

Univerzitet u Beogradu  
Tehnološko-metalurški fakultet

Milada S. Novaković

Toplotni komfor tekstilnih materijala  
u dinamičkim uslovima

- Doktorska disertacija -

Beograd, 2020.

University of Belgrade  
Faculty of Technology and Metallurgy

Milada S. Novaković

# Transient thermal comfort of textile materials

- Doctoral dissertation -

Belgrade, 2020.

Predsednik komisije:

\_\_\_\_\_

dr Snežana Stanković, vanr. prof.

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

Članovi komisije:

\_\_\_\_\_

dr Dragan Jocić, red. prof.

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

\_\_\_\_\_

dr Goran Poparić, red. prof.

Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

\_\_\_\_\_

dr Jovana Milanović, viši naučni saradnik

Inovacioni centar TMF, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane doktorske disertacije \_\_\_\_\_

# TOPLOTNI KOMFOR TEKSTILNIH MATERIJALA U DINAMIČKIM USLOVIMA

## SAŽETAK

U ovom istraživanju analizirani su parametri toplotnog komfora koji opisuju dinamički odziv glatkih desno-levih (DL) pletenina kao odgovor na fiziološke impulse i klimatske promene okruženja. Toplotno ponašanje ovih pletenina u dinamičkim uslovima ocenjeno je parametrima toplotna apsorptivnost i toplotna difuzivnost. Ispitivani su i sposobnost upravljanja tečnošću i sposobnost propuštanja vazduha pri različitom sadržaju vlage u pleteninama. S obzirom da su ove vrste pletenina vrlo podložne dimenzionim promenama, odnosno promenama u strukturi i geometriji, kako usled skupljanja prilikom pranja, tako i zbog ponovnog rastezanja tokom nošenja, ispitivani parametri su analizirani posle višecikličnog pranja i nošenja.

Eksperimentalni materijal je obuhvatao pleteninu od konoplje, poliakrilonitrilnu (PAN) i konoplja/PAN pleteninu. Promena sirovinskog sastava pletenina, odnosno kombinovanje različitih sirovina izvršeno je u fazi izrade pletenina uz dubliranje homogenih pređa (konoplja i PAN). Konoplja je izabrana kao alternativa pamuku, zbog svojih pozitivnih aspekata održivosti, i zbog vrlo dobre predispozicije za proizvodnju komfornih proizvoda visoke vrednosti. PAN pređa je izabrana zbog poroznosti i mekoće akrilnih vlakana, kao i zbog male sklonosti ka skupljanju, i dobroj sposobnosti zadržavanja oblika.

Rezultati su pokazali da je toplotni komfor glatkih DL pletenina u dinamičkim uslovima uslovljen afinitetom vlakana ka upijanju vode i njihovim toplotnim kapacitetom, ali i geometrijskom konfiguracijom kompleksne mreže pora u pleteninama. Odabrana vlakna su uticala u većoj ili manjoj meri na promene u konstrukciji i geometriji pletenina tokom višecikličnog pranja i nošenja, što je pozitivno uticalo, ili barem nije imalo negativnih efekata na ispitivana svojstva glatkih DL pletenina posle perioda nege i nošenja.

**Ključne reči:** dinamički toplotni komfor, pletenina, konoplja, akril, toplotna apsorptivnost, toplotna difuzivnost, svojstva upravljanja tečnostima, propustljivost vazduha, sadržaj vlage, test nošenja

Naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Tekstilno inženjerstvo

UDK broj:

# TRANSIENT THERMAL COMFORT OF TEXTILE MATERIALS

## ABSTRACT

In this investigation the thermal comfort parameters that describe the transient response of plain jersey knitted fabrics due to the changes in physiological and environmental conditions were analyzed. The transient thermal response of the knitted fabrics was defined by thermal absorptivity and thermal diffusivity. To determine moisture and air management properties of the knitted fabrics during the transient period, both liquid and air permeability as a function of moisture content were determined. Given that this type of knitted fabrics are very prone to structural changes not only due to laundering but also as a consequence of the mechanical stresses during wearing, the effects of repeated wear and care cycles of the knitted fabrics on their transient thermal comfort response were analysed.

The experimental material included the pure hemp, pure acrylic (PAN) and hemp/PAN knitted fabrics. The composition of the blended knitted fabric was designed at the knitting production stage. The hemp was chosen as a more sustainable alternative to cotton with very good predispositions for production of comfortable, high-added value products. Acrylic yarn was chosen to be combined with the hemp component primarily because acrylic fibres are porous and soft, with low shrinkage and good shape retention ability.

The transient thermal comfort response of the knitted fabrics was affected by the fibre regain and thermal capacity, but geometric configuration of the complex porous network in knitted fabrics also influenced the tested properties. The results indicated that chosen fibres affected some changes in the constructional and geometrical parameters of the knitted fabrics after undergoing usage cycles, which positively affected, or at least had no negative effects on the investigated properties after the trial period.

**Keywords:** transient thermal comfort, knitted fabric, hemp, acrylic, thermal absorptivity, thermal diffusivity, air permeability, liquid management properties, moisture content, wear trial test

Scientific field: Technological engineering

Special topics: Textile engineering

UDC number:

*Istraživanja u okviru disertacije rađena su na Katedri za tekstilno inženjerstvo Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu i u ProfiLabu, Beograd. Rezultati ove doktorske disertacije predstavljaju deo rezultata u okviru projekata 171029 i 171016, koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.*

*Koristim priliku da se srdačno zahvalim svom mentoru, prof. dr Snežani Stanković, na svesrdnoj, nesebičnoj i veoma profesionalnoj saradnji i podršci. Zahvaljujem se na ideji za pravac istraživanja, ukazanom strpljenju, razumevanju i poverenju. Zahvaljujem se na posvećenosti, neiscrpoj energiji, pažnji, optimizmu, sugestijama i savetima tokom pisanja disertacije i interpretacije dobijenih rezultata. Podrška, saveti i pomoć tokom koncipiranja, realizacije istraživanja i pisanja disertacije bili su od neprocenjive vrednosti.*

*Saradnja sa prof. dr Goranom Poparićem i prof. dr Dušanom Popovićem, koja mi je pružila mogućnost da primenim metodu za merenje toplotnog kapaciteta tekstilnih materijala, čime smo došli do rezultata veoma značajnih za ovu disertaciju, bila je posebna privilegija za mene. Zbog toga im dugujem veliku zahvalnost. Prof. dr Goranu Popariću zahvaljujem za korisne komentare tokom finalizacije disertacije.*

*Zahvaljujem se dr Jovani Milanović na spremnosti da razvijenu metodu za merenje kapilarnog kvašenja tekstilnih materijala učini dostupnom za sprovođenje dela istraživanja u okviru doktorske disertacije. Pored toga, želim da se zahvalim na angažovanju u komisiji, sugestijama i komentarima koji su doprineli kvalitetu ovog rada.*

*Zahvalnost dugujem prof. dr Draganu Jociću koji je svojim bogatim iskustvom i znanjem pomogao da moja disertacija bude bolja. Zahvaljujem se na razumevanju, strpljenju i izuzetno važnim sugestijama tokom finalizacije ove doktorske disertacije.*

*Želim da se zahvalim na velikom interesovanju i entuzijazmu Gordani Popović prilikom sprovođenja dela eksperimenta koji se odnosio na ispitivanje propustljivosti vazduha na način koji je odudarao od uobičajenih laboratorijskih postupaka. Takođe se zahvaljujem prof. dr Andrijani Žekić za realizaciju skenirajuće elektronske mikroskopije. Mikrofotografije ispitivanih pletenina bile su mi od velike pomoći prilikom tumačenja dobijenih eksperimentalnih rezultata.*

*Beskrajno se zahvaljujem izuzetnim ljudima koji me okružuju, mojoj porodici (sinu i supruhu), kumovima i prijatelju Milošu na veoma važnoj podršci.*

*Zahvaljujem se mom radnom kolektivu, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, na podršci i razumevanju.*

*Milada Novaković*

## SADRŽAJ

UVOD.....	1
-----------	---

### TEORIJSKI DEO

<b>1. TOPLOTNI KOMFOR.....</b>	<b>3</b>
1.1. Toplotna interakcija čoveka i okruženja.....	5
1.2. Uloga kože u termoregulaciji ljudskog organizma.....	8
1.3. Termoreceptori i komfor.....	9
1.4. Termoregulacioni mehanizam znojenja.....	11
<b>2. ULOGA TEKSTILNIH MATERIJALA U TERMOREGULACIJI.....</b>	<b>13</b>
2.1. Poroznost tekstilnih materijala – faktor za obezbeđivanje toplotnog komfora.....	14
<b>3. TOPLOTNA SVOJSTVA TEKSTILNIH MATERIJALA U DINAMIČKIM USLOVIMA.....</b>	<b>19</b>
3.1. Toplotna apsorptivnost (toplina opipa tekstilnih materijala).....	19
3.2. Maksimalna gustina toplotnog toka.....	25
3.3. Toplotna difuzivnost (brzina provođenja toplote).....	28
<b>4. SVOJSTVA UPRAVLJANJA TEČNOŠĆU I VLAGOM.....</b>	<b>31</b>
4.1. Upravljanje tečnošću i vlagom u dinamičkim uslovima.....	34
4.1.1. Sadržaj vlage u tekstilnom materijalu.....	36
4.1.2. Prenos vode u tekstilnom materijalu.....	38
4.2. Faktori koji utiču na svojstva upravljanja tečnošću kod tekstilnih materijala .....	46
4.2.1. Uticaj vlakana na svojstva upravljanja tečnošću.....	47
4.2.2. Uticaj strukture pređe na svojstva upravljanja tečnošću.....	49
4.2.3. Uticaj strukture tekstilnog materijala na svojstva upravljanja tečnošću.....	52

### EKSPERIMENTALNI DEO

<b>5. CILJ I SADRŽAJ RADA.....</b>	<b>59</b>
<b>6. MATERIJAL I METODE ISPITIVANJA .....</b>	<b>61</b>
6.1 Materijal .....	61
6.2 Metode ispitivanja.....	64
6.2.1 Ispitivanje toplotnih svojstava u dinamičkim uslovima.....	64
6.2.2 Ispitivanje sposobnosti upravljanja tečnošću.....	66
6.2.2.1 Test distribucije vode.....	66
6.2.2.2 Ispitivanje sposobnosti kapilarnog kvašenja pletenina.....	68
6.2.3 Ispitivanje sposobnosti propuštanja vazduha.....	69
6.2.4 Statistička analiza eksperimentalnih rezultata.....	70
<b>7. REZULTATI I DISKUSIJA.....</b>	<b>71</b>
7.1 Strukturni i geometrijski parametri pređa i pletenina.....	71
7.2 Toplotna svojstva pletenina u dinamičkim uslovima.....	78
7.2.1 Toplotna apsorptivnost.....	80
7.2.2 Toplotna difuzivnost.....	83
7.3 Svojstva upravljanja tečnošću.....	86
7.3.1 Sposobnost lateralnog upravljanja tečnošću.....	86
7.3.1.1 Sposobnost prenosa tečnosti.....	87

7.3.1.2 Sposobnost zadržavanja tečnosti.....	93
7.3.2 Sposobnost jednosmernog upravljanja tečnošću.....	99
7.4 Propustljivost vazduha pri različitom sadržaju vlage u pleteninama.....	105
<b>8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....</b>	<b>117</b>
<b>9. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>121</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>123</b>



## UVOD

Odeća, kao neizostavni deo ljudskog bitisanja, ima višestruku ulogu u životu ljudi kao što je zaštita od ekstremnih spoljnih uticaja i obezbeđivanje osećaja zadovoljstva u skladu sa društvenim normama. Sa druge strane, odeća se može posmatrati i kao barijera ljudskom organizmu u slobodnoj razmeni energije sa okruženjem. Afirmativni pristup međutim podrazumeva odeću kao deo čovečijeg termoregulacionog sistema u širem smislu, sa osnovnim zadatkom da u sadejstvu sa biološkim mehanizmima termoregulacije održava termofiziološku ravnotežu čovekovog tela i okruženja. Kombinacija klimatskih uslova okruženja (temperatura i vlažnost vazduha) i unutrašnjih parametara organizma (intenzitet fizičke aktivnosti, hormonski status) uslovljava čovekov osećaj toplote, odnosno doživljaj toplotnog komfora. Kada se promeni jedan ili više spoljnih ili unutrašnjih parametara, narušava se toplotna ravnoteža i dolazi do vremenskog zaostajanja u termoregulaciji ljudskog organizma. Proces koji se dešavaju u ovakvim dinamičkim (neravnotežnim) uslovima (apsorpcija, desorpcija, kondenzacija i isparavanje) praćeni su neravnotežnim prenosom toplote i mase. Koliko brzo će se ponovo uspostaviti čovekova termofiziološka ravnoteža zavisi, između ostalog, i od „odgovora“ tekstilnog materijala u prelaznom (dinamičkom) režimu termodinamičke razmene. Svojstva tekstilnog materijala koja definišu njegov odziv u dinamičkim uslovima su: toplotna apsorptivnost, toplotna difuzivnost, sposobnost upravljanja tečnošću (tečnim znojem) i sposobnost propuštanja vazduha pri različitom sadržaju vlage.

