIJA PLEMENITILNIH PROCESOV

ALENKA OJSTRŠEK, DARINKA FAKIN,  
SELESTINA GORGIEVA

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija  
alenska.ojstrsek@um.si, darinka.fakin@um.si, selestina.gorgieva@um.si

Skripta z naslovom »Ekologija plemenitilnih procesov« je namenjena študentom visokošolskega študijskega programa Tehnologije tekstilnega oblikovanja. Pripravljena je tako, da študente v prvih poglavjih seznanja z osnovami tehnoloških procesov plemenitenja tekstilij in njihovo ekološko problematiko. Poseben problem v tekstilni industriji predstavljajo odpadne tehnološke vode, saj so močno obremenjene, vsebujejo različne kemikalije in tekstilna pomožna sredstva, različne tipe organskih barvil, imajo ekstremne pH-vrednosti in visoke vrednosti kemijske potrebe po kisiku (KPK) in biokemijske potrebe po kisiku (BPK), vsebujejo fosfate, sulfate in ostale soli, tenzide, maščobe in olja ter različne tipe težkih kovin. V nadaljevanju so v gradivu predstavljeni alternativni mediji in postopki plemenitenja, ki za doseg izbranega učinka plemenitenja porabijo manj kemikalij in tekstilnih pomožnih sredstev, manj energije in tako vplivajo na manjšo obremenitev okolja. Poseben poudarek je na alternativnih tehnikah obdelave, ki vključujejo avtomatizacijo, ki dodatno vpliva na nižjo porabo vode in energije, manjšo količino odpadkov, odpadnih vod in emisij toplogrednih plinov ter na večjo produktivnost, varnost pri delu in optimalno izrabo delovnega časa. Pridobljeno znanje bo študentom omogočilo, da bodo poleg temeljnih znanj poznali tudi napredne pristope in tehnologije pri razvoju in plemenitju sodobnih inženirskih materialov.

DOI  
[https://doi.org/  
10.18690/um.fs.8.2024](https://doi.org/10.18690/um.fs.8.2024)

ISBN  
978-961-286-936-6

**Ključne besede:**  
ekologija,  
plemenjenje,  
tekstilni materiali,  
napredni postopki,  
odpadne vode



Univerzitetna založba  
Univerze v Mariboru

**DOI**

[https://doi.org/  
10.18690/um.fs.8.2024](https://doi.org/10.18690/um.fs.8.2024)

**ISBN**

978-961-286-936-6

**Keywords:**

ecology,  
finishing,  
textile materials,  
advanced materials,  
wastewater

# ECOLOGY OF FINISHING PROCESSES

ALENKA OJSTRŠEK, DARINKA FAKIN,  
SELESTINA GORGIEVA

University of Maribor, Faculty of Engineering, Maribor, Slovenia  
[alenka.ojstrsek@um.si](mailto:alenka.ojstrsek@um.si), [darinka.fakin@um.si](mailto:darinka.fakin@um.si), [selestina.gorgieva@um.si](mailto:selestina.gorgieva@um.si)

The script entitled “Ecology of Finishing Processes” is intended for students of the professional study programme Textile Design Technologies. It is prepared in such a way that, in the first chapters, students are introduced to the basics of the technological processes of textile finishing and their ecological issues. Technological wastewaters present a specific problem in the textile industry as they are heavily loaded, contain various chemicals and textile auxiliaries, various types of organic dyes, have extreme pH values and high values of Chemical Oxygen Demand (COD) and Biochemical Oxygen Demand (BOD), contain phosphates, sulphates and other salts, surfactants, fats and oils and various types of heavy metals. In addition, the alternative media and finishing processes are described, which use less chemicals and textile auxiliaries and less energy to achieve the selected finishing effect and, thus, have a lower impact on the environment. Special emphasis is placed on alternative processing techniques, which include automation, affecting further on lower water and energy consumption, a lower amount of waste, wastewater and greenhouse gas emission, as well as on higher productivity, safety at work and optimal use of working time. The gained knowledge will enable students with basic knowledge as well as advanced approaches and technologies in the development and finishing of modern engineering materials.







Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za strojništvo