U okviru ovog istraživanja ispitivane su glatke DL pletenine budući da se ovakvi tekstilni materijali vrlo često koriste za izradu odevnih predmeta koji su u neposrednom kontaktu sa kožom. Kada je reč o sirovinskom sastavu ovih pletenina, odabrana su vlakna sa dijametralno suprotnim karakteristikama u pogledu toplotnih svojstava i svojstava upravljanja vlagom, uz pretpostavku da bi se specifična svojstva upotrebljenih vlakana odrazila na ponašanje pletenina u dinamičkim uslovima razmene energije i mase. Sa jedne strane su to vlakna konoplje koja su poznata kao visoko apsorbujuća, higroskopna vlakna sa dobrim bakteriostatskim, anti-alergijskim i anti-statičkim svojstvima. Iako konopljina vlakna nisu sada u širokoj upotrebi, navedena svojstva im obezbeđuju potencijalno značajnu zastupljenost na tržištu posebno za izradu odevnih predmeta koji su u kontaktu sa kožom. Pored toga, specifičnosti gajenja konoplje kao što su prilagodljivost biljke različitim klimatskim uslovima, ograničena upotreba pesticida i minimalna upotreba fertilizatora, ograničena potreba za navodnjavanjem, sposobnost bioremedijacije predstavljaju pozitivne aspekte održivog razvoja. Sa druge strane, izabrana su poliakrilonitrilna vlakna (PAN), koja se kao i druga sintetička vlakna smatraju inferiornim u pogledu toplotnog komfora. Iako se poliakrilonitrilna vlakna najčešće koriste kao zamena ili u mešavini sa vunanim vlaknima, u ovom slučaju su odabrana zbog svoje mekoće i poroznosti. Pored toga, istraživanja su pokazala da upotreba akrilnih vlakana ne mora obavezno da dovede do pogoršanja toplotnog komfora tekstilnih materijala zahvaljujući značajnoj sposobnosti kapilarnog kvašenja. Takođe, pored poznatih negativnih aspekata održivosti (ekološka ograničenja, neobnovljiva sirovina za sintezu polimera, niska biodegradabilnost), upotreba poliakrilnih vlakana nudi određene prednosti prilikom dobijanja vlakana i tokom nege i održavanja odevnih predmeta (niža temperatura pranja u poređenju sa celuloznim materijalima, ušteda energije zbog bržeg sušenja). Imajući sve ovo u vidu, evaluacija toplotnog komfora u ovom istraživanju je, pored 100% konoplje i 100% PAN pletenine, obuhvatila 50%/50% konoplja/PAN pleteninu sa osnovnom idejom da se kombinovanjem vlakana različitih svojstava, dobije tekstilni materijal zadovoljavajućih svojstava toplotnog komfora u dinamičkim uslovima, uz anuliranje izvesnih nedostataka upotrebljenih sirovina.

Do sada su u praksi primenjivani postupci mešanja različitih vlakana u masi ili tokom procesa njihove prerade u pređu. U okviru ovog istraživanja polazi se od pretpostavke da bi mešanje različitih vlakana moglo da se izvrši u fazi izrade pletenina jednostavnim kombinovanjem dve pređe različitog sirovinskog sastava. Time bi se omogućilo ne samo kombinovanje različitih sirovina, već i iskorišćenje svojstava komponentnih pređa proisteklih od njihovih internih svojstava.

Pregled literature ukazuje na ograničeni broj podataka o svojstvima komfora tekstilnih materijala na bazi konoplje, a posebno kada se radi o neravnotežnim uslovima razmene energije i mase između tela i okruženja. Generalno, izuzev relativno većeg broja istraživanja toplotnih parametara koji definišu ponašanje tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima, izuzetno je mali broj radova posvećeno ispitivanju propustljivosti tečnosti i vazduha tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima, odnosno pri različitom sadržaju vlage u materijalu. Pored toga, u literaturi je prisutan ograničen broj rezultata koji se odnose na dinamički toplotni komfor tekstilnih materijala u uslovima njihove eksploatacije. Zbog toga je u ovom istraživanju učinjen korak dalje u smislu praćenja promene ovih svojstava pletenina nakon perioda njihove upotrebe (nege i nošenja).

Na osnovu dosadašnjih istraživanja konstatovano je da je, u slučaju pletenina izrađenih od mešavine vlakana u masi, sposobnost pletenine da uspostavi ravnotežu prenosa toplote i mase uslovljena konstrukcijom same pletenine i svojstvima upotrebljenih vlakana. Budući da su ispitivane DL pletenine proizvedene na mašini uz konstantne tehnološke parametre, i od pređa različitog sirovinskog sastava ali istih nominalnih svojstava, u ovom istraživanju se polazi od hipoteze da bi očekivane razlike u dinamičkim parametrima toplotnog komfora pletenina bile posledica različitih karakteristika vlakana, koje bi se projektovale na ispitivana svojstva pletenina direktno, ili indirektno kroz efekte distribucije vlakana u pređi (gustina pakovanja i pokretljivost vlakana u pređi).

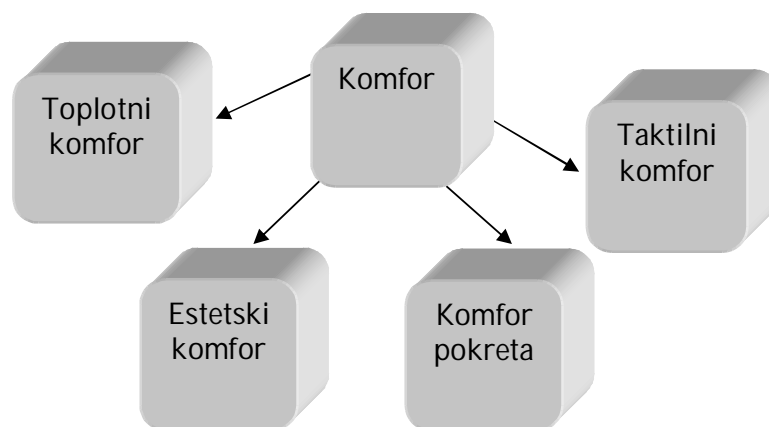
Polazeći od činjenice da sintetička vlakna generalno obezbeđuju stabilnost oblika kao i olakšanu negu i održavanje odevnih predmeta, dok su prirodna vlakna superiorna u pogledu toplotnog komfora, očekuje se da bi se kombinovanjem ovih sirovina dobio materijal koji bi u uslovima eksploatacije ispoljio pozitivne odlike obe vrste upotrebljenih sirovina. Imajući uvidu jeftiniju i produktivniju proizvodnju sintetičkih vlakana u poređenju sa procesom prerade prirodnih vlakana, kao i ostale pozitivne aspekte održivosti obe tekstilne sirovine, dobijanje tekstilnog materijala od mešavine konoplje i PAN vlakana, sa zadovoljavajućim parametrima toplotnog komfora u dinamičkim uslovima predstavljalo bi praktičan značaj ovog rada.

Očekuje se da rezultati ovog istraživanja obezbede određena saznanja o dinamičkom odzivu tekstilnih materijala na bazi konoplje sa aspekta toplotnog komfora, i daju doprinos saznanjima o ponašanju tekstilnih materijala na bazi konoplje u uslovima eksploatacije. Pored toga, očekuje se da dobijeni rezultati ponude određene smernice za projektovanje DL pletenina koje bi, pored zadovoljavajućeg toplotnog komfora, mogle da obezbede „brz odgovor“ na impulse iz neposrednog čovekovog okruženja.

## 1. TOPLOTNI KOMFOR

Odevanje predstavlja jednu od najelementarnijih čovekovih potreba koje karakteriše sve epohe ljudskog društva, od onih najstarijih, do savremenog ljudskog društva. Odevni tekstilni materijali obuhvataju širok spektar materijala koji pokrivaju ljudsko telo. Odeća poboljšava bezbednost tela u odnosu na okolinu stvarajući barijeru između kože i okoline. Odeća ima funkciju ulepšavanja ljudskog tela i predstavljanja ličnog ukusa i stila, pa se može reći da je veoma važan estetski faktor ljudskog tela. Pri tome, odeća mora da ispunjava određene tehničke zahteve, kao što su očuvanje forme i izgleda u procesu eksploatacije, da zadovolji ukus kupca, visok kvalitet uz pristupačnu cenu. Pored navedenih performansi odeće, udobnost odeće, ili komfor, predstavlja jedan od najvažnijih i presudnih faktora odgovornih za izbor odevnog predmeta, i smatra se jednim od najvažnijih dostignuća u razvoju tekstila. Komfor se definiše kao harmonija psihičkog i fizičkog stanja ljudskog tela sa njegovim okruženjem. Najšire definisan, komfor obuhvata četiri komponente komfora (ilustrovano na slici 1.1) (Hatch,1993; Stanković, 2009).

- Toplotni komfor: odnosi se na prenos toplote i vlage kroz tekstilne površine, i izučava sposobnost tekstilnih materijala da zadrže termofiziološku ravnotežu ljudskog tela.
- Taktilni komfor: odnosi se na različite nervne senzacije koje nastaju prilikom kontakta tekstilnih materijala i kože.
- Komfor pokreta: razmatra sposobnost tekstilnih materijala da omoguće nesmetane pokrete uz istovremeno zadržavanje željenog oblika odevnog predmeta.
- Estetski komfor: obuhvata subjektivnu percepciju odeće čulima vida, sluha, mirisa i dodira.

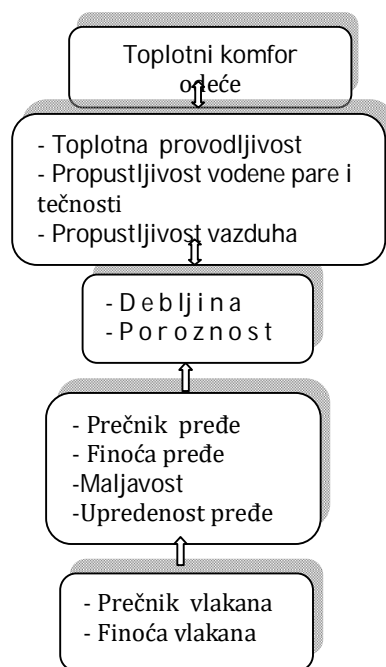


Slika 1.1. Komponente komfora

Danas se komfor najčešće sagledava kroz tri komponente: psihološki, taktilni i termofiziološki ili toplotni komfor. Psihološki komfor se dovodi u vezu sa savremenim modnim trendovima, opštim društvenim konvencijama u oblasti odevanja i sl. Ova komponenta komfora gotovo da nema dodirnih tačaka sa tekstilnim materijalima, već sa kulturološkim aspektima i psihologijom potrošača. Sa druge strane, taktilni i toplotni komfor su u tesnoj vezi sa svojstvima tekstilnih materijala. Taktilni komfor je rezultat mehaničke interakcije tekstilnog materijala i čovekove kože tokom njihovog međusobnog kontakta, odnosno prilikom nošenja odeće. Svojstva tekstilnih materijala koja uslovljavaju taktilni komfor su pre svega, njihova deformaciona svojstva (savitljivost, kompresibilnost, istegljivost) i površinska svojstva. Toplotni komfor se odnosi na sposobnost tekstilnih materijala da podrže čovekov termoregulacioni sistem u održavanju toplotne ravnoteže sa

okolinom, u svim uslovima temperature i vlažnosti vazduha, bez obzira na intenzitet fizičke aktivnosti.

Sposobnost odeće, odnosno tekstilnog materijala da učestvuje u održavanju toplotne ravnoteže čoveka sa okruženjem ogleda se kroz efekte koje materijal ima na količinu energije koju ljudsko telo troši za održavanje toplotne ravnoteže. Održavanje površine kože ljudskog tela suvom pomaže očuvanju telesne temperature. U ovom procesu odeća ima dvostruku ulogu; štiti ljudsko telo od "spoljašnje" vlage (odeća štiti od kiše, snega i ostalih mogućih izvora vlage u hladnijim periodima godine) i "unutrašnje" vlage (odeća odvodi znoj sa površine kože ka spoljašnjoj sredini). Kada je temperatura vazduha visoka i uticaj vetra minimalan, termoregulacija ljudskog tela se vrši putem izlučivanja znoja koji zatim isparavanjem sa površine kože oduzima suvišnu toplotu ljudskom telu. Ispareni znoj se u obliku vodene pare ili tečne vode sa površine kože, kroz odeću, odvodi u okolinu. Ovu veoma značajnu ulogu u procesu osiguravanja neophodnog komfora, odeća ispunjava zahvaljujući pogodnim svojstvima tekstilnih materijala od kojih je izrađena. Kada je reč o svojstvima tekstilnih materijala, istraživanja su potvrdila da presudnu ulogu u procesu prenosa toplote i mase imaju svojstva upotrebljenih vlakana, način formiranja pređe, upredenost, finoća, maljavost pređe, kao i parametri strukture tekstilnog materijala kao što su debljina i poroznost, kako je ilustrovano na slici 1.2 (Yoon, Buckley, 1984; Stanković, 2009).



Slika 1.2. Parametri tekstilnog materijala koji utiču na komfor odeće (Yoon, Buckley, 1984; Stanković, 2009)

Toplotni komfor u termofiziološkom smislu predstavlja rezultat uravnoteženog procesa razmene toplote, vlage i vazduha između tela, odeće i okruženja. Toplotni komfor se odnosi na sposobnost tekstilnog materijala (tkanine, pletenine) da održava normalnu temperaturu kože kroz provođenje toplote i znoja generisane u ljudskom organizmu. Kako bi se održala ravnoteža između stvorene energije i energije koja se odaje okruženju, osnovna funkcija odeće je da "pomogne" termoregulacionom sistemu u smislu očuvanja toplotne ravnoteže ljudskog organizma u uslovima različitih fizičkih aktivnosti kao i različitih klimatskih uslova okruženja (Stanković, Bizjak, 2014). Stoga se toplotni komfor često definiše kao stanje uma koje ispoljava zadovoljstvo u pogledu ambijentalnih temperaturnih

karakteristika (Kothari, 2006). Toplotni komfor odeće zavisi prvenstveno od brzine prenosa vlage i toplote sa tela u okruženje, vrste tekstilnog materijala od kojeg je izrađena odeća, kao i od spoljašnjih faktora: temperature i vlažnosti vazduha okruženja, i strujanja vazduha. Svojstva toplotnog komfora tekstilnih materijala obuhvataju parametre: provodljivost toplote, toplotnu otpornost, propustljivost vazduha, upravljanje vlagom (provođenje vodene pare, apsorpcija, isparavanje i provođenje tečnosti/znoja, brzina sušenja) (Havenith, 1999).

### 1.1. Toplotna interakcija čoveka i okruženja

Proizvodnja toplotne energije predstavlja osnovnu funkciju ljudskog organizma. Održavanje telesne temperature u optimalnim granicama važno je kako značajnije odstupanje ne bi poremetilo funkcionisanje organizma, ali je od velike važnosti i za toplotni komfor. Da bi se postigao zadovoljavajući toplotni komfor, moraju biti ispunjena dva uslova. Prvi uslov je da temperatura kože i temperatura tela obezbeđuju osećaj toplotne udobnosti. Drugi uslov je uspostavljanje energetske ravnoteže ljudskog tela u datom okruženju. To znači da energija dobijena metabolizmom mora biti jednaka energetskim gubicima iz tela usled kondukcije, konvekcije, zračenje, isparavanja i disanja. Ta dva uslova su ugrađena u jednačinu toplotne ravnoteže ljudskog tela, koja se naziva jednačina toplotnog komfora, relacija 1.1 (Li, 2001; Stanković, 2012).

$$M_m - W_{ef} = C_{konv} + R_{zr} + E_{sk} + (C_{res} + E_{res}) + C_k \quad (1.1)$$

gde je  $M_m$  ( $W/m^2$ ) - metabolizam (unutrašnja proizvodnja energije),  $W_{ef}$  ( $W/m^2$ ) - efektivni mehanički rad čoveka,  $C_{konv}$  ( $W/m^2$ ) - gubitak toplote konvekcijom,  $R_{zr}$  ( $W/m^2$ ) - gubitak toplote toplotnim zračenjem,  $E_{sk}$  ( $W/m^2$ ) - gubitak toplote isparavanjem znoja sa površine kože,  $C_{res}$  ( $W/m^2$ ) - gubitak toplote disanjem,  $E_{res}$  ( $W/m^2$ ) - gubitak toplote isparavanjem usled disanja,  $C_k$  ( $W/m^2$ ) - gubitak toplote kondukcijom.

Za intenzitet metabolizma se može reći da je uslovljen fizičkom aktivnošću. Dok se u normalnim uslovima toplota oslobađa kondukcijom, konvekcijom i zračenjem, telo se znoji da bi održalo temperaturu, sa ubrzanjem metabolizma smanjuje se gubitak toplote konvekcijom i zračenjem usled smanjenja temperature kože, a povećava se gubitak energije isparavanjem usled bržeg znojenja kože. U slučaju pojačane fizičke aktivnosti u organizmu se proizvodi veća količina toplote, a to dovodi do porasta temperature tela i pojačanog znojenja jer je narušena ravnoteža. Osećaj komfora se tada pogoršava. Pored toga, kada se unutrašnja energija tela ne proizvodi dovoljno, cirkulacija krvi u ekstremitetima se usporava što dovodi do lokalizovanog hlađenja kože tela, i tada se javlja osećaj diskomfora (neudobnosti). Toplotna ravnoteža između čovekovog tela i okruženja može lako da se poremeti zbog promene temperature ili vlažnosti tela. Međutim, čovek pomoću mehanizama termoregulacije održava neophodnu termodinamičku ravnotežu odnosno, obezbeđuje sebi toplotni komfor. Na primer, u uslovima kada telo počinje da se naglo hladi, drhtanjem može značajno da se ubrza metabolizam kako bi se generisala potrebna toplota (Parsons, 2003).

Proizvodnja, dobijanje ili stvaranje telesne toplote većinom se odvija u jetri, mozgu i srcu, kao i mišićima tokom aktivnosti (vežbanja). Proizvodena toplota se prenosi kroz mrežu krvnih sudova i tkiva u kožu odakle odlazi u okolinu (okruženje). Količina proizvodnje metaboličke toplote zavisi od nivoa aktivnosti mišića, i u manjoj meri, od stanja u kojem se organizam nalazi. Osnovni nivo metabolizma je definisan kao metabolizam osobe koja mirno sedi. Za čoveka prosečne visine i površine kože ta količina iznosi 100 W. U zavisnosti od stepena fizičke aktivnosti smatra se da ljudsko telo može da proizvede toplotu u rasponu od oko 80 W dok spava, pa preko 1000 W dok vrši veoma naporan i intenzivan rad (Bajzik et al., 2016). Drugim rečima, povećanjem aktivnosti mišića ljudskog tela povećava se metabolička

energija (Hall, 2011). Smatra se, da je radna efikasnost mišića 15%, dok se 85% ukupne energije oslobađa kao toplotna energija. Mozak zauzima svega 2% telesne mase ali stvara obezbeđuje) oko 15% ukupnog telesnog metabolizma tokom velike mentalne aktivnosti. Glava ima specijalizovanu termoregulacionu fiziologiju kako bi se osigurala velika brzina oslobađanja toplote u cilju održavanja temperature mozga konstantnom.

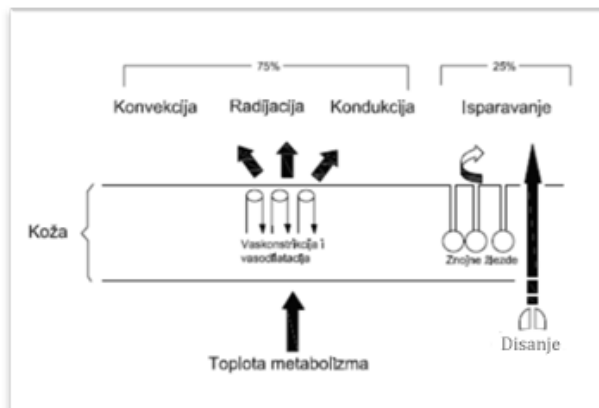
Ljudski organizam može dobiti toplotu iz okruženja kroz kožu. Površinu kože zagreva zračenje koje potiče od sunčevih zraka ili sa površina koje su toplije od površine kože. Iako u većini situacija konvekcija i isparavanje odnose metaboličku toplotu dalje od tela, strujanje zagrejanog vazduha može izazvati zagrevanje kože, i kada je stepen telesnog znojenja nedovoljan da drži korak sa isparavanjem znoja, zagrevanje tela prevazilazi gubitke toplote pri isparavanju znoja (Arens, Zhang, 2006). Kako bi se izmerio metabolizam ljudi različitih veličina (različitih visina i površina kože), obično se izražava jedinicom  $W/m^2$  (vat po jedinici površine kože), ili posebnom jedinicom za bazični metabolizam „MET“ ( $1\text{met} = 58,15 W/m^2$ ). Primeri različitih metaboličkih energija (brzine metabolizma) predstavljeni su u tabeli 1.1 (Parsons, 2003; Arens, Zhang, 2006).

Tabela 1.1. Primeri različitih brzina metabolizma (metaboličkih energija) (Parsons, 2003; Arens, Zhang, 2006).

Aktivnost	Odavanje toplote (met)
Spavanje	0,7
Budno stanje (mirno ležanje bez pokreta)	0,8
Sedenje	1,0
Hodanje brzinom od 0,9 - 3,2 km/h	2,0
Hodanje brzinom od 1,2 - 6,4 km/h	3,8
Kancelarijski posao (sedenje uključujući povremene pokrete)	1,0 – 1,4
Spremanje stana-kuće	2,0 – 3,4
Igranje-plesanje	2,4 – 4,4
Sport - košarka	5,0 – 7,6
Plivanje	4-8
Trčanje	8-12

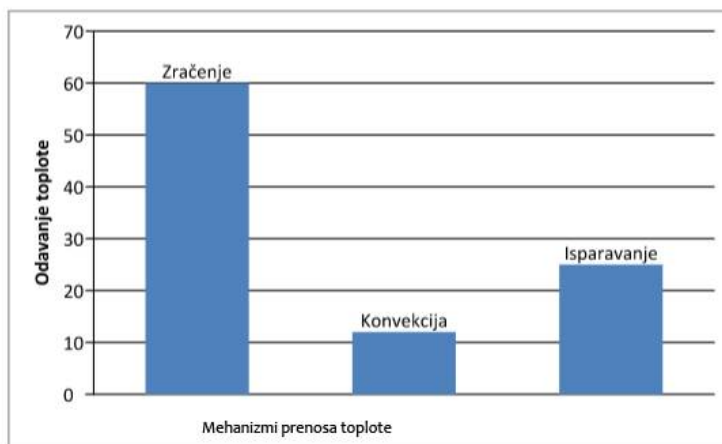
Kako bi se održala toplotna ravnoteža ljudskog organizma, neophodno je da toplota stvorena metaboličkim procesom bude u ravnoteži sa energijom koju telo odaje okruženju. Kao što je već navedeno, razmena toplote sa okruženjem se vrši: kondukcijom (provođenje toplote), konvekcijom (prelaženje toplote), zračenjem toplote, isparavanjem i disanjem. Procentualni odnos prenosa toplote iznad i ispod površine kože prikazan je na slici 1.3. U neutralnom okruženju gde telo ne treba da preduzima termoregulacione radnje da bi sačuvalo ravnotežu, isparavanje predstavlja 25% gubitka ukupne toplote, dok „suvi“ gubitak toplote pruža ostalih 75%. Tokom jačih fizičkih aktivnosti (npr. vežbanje), ovi procenti mogu zameniti mesta. Generalno, prenos toplote putem provođenja (kroz tabane ili dok sedi na stolici) je mali, oko 3%. U zatvorenoj sredini gde vazduh miruje, prenos toplote putem konvekcije i zračenja je otprilike jednak. U otvorenom okruženju vetar ima veliki uticaj na gubljenje ili dobijanje toplote putem konvekcije, a sunčevo zračenje može takođe, da

prouzrokuje veliko gubljenje i dobijanje toplote. Ove sile deluju asimetrično na telo, pogađajući neke delove više nego ostale (Arens, Zhang, 2006).



Slika 1.3. Prenos toplote iznad i ispod površine kože (Arens, Zhang, 2006).

Odavanje toplote konvekcijom ili konvekcija toplote je odvođenje toplote iz tela strujanjem vazduha. Neznatno strujanje gotovo uvek postoji u blizini tela, jer vazduh koji dodiruje kožu teži da je napusti čim se zagreje. Telo gubi oko 12% sopstvene toplote zbog konveksijskog strujanja vazduha. Odavanjem toplote zračenjem, telo emituje oko 60% ukupno oslobođene toplote (Parsons, 2003). Odavanje toplote ljudskog tela odnosno, vrednosti zračenja, konvekcije i isparavanja mogu se predstaviti dijagramom (slika 1.4).



Slika 1.4. Odavanje toplote ljudskog tela na temperaturi vazduha 22°C

Suva (osetljiva) toplota uglavnom se predaje preko kože i odeće konvekcijom i zračenjem, a u manjoj meri kondukcijom i zagrevanjem vazduha plućima. Latentna (vlažna) toplota predaje se u plućima i preko kože. Kada je telo izloženo vetru, sloj vazduha koji se nalazi u neposrednoj blizini kože brzo se menja novim vazduhom, pa se gubitak toplote odvođenjem povećava. Radijacijom i kondukcijom se toplota odaje iz tela sve dok je temperatura viša od temperature okoline. U obrnutom slučaju, telo prima toplotu, i tada isparavanje postaje jedini način da se osloboditi toplote. Zato, bilo koji faktor koji sprečava isparavanje kada je temperatura okoline viša od temperature kože uzrokuje da temperatura tela raste (Sherwood, Huber, 2010).

Pod dejstvom klimatskih faktora okruženja (temperatura, vlažnost vazduha) i unutrašnjih parametara organizma (fizička aktivnost), dolazi do narušavanja toplotne ravnoteže. Prema drugom zakonu termodinamike, toplota se kreće od toplijeg ka hladnijem telu, odnosno od više prema nižoj temperaturi. Razmena toplote odnosno, generisanje i oslobađanje toplote mora biti u ravnoteži kako bi se održavala homotermija (održavanje unutrašnje telesne temperature). Ako telo nije u stanju da održava normalnu telesnu temperaturu, ona značajno raste pa je takvo stanje poznato kao hipertermija (pregrevanje). Suprotno od hipertermije je hipotermija (rashlađivanje) kada telesna temperatura opada ispod normalnog nivoa. Temperatura ljudskog tela varira u različitim delovima tela zavisno od temperature okruženja, što je prezentovano u tabeli 1.2 (Ogulata, 2007).

Tabela 1.2. Temperatura različitih delova tela pri različitim spoljašnjim temperaturama

Deo tela		Temperatura okruženja	
		20°C	35°C
Temperatura (°C)	Unutrašnji organi	37	37
	Koža	28	37
	Periferni organi	34	37
	Skelet	31	37

## 1.2 Uloga kože u termoregulaciji ljudskog organizma

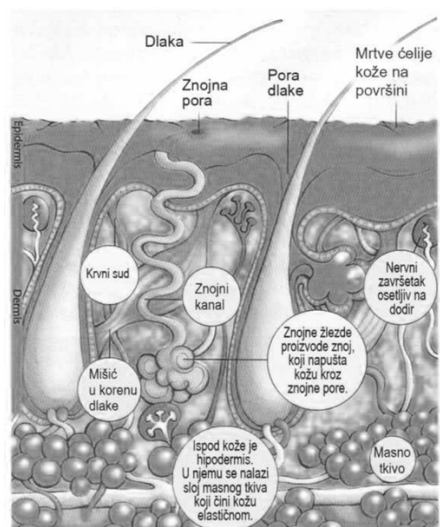
Za zdravog čoveka se kaže da je homeoterm odnosno, sposoban da održi telesnu temperaturu oko 37 °C (Parsons, 2003). Termoregulacija se definiše kao sposobnost organizma da održava telesnu temperaturu u optimalnim granicama, uprkos raznim promenama temperature okoline i stvaranja toplote u sopstvenom organizmu. Termoregulacija je od izuzetnog značaja jer garantuje vitalnost funkcija ljudskog tela. Prema tome, termoregulacija predstavlja jedan od prioritarnih zadataka ljudskog organizma, u okviru koga se različitim mehanizmima reaguje na povećanje i smanjenje količine toplote u telu. Telesna temperatura je jedan od najstrožije regulisanih parametara u fiziologiji ljudskog organizma. Neki autori smatraju da je granično toplotno opterećenje 38,5 °C, a gornja granica izdržljivosti 43 °C (Parsons, 2003). Telesna temperatura iznad 41,5 °C, i ispod 33,5 °C, onemogućava adekvatnu metaboličku i enzimsku funkciju (Moran, Mendal, 2002).

Koža je najveći i najsenzitivniji organ ljudskog tela, sa milion sićušnih nervnih završetaka - receptora koji osećaju dodir, pritisak, toplinu, hladnoću, bol, vlažnost, i dr. To je glavni organ koji kontroliše toplotu i protok vlage prema okruženju ili iz okruženja, i predstavlja barijeru između spoljašnje sredine i unutrašnjih organa. U normalnim uslovima, sa površine kože se odvodi oko 75% proizvedene toplote.

Masa kože ljudskog tela kreće se od 2 do 8 kg (16% od ukupne mase), sa površinom od 1,2 - 2,3 m<sup>2</sup>. Debljina kože je promenljiva i kreće se od 0,5 do 4 milimetra. Smatra se da je najtanja koža na očnim kaptcima, a najdeblja na dlanovima i petama (Arens, Zhang, 2006). Struktura kože prikazana je na slici 1.5 (Ur11). Kožu čine: epidermis, dermis i hipodermis. Epidermis predstavlja površinski sloj kože (gornji deo - pokožica). Dermis je unutrašnji sloj kože (srednji sloj - koža) koji se nalazi neposredno ispod epidermisa. U koži se nalaze znojne i lojne žlezde, dlake i nokti kao i mnogobrojni krvni i limfni sudovi i nervni završeci. Dermis daje čvrstinu i elastičnost koži. Ispod ovog sloja nalazi se hipodermis - donji sloj, vezivno tkivo i masne ćelije odnosno, potkožno masno tkivo koje ima zaštitnu ulogu kao toplotni izolator i "rezervoar" energije (Kilinc-Balaci, 2011). Zahvaljujući ovakvom sastavu koža vrši značajne funkcije za telo:



- Štiti telo od mehaničkih, hemijskih i termičkih povreda. Koža je najvažniji senzitivni organ čovekovog tela koji omogućava osećanje pritiska i bola.
- Zaštita tela od patoloških mikroorganizama pomoću mnogobrojnih žlezda koje neprekidno luče antibakterijske materije.
- Zaštita od infekcija zahvaljujući imunološki aktivnim ćelijama u tkivu kože.
- Regulisanje telesne temperature uz pomoć znoja koji luče znojne žlezde. Unutrašnja temperatura tela se smanjuje isparavanjem znoja sa velike površine kože. Sa druge strane, koža ne dozvoljava isparavanje vode i sušenje unutrašnjih tkiva (Arens, Zhang, 2006).



Slika 1.5. Struktura kože ljudskog tela (Url 1, pristupljeno sept. 2016)

### 1.3 Termoreceptori i komfor

U svakodnevnim životnim okolnostima čovek je uglavnom u bliskom dinamičkom kontaktu sa tekstilnim materijalima odnosno, odećom. Senzacije izazvane odećom uslovljene su fizičkom aktivnošću čoveka kao i klimatskim uslovima okruženja. Ljudsko telo oseća različite stepene hladnoće i toplote kao i senzacije opipa i bola zahvaljujući različitim receptorima. Rezultat ove interakcije su različiti mehanički, toplotni, hemijski i električni stimulansi. Odgovarajući na indukovane stimulanse receptori u koži ljudskog tela proizvode senzacije opipa, toplote, hladnoće i bola (Craig, 2003).

Termoreceptori su mali, nervni završeci koji su neravnomerno raspoređeni po čovekovom telu. Termoreceptori se najviše nalaze u koži i hipotalamusu, mogu se naći u kičmenoj moždini, donjem abdomenu, oko velikih vena u gornjem abdomenu i grudnom košu (Arens, Zhang, 2006).

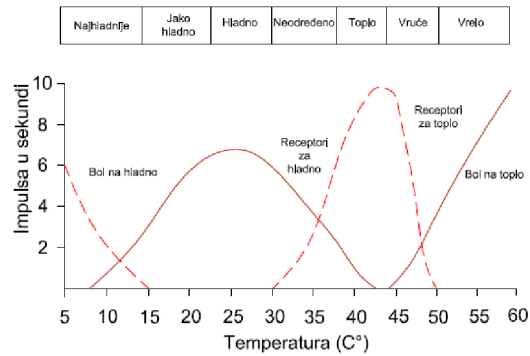
U koži se nalaze dve vrste toplotnih receptora i to: receptori za toplotu i receptori za hladnoću. Receptori za hladnoću nalaze se neposredno ispod epidermisa (prosečna dubina 0,15 - 0,17 mm), dok se receptori za toplo nalaze u gornjem sloju dermisa, na dubini od 0,3-0,6 mm (Arens, Zhang, 2006).

Receptori za hladno se aktiviraju u opsegu od 10 - 40°C, kada je temperatura kože manja od normalne (36 °C). Receptori za hladno su najosetljiviji između 25 - 30 °C, ali najjače reaguju pri temperaturi kože nešto nižoj od telesne temperature (od 25 -27 °C).

Receptori za toplo, kojih ima desetak puta manje od receptora za hladno, aktiviraju se pri temperaturi kože većoj od 30 °C, (reaguju u opsegu 30 - 45 °C), ali najjače pri temperaturi

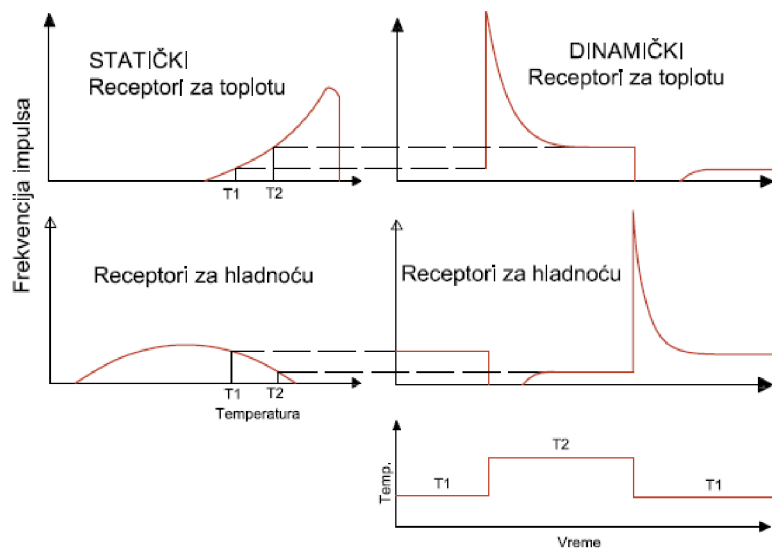
kože nešto višoj od telesne temperature (od 39 – 40 °C). Iznad 45 °C dolazi do oštećenja tkiva i senzacija koja se dobija nije osećaj toplote već osećaj bola (Mitrović, 2009). Drugim rečima, svaki receptor se aktivira u određenom opsegu temperatura, kao što je ilustrovano na slici 1.6. Ako se u isto vreme podraže receptori za toplo i hladno, samo će se osetiti toplina.

Ukoliko temperatura kože pređe iznad 44 °C ili se snizi ispod 17 °C, aktiviraju se receptori za bol. Osećaj za bol je složen doživljaj koji uključuje brojne komponente, a nastaje kod svakog nadražaja kad pređe izvesnu granicu intenziteta (Arens, Zhang, 2006).



Slika 1.6. Frekvencije receptora za hladno, toplo i bol (Arens, Zhang, 2006).

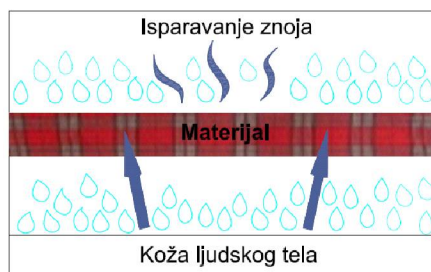
Usled većeg broja termoreceptora za hladno, i činjenice da se oni nalaze bliže površini kože, čovekovo telo je osetljivije na hladnoću nego na toplotu. Dinamička priroda termoreceptora uslovljava osećaj toplote i doživljaj komfora. Termoreceptor je u velikoj meri sposoban za adaptaciju. Kada je podvrgnut nagloj promeni temperature, prvo je jako stimulisan, šaljući impulse visoke frekvencije. Zatim, ova stimulacija brzo opada tokom prve minute nakon promene temperature, a zatim sve sporije dok ne postigne stalan nivo, (slika 1.7) (Arens, Zhang, 2006). Osoba oseća veću hladnoću ili toplotu kada temperatura kože aktivno pada ili raste, nego kada je temperatura na istom nivou. To objašnjava jače senzacije hladnoće ili toplote pri ulasku u hladan bazen ili vruću kupku.



Slika 1.7. Glavne osobine termoreceptora (Arens, Zhang, 2006).

## 1.4 Termoregulacioni mehanizam znojenja

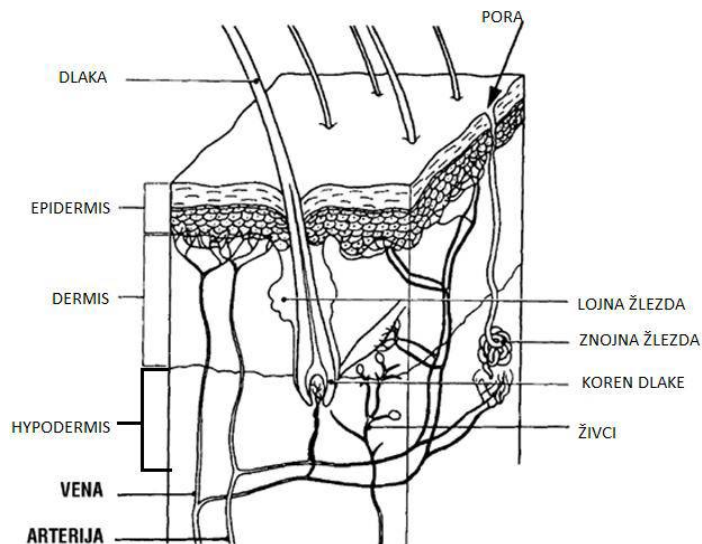
Ljudsko telo ima izuzetnu sposobnost samoregulacije toplotne ravnoteže i lučenja znoja, zadržavajući optimalnu temperaturu tela. Znojenje je fiziološki proces kojim se organizam hladi i reguliše telesnu temperaturu odnosno, oslobađa viška toplote nastale fizičkom aktivnošću ili nekim drugim metaboličkim procesom. U normalnim uslovima, koji podrazumevaju uobičajeni nivo fizičke aktivnosti i neekstremne klimatske uslove, telo oslobodi oko 60 ml vodene pare u toku jednog sata. Ovakvo latentno ili neprimetno znojenje ili isparavanje vlage u obliku pare čini 15% ukupno oslobođene toplote kroz kožu. U slučaju da nije moguće održati optimalnu temperaturu od  $37 \pm 0.5$  °C, telo će početi da proizvodi tečni znoj (450 ml/h) (Wallace, 2002). Tečni znoj se uklanja sa površine kože ljudskog tela isparavanjem sa kože u vidu vodene pare (slika 1.8). Ukoliko se tečni znoj nedovoljno brzo odvede sa površine kože, utoliko se narušava osećaj komfora. Smatra se da se znojenjem čovek u najvećoj meri oslobađa viška toplote. Kada je prisutan temperaturni gradijent suprotnog smera između kože i okruženja, u tom slučaju isparavanje znoja ostaje jedini način da se telo oslobodi viška toplote. Ukupnom toku toplote ljudskog tela značajno doprinosi čak i mala isparena količina znoja (Atmaca, Yigit, 2006).



Slika 1.8. Isparavanje znoja sa površine kože ljudskog tela

Najčešće je koncentracija vlage na koži veća u poređenju sa količinom vlage u vazduhu. Vlažna koža ljudskog tela u velikoj meri može povećati efekat hlađenja tela, npr. pri vlažnosti kože od 10–20%, toplotna izolacija tekstilnog materijala može da se smanji i do 50% u odnosu na tkaninu koja je suva (nepokvašena). Proizvodnja znoja ljudskog organizma zavisi od tipa i intenziteta fizičke aktivnosti i kreće se u intervalu od 40 - 100 g/h (standardna količina znoja) pa čak do 1 l znoja za sat vremena (veoma težak fizički rad). Zbog tih promena i uočenih zavisnosti, smatra se da je veoma važno da se istraži propustljivost vodene pare tekstilnih materijala, ne samo u suvom, nego i u vlažnom stanju, što se posebno odnosi na materijale sa visokom higroskopnošću kao što su npr. vunene tkanine (Boguslawska, Hes, 2013).

Za generisanje znoja u ljudskom telu prvenstveno su zadužene znojne žlezde, iako ih mogu stimulisati i emocije. Ljudsko telo poseduje oko tri miliona znojnih žlezda raspoređenih po površini kože. Svakog dana sa površine kože izluči se do 40 g kožne masnoće i 0,5 - 1 l znoja. Ukoliko je aktivnost veća, utoliko je izlučivanje tečnosti tj. znoja veće. U zavisnosti od situacije u kojoj se ljudsko telo nalazi (fizička aktivnost, klimatski uslovi okruženja), povećanje proizvodnje znoja nastaje porastom broja znojnih žlezda koje učestvuju u njegovom stvaranju i povećanjem izlučivanja svake aktivne žlezde, utičući na efekat gubljenja toplote putem isparavanja znoja. Na slici 1.9 prikazana je znojna žlezda sa otvorom na površini kože koji joj omogućava izlučivanje znoja. Usled emocionalnog uzbuđenja, psihološkog stresa i pojačane mentalne aktivnosti stimulišu se znojne žlezde na dlanovima i tabanima pa dolazi do takozvanog emocionalnog znojenja. Ovo emocionalno znojenje brzo počinje i brzo se završava.



Slika 1.9. Znojna žleza (Url 2: pristupljeno novembar, 2017)

Aklimatizacija je proces prilagođavanja ljudskog tela klimi nove životne sredine, novim klimatskim uslovima. Ljudi se rađaju sa velikim brojem znojnih žlezda, ali ukoliko ne provode rano detinjstvo u toplim klimatskim uslovima, mnoge od znojnih žlezda postaju potpuno neaktivne. Bez obzira na to da li ljudi žive u toplim klimatskim uslovima ili ne, akumulirano izlaganje toploti ili prilikom vežbanja, će dovesti do aktiviranja većeg broja znojnih žlezda, tako da se znoj ravnomernije raspoređuje po telu, čineći gubljenje toplote efektivnijim putem isparavanja. Ukoliko je čovek izložen visokim temperaturama i ako se znoj javlja u vidu kapljica i kaplje sa kože, to obično znači da osoba nije dobro aklimatizovana. Aklimatizovana osoba u stvari, izgleda suvlje, uprkos tome što se znoji u većoj meri. Znoj koji kaplje je nepoželjan u pogledu adaptacije jer onemogućava hlađenje kože putem isparavanja i pritom dehidrira telo. Maksimalna količina znojenja za neaklimatizovanu osobu retko dostiže 1 l/h, dok dobro aklimatizovana osoba može dostići količinu znoja od 2-3 l/h. Isparavanjem ove količine znoja otklanja se desetostruka proizvodnja bazalne telesne toplote, što je ekvivalentno gubitku 2 – 3 kg telesne mase na sat. Kada je deo kože potpuno mokar duže od 2 sata, znojenje se naglo zaustavlja jer prisutna vlaga blokira znojne žlezde (hidromeiosis). Ovaj efekat može biti prouzrokovan velikom količinom neisparenog znoja na površini kože, ili usled izloženosti kože visokoj vlažnosti okoline. Pošto potpuno vlažna površina kože nije u mogućnosti da isparavanjem poveća tempo hlađenja i pošto će znoj verovatno početi da kaplje, ovaj mehanizam (hidromeiosis) ima prednosti adaptacije za telo time što smanjuje neproduktivni gubitak tečnosti (u smislu otklanjanja toplote) (Hall, 2011).

## 2. ULOGA TEKSTILNIH MATERIJALA U TERMOREGULACIJI

Tekstilni materijali (odeća) su posrednik između ljudskog tela i spoljne sredine. U stalnom su kontaktu sa kožom ljudskog tela, aktivno učestvuju i pomažu u termoregulaciji ljudskog organizma da se prilagodi različitim klimatskim uslovima. Sa druge strane, tekstilni materijali, odnosno odeća, predstavljaju izvesnu barijeru slobodnoj razmeni energije i mase između čoveka i njegovog okruženja. Pored činjenice da tekstilni materijal učestvuje kao međusloj u interakciji tela sa okruženjem, dodatno komplikujući dinamički sistema hidro - termičke razmene, sloj ili slojevi tekstilnog materijala formiraju mikroklimu ili mikrookruženje. Sa aspekta toplotnog komfora, moglo bi se reći da je osnovna funkcija tekstilnih materijala da obezbede toplotnu ravnotežu između čoveka i neposrednog okruženja, pri čemu su ključni parametri sposobnost tekstilnih materijala da prenose toplotu, vlagu (vodena para i tečnosti) i vazduh (Novaković i sar., 2013; Pan et al., 2007). Poznato je da sa povećanjem toplotne provodljivosti tekstilnih materijala ( $\lambda$ ) (W/m·K), uz dati temperaturni gradijent ( $\Delta T$ ), raste toplotni fluks ( $q$ ) (W/m<sup>2</sup>) u pravcu koji je upravan na posmatrani tekstilni materijal i dat je relacijom (Đorđević i sar., 1997; Stanković et al., 2009):

$$q = -\lambda \cdot \vec{\nabla}T \quad (2.1)$$

Fenomen prenosa toplote kroz tekstilni materijal obuhvata sva tri mehanizma: kondukciju, konvekciju i radijaciju. Prenošenje toplote kroz tekstilni materijal teoretski se može predstaviti na sledeći način (Stanković, 2012):

$$K_{PT} = \frac{1}{\frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{kon}} + \frac{1}{\alpha_r}} \quad (2.2)$$

gde je  $K_{PT}$  - koeficijent prolaza toplote,  $t$  - debljina tekstilnog materijala,  $\lambda$  - toplotna provodljivost,  $\alpha_{kon}$  - koeficijent prelaza toplote konvekcijom,  $\alpha_r$  - koeficijent prelaza toplote radijacijom.

Gubitak toplote kondukcijom, konvekcijom i radijacijom ili gubitak suve toplote ( $H_d$ )(W) uslovljen je površinom ljudskog tela ( $A_T$ ) (m<sup>2</sup>), temperaturom kože ( $T_{sk}$ )(°C) i vazduha ( $T_a$ ) (°C), i ukupnom toplotnom otpornošću kompleta odeće i površinskog sloja vazduha ( $R_{T(tot)}$ ) (m<sup>2</sup>°C/W) prema relaciji (Huang, 2006; Stanković, 2012):

$$H_d = \frac{A_T(T_{sk} - T_a)}{R_{T(tot)}} \quad (2.3)$$

Ova relacija se može primeniti u slučaju kada slojeve odeće čine tekstilni materijali glatkih površina i u slučajevima kada dizajn odeće omogućava direktno dodirivanje slojeva tekstilnog materijala, čime se znatno redukuju unutrašnji slojevi vazduha. Kada su pojedinačni slojevi tekstilnog materijala koji se odlikuju neravnomernom površinom, kao i u slučaju slabog prijanjanja odeće uz telo, slojevi vazduha unutar kompleta odeće mogu značajno da utiču na njegovu termoizolacionu sposobnost.

Gubitak toplote isparavanjem znoja (latetni gubitak toplote) ili toplota isparavanja ( $H_e$ )(W), uslovljena je površinom ljudskog tela ( $A_T$ )(m<sup>2</sup>), parcijalnim pritiskom vodene pare na temperaturi površine kože ( $P_{sk}$ )(kPa), parcijalnim pritiskom vodene pare na temperaturi vazduha iznad kože ( $P_a$ )(kPa) i ukupnom toplotnom otpornošću odeće i površinskog sloja

vazduha isparavanju vlage ( $R_{ET(tot)}$ ) ( $m^2 \cdot kPa \cdot W^{-1}$ ) prema relaciji 2.4 (Huang, 2006; Stanković, 2012):

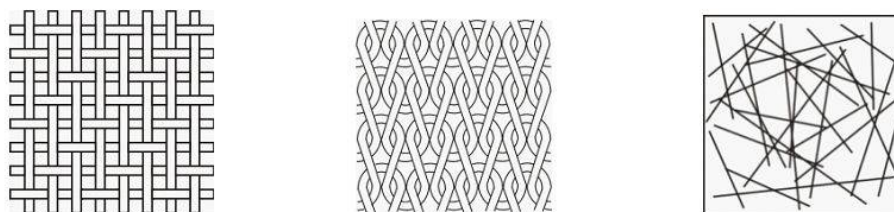
$$H_e = \frac{A_T(P_{sk} - P_a)}{R_{ET(tot)}} \quad (2.4)$$

U slučaju dvoslojnog kompleta odeće, međuprostor formiran unutrašnjim i spoljašnjim slojem tekstilnog materijala dozvoljava mogućnost odvođenja toplog vazduha i vlage ventilacijom. Intenzivnije strujanje vazduha u neposrednom čovekovom okruženju dodatno pojačava efekat ventilacije. Spoljni sloj odeće može da leprša pod dejstvom vetra intenzivirajući ventilaciju, dok se prodiranjem kroz spoljni sloj tekstilnog materijala dovodi hladniji vazduh iz okruženja. U ovakvom slučaju, suva toplota se prenosi kroz prvi sloj odeće da bi dalji prenos toplote osim kondukcije, konvekcije i radijacije uključio i mehanizam ventilacije. Slično, toplota oslobođena isparavanjem znoja posle prvog sloja odeće, pored difuzije i konvekcije kroz spoljni sloj tekstilnog materijala, delom odlazi ventilacijom direktno u blisko okruženje. Propustljivost vazduha i zategnutost tkanine imaju važnu ulogu pri toplotnoj difuziji posebno izraženog kod pletenina (Ramachandran et al., 2010).

Slično efektu vetra, na termoizolaciona svojstva odeće utiče i čovekovo kretanje, odnosno pokreti čovekovog tela. Pokreti čovekovog tela mogu da izazovu sabijanje tekstilnog materijala i da na taj način ubrzaju konvekciju toplote (upumpavaju vazduh između gornjih i donjih slojeva odeće). Termoizolaciona sposobnost kompleta odeće kreće se u intervalu od 10 do 50%, što zavisi od dizajna i veličine odevnog predmeta (Havenith, 1999). Najčešće dolazi do smanjenja za oko 20% zbog oslobađanja upumpanog vazduha na mestima sužena odevnih predmeta (npr. oko vrata, zblobova ili članka na nozi) (McCullough et al., 2009; Stanković, 2009). Zbog toga se za realne uslove vrednosti parametara  $H_d$  i  $H_e$  (relacije 2.3 i 2.4, redosledno), koriguju faktorom površine unutrašnjih slojeva tekstilnih materijala i efektivnim koeficijentom prenosa suve toplote odnosno, toplote isparavanja izazvanog ventilacijom i prodiranjem vetra.

## 2.1 Poroznost tekstilnih materijala - faktor za obezbeđivanje toplotnog komfora

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju (slika 1.1), toplotni komfor odeće je uslovljen nizom parametara, počev od oblika i veličine odevnog predmeta, preko strukturnih i geometrijskih karakteristika tekstilnih materijala i pređa, do morfoloških i geometrijskih karakteristika tekstilnih vlakana. Interakcija navedenih parametara vlakana, pređa i tekstilnih materijala rezultuje odgovarajućim ponašanjem materijala u pogledu prenosa toplote i propuštanja vazduha, vodene pare i tečnosti (tečnog znoja), ili drugim rečima, uslovljava svojstva toplotnog komfora tekstilnih materijala. Dosadašnja saznanja govore u prilog tome da se suštinski, svi navedeni parametri tekstilnih materijala i njihovih strukturnih elemenata (vlakna, pređe) reflektuju na toplotni komfor tekstilnih materijala kroz projektovanje kompleksnog sistema pora u materijalu (Stanković, 2009). Poroznu strukturu tekstilnog materijala sačinjavaju pore koje se međusobno razlikuju po obliku, dimenzijama i karakteru (otvorene pore, kapilare). Različite tehnologije proizvodnje tekstilnih materijala daju različite porozne strukture koje su grafički predstavljene na slici 2.1. Pored specifičnosti tekstilnih struktura koje potiču od različitih tehnika izrade, njihova poroznost je uslovljena geometrijom i svojstvima različitih vlaknastih formi kao osnovnog gradivnog elementa.



a.

b.

c.

Slika 2.1. Šematski prikaz različitih poroznih tekstilnih struktura (a-tkanina, b-pletanina, c-netkani tekstil). (Dubrovski, Brezočnik, 2012)

Porozne tekstilne površine predstavljaju porozne barijere između ljudskog tela i okruženja prilikom razmene toplote i vlage, u cilju postizanja temperaturne ravnoteže. Smatra se da ponašanje tekstilnih materijala prilikom ove razmene u najvećoj meri definišu dva parametra: poroznost i debljina materijala. Generalno, poroznost materijala ( $\varepsilon$ ) (%) se može definisati kao odnos ukupne zapremine šupljina u materijalu ( $V_v$ ) ( $\text{cm}^3$ ) i ukupne zapremine materijala ( $V$ ) ( $\text{cm}^3$ ), kako je predstavljeno relacijom 2.5 (Pan, Sun, 2006).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} \quad (2.5)$$

Zapremina materijala koju čine, zapremina pora i zapremina čvrstih komponenti ( $V_s$ ) ( $\text{cm}^3$ ) izračunava se relacijom 2.6 (Benltoufa et al., 2008).

$$V = V_v + V_s \quad (2.6)$$

Ako se uzme u obzir jednačina za gustinu materijala (relacija 2.7):

$$\beta = V_s / V \quad (2.7)$$

$\beta$  - ispunjenost čvrstom komponentom u materijalu, (izraženog u rasponu od 0 do 1, ili u procentima, %), uz pretpostavku da je masa materijala zapravo masa čvrste komponente, onda je:

$$\rho = m / V \quad (2.8)$$

$\rho$  - gustina materijala,  $m$  - masa materijala,  $V$  - zapremina materijala.

Na ovaj način je tačno definisana poroznost materijala i predstavlja koristan parametar pri poređenju materijala sa istom poroznom strukturom jer daje indicaciju, koji od datih materijala poseduje više pora u svojoj zapremini (Dubrovski, Brezočnik, 2012).

Poroznost tekstilnog materijala ( $P$ ) (%) se definiše kao ukupna količina vazduha u tekstilnom materijalu i može se izračunati na sledeći način (relacija 2.9) (Koblyakov, 1989; Stanković et al., 2008):

$$P = 100 - \frac{\delta}{\rho} \cdot 100 \quad (2.9)$$

gde je  $\delta(\text{g}/\text{m}^3)$  - gustina tekstilnog materijala,  $\rho(\text{g}/\text{m}^3)$  - gustina vlakana.

Poroznu strukturu tekstilnog materijala čine:

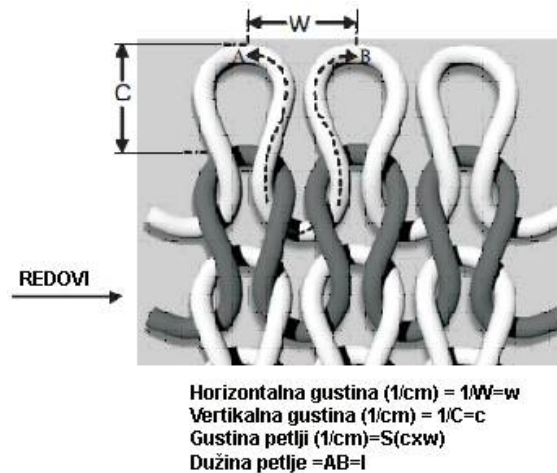
- Mikropore koje predstavljaju ukupnu količinu vazduha u unutrašnjosti pređe (mikroporoznost), i
- Makropore koje predstavljaju ukupnu količinu vazduha između pređa u tekstilnom materijalu. Formirane su preplitanjem dva sistema žica kod tkanina ili jednog sistema žica kod pletenina.

Makropore u materijalu karakterišu njegovu optičku poroznost, makroporoznost ili otvorenu slobodnu površinu.

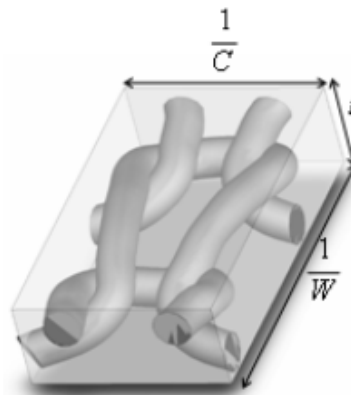
Polazeći od osnovnih karakteristika pletenina (slika 2.2) i oblika petlje (slika 2.3) Benltoufa i sar. (2007) predložili su relaciju za izračunavanje makroporoznosti pletenina (relacija 2.10):

$$\varepsilon_{macro} = 1 - \frac{\pi d^2 l \cdot C_r \cdot W_n}{2t} \quad (2.10)$$

gde je  $t$ (cm) - debljina uzorka,  $l$ (cm) - dužina petlje,  $d$ (cm) - prečnik pređe,  $C_r$  - broj redova petlji po cm,  $W_n$  - broj nizova petlji po cm.



Slika 2.2. Osnovne karakteristike pletenine (Ogulata, Mavruz, 2010)



Slika 2.3. Trodimenzionalni oblik petlje (Benltoufa et al., 2007)



Makroporoznost ili otvorena poroznost pletenina (O) (%) može se izračunati i na sledeći način (Koblyakov, 1989; Stanković, Bizjak, 2014):

$$O = 100 - \frac{\rho_{PL}}{\rho_p} 100 \quad (2.11)$$

gde je  $\rho_p$  (g/cm<sup>3</sup>) - gustina pređe,  $\rho_{PL}$  - gustina pletenine.

Benltoufa i sar. (2007) su u svojim istraživanjima mikroporoznost u pređi definisali sledećom relacijom:

$$\varepsilon_{micro} = 1 - \frac{V_{vl}}{V_{pr}} \quad (2.12)$$

gde je  $V_{vl}$  - zapremina svih vlakana u pređi,  $V_{pr}$  - zapremina pređe. Ako se pojednostavi i pretpostavi da pređe imaju kružni poprečni presek i ravnomeran prečnik, onda je:

$$V_{pr} = \frac{\pi d^2 l}{4} \quad (2.13)$$

gde je  $d$  - prečnik pređe,  $l$  - dužina petlje. Uz pretpostavku da je debljina pletenine jednaka dvostrukom prečniku pređe, odnosno  $d = t/2$ , gde je  $t$  - debljina pletenine, relacija za izračunavanje zapremine pređe dobija sledeći oblik.

$$V_{pr} = \frac{\pi \cdot t^2 l}{16} \quad (2.14)$$

Sledećom relacijom se može izračunati zapremina vlakana u poprečnom preseku pređe:

$$V_{vl} = n \cdot \pi \frac{d_{vl}^2}{4} l \quad (2.15)$$

gde je  $n$  - broj vlakana u poprečnom preseku pređe,  $d_{vl}$  - prečnik vlakna,  $l$  - dužina petlje. Konačno, uvođenjem relacija 2.14 i 2.15 u relaciju 2.16 relacija za izračunavanje mikroporoznosti pletenine dobija sledeći oblik:

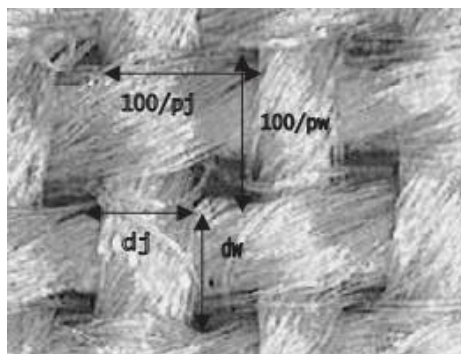
$$\varepsilon_{micro} = 1 - \frac{4n \cdot d_{vl}^2}{t^2} \quad (2.16)$$

Analizom geometrije petlje i proračunom poroznosti osnovnog oblika petlje, formirane od pređe kružnog poprečnog preseka, Benltoufa i saradnici (2007) došli su do konstatacije da dužina petlje u većoj meri utiče na poroznost u poređenju sa gustinom i debljinom pletenine. Utvrđivanje oblika i veličina pora (prečnik, dužina) bazira se na geometrijskim i strukturnim karakteristikama pređa i tekstilnih materijala i gustini pakovanja vlakana, iz čega proističe da geometrija pređe uslovljava kako mikroporoznost, tako i makroporoznost materijala. Prečnik pora je veoma važan parametar za karakterizaciju prostora između vlakana i pređa, i u tom smislu se može reći da je veličina pora značajan parametar koji utiče na ponašanje tekstilnih materijala u pogledu svojstava toplotnog komfora.

Xu i Wang (2005) su za proračun površine jedne pore (S) koristili sledeću jednačinu, koja obuhvata kako parametre pređe, tako i parametre tkanine (relacija 2.17):

$$S = \left( \frac{100}{D_o} - d_j \right) \left( \frac{100}{D_p} - d_w \right) \quad (2.17)$$

gde je  $d_j$  - prečnik osnove (mm),  $d_w$  - prečnik potke (mm),  $D_o$  - gustina osnove (br.osn./10 cm),  $D_p$  - gustina potke (br.pot./10 cm). Ova jednačina daje tačnost sa prosečnom greškom od 12,7 – 13%. Površina jedne pore (S) predstavljena je na slici 2.4.



Slika 2.4. Parametri proračuna površine pore (Xu, Wang, 2005)

Generalno se smatra da su pletenine porozniji materijali u odnosu na tkane strukture i njihova poroznost se kreće u intervalu 60-80%. Povećana poroznost pletenina je posledica njihove specifične građe (slika 2.2). Pored geometrije pređe (poprečni presek, maljavost), poroznost pletenine je uslovljena i površinskom gustinom petlji odnosno, brojem petlji po jedinici površine pletenine. Prilikom razvijanja novog proizvoda, pri projektovanju tekstilnog materijala, uzimaju se u obzir unapred navedeni zahtevi poroznosti kako bi se dobio očekivani proizvod sa adekvatnim ponašanjem u predviđenim okolnostima krajnje primene.

### 3. TOPLOTNA SVOJSTVA TEKSTILNIH MATERIJALA U DINAMIČKIM USLOVIMA

Pored zaštitne funkcije, tekstilni materijali (odeća) predstavljaju dinamički sistem upravljanja i razmene toplote i vlage između ljudskog tela i životnog okruženja u kojem se čovek nalazi, radi njegovog boljeg prilagođavanja uslovima spoljašnje sredine. Tekstilni materijali su u osnovi mešavina sastavljena od vlakana, vazduha i vlage, ali se može reći da vlakna u materijalu imaju dominantnu ulogu u provođenju toplote. Toplotna svojstva tekstilnih materijala predstavljaju značajnu performansu odevnih predmeta koja treba da obezbedi visoke standarde toplotnog komfora u skladu sa namenom odevnog predmeta (sportska, radna, zaštitna odeća i sl.). Usled čestih promena nivoa fizičkih aktivnosti čoveka, ili zbog promene ambijentalne temperature i vlage, nastaju dinamički uslovi u procesu prenosa energije tekstilnim materijalima. Ponašanje tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima može se definisati parametrima kao što su: toplotna apsorptivnost ( $b$ ), maksimalna gustina toplotnog toka ( $q_{\max}$ ) i toplotna difuzivnost ( $a$ ).

#### 3.1 Toplotna apsorptivnost (toplina opipa tekstilnih materijala)

Kontakt koji se uspostavlja između čovekove kože i tekstilnog materijala prilikom nošenja odeće izaziva toplotnu senzaciju (manje ili više topao osećaj), koja se može kvantitativno definisati, i predstavljati ocenu ponašanja tekstilnog materijala u uslovima dinamičke promene temperature. Toplina opipa tekstilnih materijala (koeficijent apsorpcije toplote), definiše osećaj koju tekstilni materijal izaziva u trenutku kontakta sa kožom ljudskog tela i predstavlja prvi doživljeni osećaj prilikom razmene toplote između čovekove šake i tekstilnog materijala. Toplina opipa tekstilnog materijala objašnjava kvalitet tekstilnog materijala procenjen reakcijom indukovanom čulom dodira.

Toplotna apsorptivnost ( $b$ ) je objektivna mera toplotnog osećaja izazvanog temperaturnom razlikom prilikom kontakta tekstilnog materijala i kože ljudskog tela. U slučaju da je temperatura kože veća od temperature tekstilnog materijala, toplota se prenosi na tekstilni materijal, pa osoba doživljava hladan osećaj, i obrnuto, kada je temperatura materijala veća od temperature kože, toplota se prenosi na kožu, pa osoba doživljava topao osećaj (Mangat et al., 2018). Drugim rečima, pri kratkotrajnom kontaktu kože sa tekstilnim materijalom, topliji osećaj daju oni materijali koji apsorbuju manju količinu toplote odnosno, oni koji imaju niže vrednosti toplotne apsorptivnosti. Nasuprot tome, tekstilni materijali sa većom vrednošću toplotne apsorptivnosti obezbeđuju hladniji osećaj pri dodiru sa kožom. Toplotna apsorptivnost ( $b$ ) ( $Ws^{1/2}/m^2K$ ), se izračunava kao kvadratni koren proizvoda toplotne provodljivosti ( $\lambda$ ) ( $W/m\cdot K$ ), gustine tekstilnog materijala ( $\rho_{PL}$ ) ( $kg/m^3$ ), i njegovog specifičnog toplotnog kapaciteta ( $c$ ) ( $J/kg K$ ) prema relaciji 3.1. (Das et al., 2007; Singh et al., 2013).

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho_{PL} \cdot c} \quad (3.1)$$

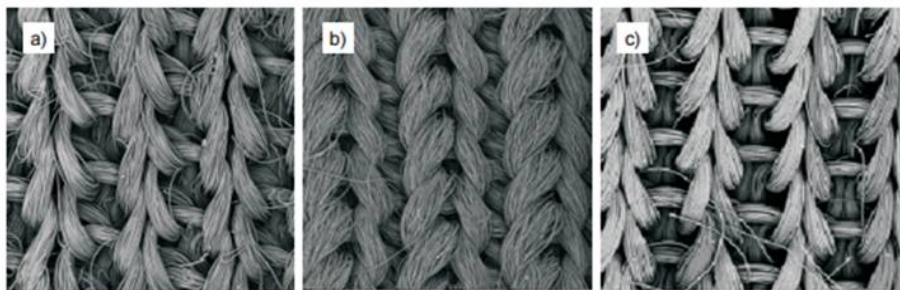
Praktične vrednosti toplotne apsorptivnosti tekstilnih materijala kreću se u intervalu od 20 do 300  $Ws^{1/2}/m^2K$ . Ipak, u literaturi se mogu naći podaci da se vrednosti toplotne apsorptivnosti za tekstilne materijale kreću u intervalu od 20 do 600  $Ws^{1/2}/m^2K$  (Mangat et al., 2018). Najmanje vrednosti toplotne apsorptivnosti (20  $Ws^{1/2}/m^2K$ ) imaju pamučne tkanine, dok se vrednosti toplotne apsorptivnosti vlažnih tekstilnih materijala mogu kretati iznad 600  $Ws^{1/2}/m^2K$ . Neki autori navode da se vrednosti toplotne apsorptivnosti za tekstilne materijale sa mokrom površinom kreću od 330 do 750  $Ws^{1/2}/m^2K$ , a za vlažne tkanine i pletenine toplotna apsorptivnost može biti iznad 1000  $W s^{1/2}/m^2K$  (Onofrei et al., 2012).

Kontakt između kože ljudskog tela i tekstilnog materijala u tesnoj je vezi kako sa morfološkim i strukturnim parametrima vlakana i pređe, tako i sa strukturnim parametrima

tekstilnog materijala (tkanine ili pletenine). Ispitivanjem platiranih pletenina kod kojih su kombinovane dve pređe različitog sirovinskog sastava: pamuk i poliestar, viskoza i poliamid, pamuk i viskoza, došlo se do konstatacije da najveću vrednost toplotne apsorptivnosti odnosno, najhladniji osećaj na dodir ima pletenina kod koje su kombinovane pamučna i poliamidna pređa, što ukazuje da su odevni predmeti izrađeni od ove pletenine pogodni za toplo vreme (leto). Najniže vrednosti toplotne apsorptivnosti, samim tim i topliji osećaj na dodir, imala je pletenina izrađena od kombinovane pređe (pamučne i viskozne pređe), koja se preporučuje za hladno zimsko vreme odnosno, pri niskim temperaturama vazduha (Jhanji et al., 2017). Isti autori su u okviru drugog istraživanja ispitivali uticaj finoće vlakana na toplotnu apsorptivnost pletenina. Konstatovali su da toplotna apsorptivnost opada sa povećanjem debljine vlakana. Korelaciju finoće vlakana i toplotne apsorptivnosti autori (Jhanji et al., 2015a) su objasnili činjenicom da se sa porastom debljine vlakana smanjuje gustina njihovog pakovanja u pređi. Time se smanjuje gustina pletenine, što prema relaciji 3.1 vodi ka smanjenju toplotne apsorptivnosti.

Kaynak i Babaarslan (2016) su ispitivali uticaj finoće poliestarskih filamentnih pređa (od mikromodalnih do filamenata sa konvencionalnim prečnicima) na toplotnu apsorptivnost glatkih pletenina. Konstatovali su blagi porast toplotne apsorptivnosti sa smanjenjem prečnika filamenata međutim, statistički nije potvrđen taj podatak.

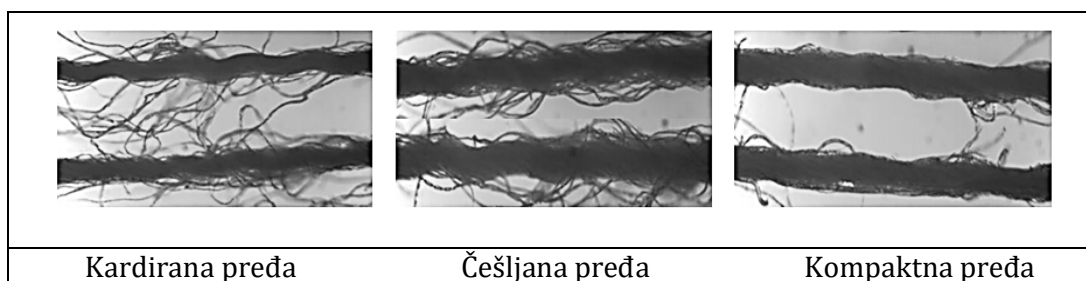
Ispitivanje toplotnih svojstava interlok pletenina izrađenih od teksturiranih i neteksturiranih poliestarskih (PES), filamentnih pređa ispitivali su Ozelik i saradnici (2007). Najveće vrednosti toplotne apsorptivnosti, odnosno najhladniji opip, obezbedile su pletenine izrađene od neteksturirane pređe zahvaljujući glatkoj površini. Upotreba teksturiranih pređa dovela je do povećanja hrapavosti površine pletenina odnosno, do smanjenja dodirne površine između pletenine i kože, što je izazvalo smanjenje njihove toplotne apsorptivnosti. Rezultati istraživanja ovih autora potvrdili su da i tehnika teksturiranja pređa može da utiče na vrednosti toplotne apsorptivnosti. Naime, konstatovali su da se postupkom tzv. lažnog upredanja dobijaju pređe sa izraženijom hrapavošću površine za razliku od postupka air-jet teksturiranja. Pletenine, koje su izrađene od PES pređa teksturiranjem lažnim upredanjem, okarakterisane su najmanjom dodirnom površinom i najnižim vrednostima toplotne apsorptivnosti. Izgled površine ispitivanih interlok pletenina prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Izgled pletenina izrađenih od različitih poliestarskih pređa: a) air-jet teksturana, b) teksturirana lažnim upredanjem, c) neteksturirana pređa (Ozelik et al., 2007)

Upoređivanjem rebrastih pletenina izrađenih od rotorskih (open-end, OE) i prstenastih pređa, Marmarali i saradnici (2009) uočili su značajne razlike u vrednostima toplotne apsorptivnosti. Veće vrednosti toplotne apsorptivnosti ispoljila je pletenina izrađena od OE pređe, što se objašnjava manjom maljavošću ove pređe u poređenju sa prstenastom pređom. Maljavija prstenasta pređa zadržava veću količinu vazduha na površini pletenine, kada je ona u kontaktu sa čovekovom kožom, čime se usporava prenos toplote, a materijal daje topliji opip.

Ispitivanje uticaja različitih tehnoloških postupaka izrade pređe na toplotnu apsorptivnost tekstilnih materijala izveli su Singh i Nigam (2013). Ispitali su toplotna svojstva tkanina kod kojih su za potku koristili kardirane, češljane ili kompaktne pamučne pređe (prikazane na slici 3.2). Ustanovljeno je da tkanina sa potkom od kardirane pamučne pređe daje najmanje vrednosti toplotne apsorptivnosti, zatim sledi tkanina sa češljanom pređom, dok su tkanine sa kompaktnom pamučnom pređom okarakterisane najvišim vrednostima toplotne apsorptivnosti. Time je potvrđen uticaj geometrije površine pređe. Poznato je da se kardirana pređa odlikuje većom maljavošću od češljane pređe, dok takozvano kompaktno pređenje obezbeđuje glatku površinu pređe.



Slika 3.2. Izgled različitih tipova prstenastih pređa (Singh i Nigam, 2013)

Do sličnih zaključaka došli su Jhanji i saradnici (2015a), koji su u svojim istraživanjima koristili platirane pletenine izrađene od kardirane i češljane pamučne pređe. Proučavanjem toplotne apsorptivnosti ovih pletenina potvrđeno je da upotreba kardirane pređe obezbeđuje niže vrednosti toplotne apsorptivnosti u poređenju sa pleteninama od češljane pređe. Razlike u toplotnoj apsorptivnosti ispitivanih pletenina pripisuju se strukturnim razlikama upotrebljenih pređa. Maljavija površina kardirane pređe vodi ka "hrapavijoj" površini pletenine, čime se smanjuje površina kontakta materijala i čovekove kože, i usporava prenos toplote u zoni kontakta.

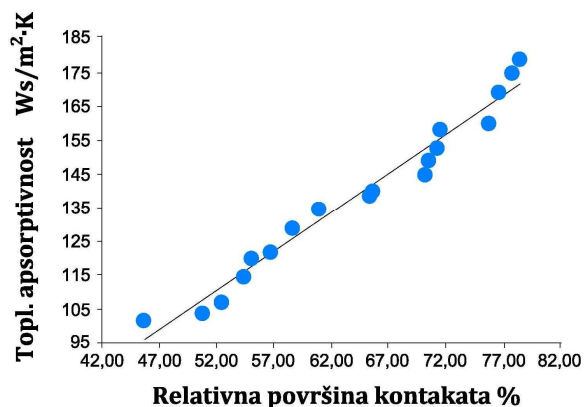
Jhanji i saradnici (2017) i Afzal i saradnici (2017), istraživali su uticaj finoće pređe na toplotnu apsorptivnost pletenina. Obe grupe istraživača su konstatovala da sa smanjenjem debljine pređe dolazi do smanjenja vrednosti toplotne apsorptivnosti. To je posledica povećanja veličine pora u pletenini odnosno, povećanja količine vazduha koji se ponaša kao izolator usporavajući prenos toplote kroz materijal.

Analizom rebrastih pletenina izrađenih od mešavine pamučnih vlakana i vlakana angore konstatovano je da se upotreba vlakana angore preporučuje za mešavine namenjene za izradu odeće za zimski period odnosno, za zaštitu od hladnog vremena jer pri prvom kontaktu sa kožom izaziva topao osećaj. Statistička analiza je pokazala da se uključivanjem 25% angora vlakana u mešavinu značajno menja vrednost toplotne apsorptivnosti (Marmarali et al., 2009).

Ispitivanje toplotne apsorptivnosti glatkih pletenina izrađenih od 100% pamučnih vlakana, mešavine pamuk/modal (1,3 dtex) i pamuk/mikromodal (0,8 dtex), ukazalo je na najmanje vrednosti toplotne apsorptivnosti pamučnih pletenina, dok su najveće vrednosti primećene kod pletenina izrađenih od mešavine pamuk/mikromodal (Gun, 2011). Autor ove rezultate objašnjava uticajem maljavosti pamučnih pređa i finoćom (prečnikom) mikromodalnih vlakana. Površinska svojstva vlakana direktno utiču na svojstva pletenina i toplinu opipa (topao ili hladan) korisnika pletenine. Smatra se da na vrednost toplotne apsorptivnosti u velikoj meri utiče površina kontakta (dodirna površina) kože ljudskog tela i pletenine. Glatka površina pletenine ima veću dodirnu površinu i stvara hladniji osećaj, dok hrapava površina (manji broj dodirnih tačaka) obezbeđuje smanjenu površinu kontakta, što daje topliji osećaj. Povećanjem dužine petlji pletenina smanjuje se tendencija glatkoće njene

površine, i smanjuje se vrednost toplotne apsorptivnosti. Do istih zaključaka su došli Souza i saradnici (2018). Rebraste pletenine se, zbog sadržaja veće količine zarobljenog vazduha u strukturi (koji usporava protok toplote), odlikuju manjim vrednostima toplotne apsorptivnosti u poređenju sa glatkim pleteninama.

Mangat i saradnici (2016) su potvrdili rezultate nekih ranijih istraživanja koja ukazuju na vezu između toplotne apsorptivnosti i veličine dodirne površine između tekstilnog materijala (pletenine) i kože (površina kontakta,  $A_{k-p}$ , relacija 3.2). Dokazali su da postoji direktna veza između broja kontaktnih tačaka pletenine sa susednom površinom i vrednosti njene toplotne apsorptivnosti, što je potvrđeno visokom vrednošću koeficijenta korelacije ( $R^2=0,969$ ), (slika 3.3).



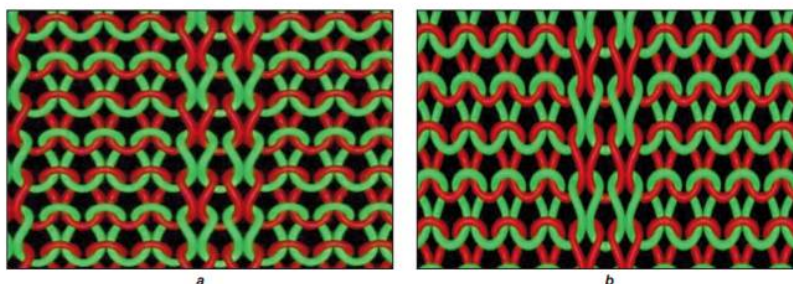
Slika 3.3. Toplotna apsorptivnost (b) i kontaktna površina pletenina (Mangat et al., 2016)

Time je potvrđena i konstatacija drugih autora (Pac et al., 2001), da se sa povećanjem broja kontaktnih tačaka povećava broj "kanala" za prenos toplote. Pošto se rebraste površine pletenina odlikuju manjim brojem dodirnih tačaka u poređenju sa glatkim površinama, to je osnovni razlog što se ove pletenine često biraju za proizvodnju donjeg rublja. Zavisno od strukture rebraste pletenine (npr. 1:1, 2:2, 4:2 i sl.), kontaktna površina između ljudske šake i rebraste pletenine može da iznosi od 20% do 80% (Mangat et al., 2016). U njihovim daljim istraživanjima ovi autori su, radeći sa rebrastim pleteninama različite strukture (pojedine od njih su prikazane na slici 3.4; broj nizova petlji u „rebrima“ pletenine je 3:2 za pleteninu na slici 3.4a, i 4:2 za pleteninu na slici 3.4b) izrađene od poliestarske pređe, predložili model za izračunavanje toplotne apsorptivnosti rebrastih pletenina na osnovu geometrijskih parametara pletenine i vrednosti toplotne apsorptivnosti polimera (poliestra u konkretnom slučaju) (Mangat et al., 2017).

$$b = b_p \cdot A_{k-p} (1 - P_p) \quad (3.2)$$

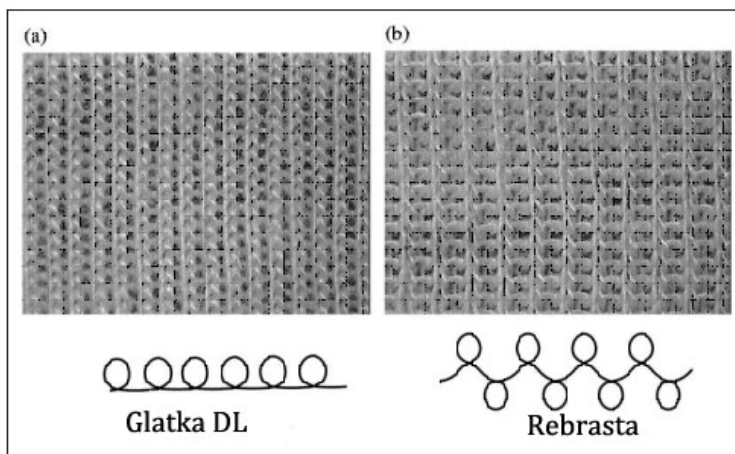
gde je  $b$  - toplotna apsorptivnost pletenine ( $Ws^{1/2}/m^2K$ ),  $b_p$  - toplotna apsorptivnost poliestra,  $P_p$  - poroznost pletenine,  $A_{k-p}$  - površina kontakta između ljudske kože i površine pletenine. Vrednost toplotne apsorptivnosti poliestera izračunata je korišćenjem standardnih vrednosti toplotne provodljivosti, gustine i specifičnog toplotnog kapaciteta poliestera u čvrstom obliku. Autori smatraju da ovakav pristup omogućuje da se izračuna i unapred predvidi toplotna apsorptivnost bilo kog tekstilnog materijala. Tako, na osnovu promenljive površine pletenine (od 45-89%) proizvođač može imati jasnu ideju o tome koja je kontaktna površina pletenine bolja za korisnika u smislu boljeg komfora u datim okolnostima.





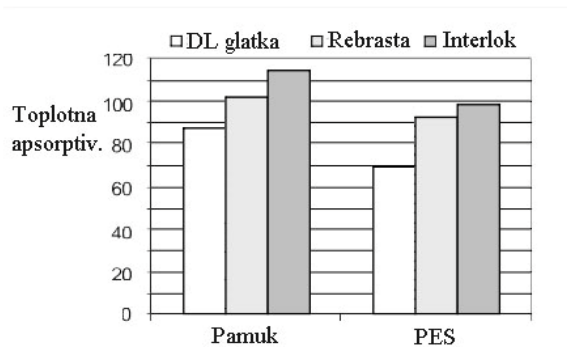
Slika 3.4. Model nekih ispitivanih uzoraka rebrastih pletenina: 3:2(a); 4:2 (b); (Mangat et al., 2017)

Toplotnu apsorptivnost glatkih i rebrastih pletenina izrađenih od mešavine vlakana pamuk/viloft (regenerisano celulozno vlakno) i poliestar/viloft, ispitivali su Demiryurek i Uysalturk (2013). Konstatovali su da povećanjem udela viloft vlakana u mešavinama dolazi do povećanja vrednosti toplotne apsorptivnosti, posebno glatkih pletenina. Pored toga, veće vrednosti toplotne apsorptivnosti rebrastih pletenina u poređenju sa glatkim DL pleteninama objasnili su povećanjem debljine i mase, što je posledica osnovnih konstrukcionih karakteristika rebrastih pletenina (slika 3.5). Takođe i broj rebara kod rebrastih pletenina utiče na vrednost toplotne apsorptivnosti. Deblja pletenina sa većom površinskom masom sadrži veću količinu vlakana, što povećava toplotnu apsorptivnost ili protok toplote od kože ka materijalu.



Slika 3.5. Struktura 100% viloft pletenine: glatke (a), rebraste (b) (Demiryurek, Uysalturk, 2013)

Oglakcioglu i Marmarali (2007) su ispitivali toplotnu apsorptivnost glatkih, rebrastih i interlok (pamučnih i poliestarskih) pletenina. Pokazalo se da je redosled pletenina od glatke DL sa najmanjom toplotnom apsorptivnošću, preko rebraste, do interlok pletenine sa najvećom toplotnom apsorptivnošću, i to za obe primenjene sirovine (slika 3.6). Ovo se objašnjava činjenicom da interlok pletenine imaju najglatkiju površinu, u odnosu na ostale ispitivane strukture, koja obezbeđuje brže provođenje toplote.

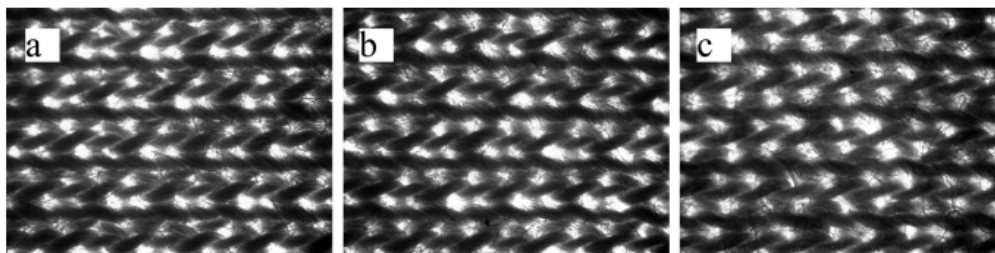


Slika 3.6. Toplotna apsorptivnost pletenina različite strukture (Oglakcioglu, Marmarali, 2007)

Onal i Yildirim (2012) su ispitivali toplotnu apsorptivnost 3D pletenina uz određeni procenat učešća Outlast® vlakana. Pokazalo se da se toplotna apsorptivnost ovih pletenina gotovo linearno povećava sa povećanjem udela Outlast® vlakana, što se pripisuje njihovim funkcionalnim svojstvima. Naime, ova vlakna sadrže toplotno-adaptivne materije koje apsorpcijom viška generisane toplote održavaju zadovoljavajući toplotni komfor. Zbog toga, autori upućuju na upotrebu pletenina sa glatkom površinom i većim sadržajem Outlast® vlakana u cilju obezbeđivanja hladnijeg opipa.

U okviru ispitivanja uticaja vrste prepletaja na toplotnu apsorptivnost tkanina, Frydrych i saradnici (2002), su utvrdili da tip prepletaja direktno uslovljava vrednost toplotne apsorptivnosti tkanine kroz efekat koji prepletaj ima na geometriju njene površine. Upoređujući tkanine u platno, panama i keper prepletaju, konstatovali su da najniže vrednosti toplotne apsorptivnosti imaju keper tkanine a najveće tkanine u platno prepletaju, zbog njihove glatke površine.

Konstataciju o razlici toplotne apsorptivnosti lica i naličja tkanina, u keper prepletaju dala je Matusiak (2006). Tako je vrednost toplotne apsorptivnosti desne strane (lica) tkanine u trožičnom keper prepletaju (2/1) veća u odnosu na naličje tkanine. U okviru ovog istraživanja autorka je potvrdila uticaj boje tekstilnog materijala na njegovu sposobnost apsorpcije toplote. Žuto obojena tkanina pokazala je najmanju vrednost toplotne apsorptivnosti, a prate je crveno i tamno plavo obojene tkanine.



Slika 3.7. Struktura pletenina sa različitim dužinom petlje: 3,33 mm (a); 3,38 mm (b); 3,68 mm (c) (Afzal et al., 2017)

Istraživanja su pokazala da povećanje dužine petlje (dužina pređe potrebne za izradu jedne petlje) doprinosi snižavanju toplotne apsorptivnosti pletenina. To objašnjava činjenica da sa povećanjem dužine petlje dolazi do snižavanja površinske gustine pletenine (broj petlji na jedinici površine pletenine). Pored toga, sa smanjenjem površinske gustine pletenine povećava se poroznost odnosno, dolazi do smanjenja njene gustine (slika 3.7)(Afzal et al.,



2017). Prema definiciji (relacija 3.1), toplotna apsorptivnost je direktno proporcionalna toplotnoj provodljivosti i gustini pletenine. Do istog zaključka došli su Jhanji i saradnici (2017) dok su ispitivali toplotna svojstva platiranih pletenina izrađenih od pamučne pređe na licu pletenine i poliestarskog, poliamidnog ili viskoznog filameta na naličju pletenine.

Pavlović i saradnici (2014) u svom istraživanju su upoređivali pletenine od pamuka, viskoze i konoplje sa pleteninama istih konstrukcionih karakteristika izrađenih od mešavine ovih vlakana (pamuk/konoplja, viskoza/konoplja). Konstatovano je da su pletenine od čiste konoplje okarakterisane najmanjom toplotnom apsorptivnošću, dok se kod mešavina vrednost toplotne apsorptivnosti povećava. Najveće vrednosti toplotne apsorptivnosti su zapažene kod mešavine pamuk/konoplja. Dobijeni rezultati su jasno pokazali da čak i male strukturne razlike pletenina, koje su prouzrokovane određenim razlikama u geometriji pređa, utiču na ponašanje pletenina tokom dinamičke faze prenosa toplote. Pored toga, autori su pokazali da se kombinovanjem sirovina različitog toplotnog kapaciteta mogu projektovati materijali sa toplotnom apsorptivnošću u skladu sa njihovom namenom.

Uticao sposobnosti propuštanja tečnosti pletenina na njihovu toplotnu apsorptivnost izučavali su Oglakcioglu i saradnici (2011). Ispitivali su specijalne dvoslojne pletenine sa različitim kombinacijama pređa na licu i naličju pletenine: pamuk-pamuk, pamuk-polipropilen, polipropilen-pamuk i polipropilen-polipropilen. Rezultati njihovog ispitivanja su pokazali da se vrednosti toplotne apsorptivnosti suvih uzoraka kreću u intervalu 50 - 150  $Ws^{1/2}/m^2K$ , dok se toplotna apsorptivnost pokvašenih uzoraka povećava i kreće u intervalu 150 - 300  $Ws^{1/2}/m^2K$ . Povećanje toplotne apsorptivnosti pokvašenih pletenina autori objašnjavaju povećanjem toplotne provodljivosti pletenina, jer je toplotna provodljivost vode znatno veća u odnosu na toplotnu provodljivost vazduha, čime se ubrzava prenos toplote. Pored toga, rezultati su pokazali da se pletenine sa polipropilenskim filamentom na naličju pletenine (strana koja je u kontaktu sa kožom) i pamukom na licu, koja se odlikuje najboljim svojstvima upravljanja tečnostima (brzo odvodi vlagu sa površine koja je u kontaktu sa kožom), odlikuju toplijim opipom, odnosno nižom toplotnom apsorptivnošću u poređenju sa ostalim uzorcima.

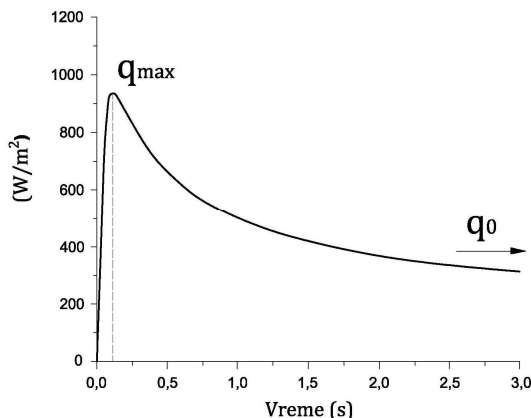
Frydrych i saradnici (2002) ispitivali su kako različiti postupci oplemenjivanja tekstilnih materijala utiču na toplotnu apsorptivnost, budući da je ovo svojstvo u tesnoj vezi sa geometrijom površine materijala. Proučavajući Tencel® (regenerisana celulozna vlakna) i pamučne tkanine, zapazili su da različite obrade tkanina „diktiraju“ različite vrednosti toplotne apsorptivnosti.

Erdumlu i Saricam (2017) su ispitivali pletenine od poliakrilnih vlakana namenjene za zimsku odeću. Ove pletenine se razlikuju po strukturi, debljini i poroznosti (glatke DL, interlok 1x1, i rebraste 1x1 i 2x2). Potvrđeno je da struktura i gustina pletenine utiču na kontaktnu površinu pletenine, kao i vrednosti toplotne apsorptivnosti. Pri tome, struktura rebrastih pletenina obezbeđuje optimalne uslove u smislu termoregulacije, propustljivosti vazduha i toplotnog komfora. Rebraste pletenine 2x2 su okarakterisane najnižim vrednostima toplotne apsorptivnosti, a samim tim i toplijim osećajem na dodir zbog kojeg se preporučuju za zimski period. Osnovni njihov zaključak je da je neophodno prilagoditi vrednosti debljine i poroznosti pletenine, jer debljina poboljšava toplotnu izolaciju a poroznost uslovljava propustljivost vazduha.

### 3.2 Maksimalna gustina toplotnog toka

Maksimalna gustina toplotnog toka, ( $q_{max}$ ) ( $W/m^2$ ) je parametar koji predstavlja objektivnu meru toplotnog opipa u momentu kontakta tekstilnog materijala i čovekove kože. Maksimalna vrednost ovog parametra postiže se u trenutku kontakta tekstilnog materijala i kože (slika 3.8, Zhu et al., 2012). Kontakt između tekstilnog materijala i kože ljudskog tela u prelaznom periodu može se definisati pomoću maksimalnog toplotnog fluksa  $q_{max}$  u vremenu

$t_{max}$ , pri čemu veća vrednost maksimalnog toplotnog toka ukazuje na hladniji opip pri dodiru (kontaktnu). Vreme  $t_{max}$  predstavlja brzinu kojom se topao ili hladan osećaj prenosi kroz kožu. Period ravnotežnog toka toplote opisuje se parametrom  $q_0$  (toplotni tok u ravnotežnom stanju), pri čemu se većoj vrednosti ovog parametra pripisuje hladniji opip.



Slika 3.8. Kriva toplotnog toka pri kontaktu tekstilnog materijala i kože (Zhu et al., 2012)

Zhu i saradnici (2012) su u svom eksperimentu pretpostavili početnu temperaturu kože ( $T_s=32$  °C), temperaturu tela ( $T_H=36$  °C) i spoljašnju temperaturu ( $T_0=26$  °C), prilikom analize toplotnog toka u kontaktu tekstilnog materijala i kože. Ustanovili su da se odmah nakon kontakta toplotni tok izuzetno brzo povećava zahvaljujući velikoj početnoj temperaturnoj razlici između tkanine i kože, i dostiže svoju maksimalnu vrednost  $q_{max}$  u vremenu od  $t_{max} = 0,1$ s.

Gunesoglu i Meric (2006) smatraju da je potrebno vreme od 0,2 s da bi nakon kontakta tekstilnog materijala i kože toplotni tok dostigao svoju maksimalna vrednost ( $q_{max}$ ). Nakon postignute maksimalne vrednosti toplotnog fluksa, razlika u temperaturi se postepeno smanjuje, i toplotni fluks približava ravnotežnoj vrednosti ( $q_0$ ) u vremenu  $t > 200$  s. U ravnotežnom stanju sistema tok toplote ima konstantnu vrednost, prema jednačini (3.3).

$$q_0 = T_H - T_0 / R_{T,tot} \quad (3.3)$$

gde je ( $T_H$ ) - temperatura tela i ( $T_0$ ) - spoljašnja temperatura,  $R_{T, tot}$  - ukupna toplotna otpornost.

Iz prethodnog razmatranja može se uočiti analogija u pogledu uticaja karaktera površine tekstilnog materijala i parametara koji definišu njegovo toplotno ponašanje u dinamičkim uslovima - toplotna apsorptivnost i maksimalna gustina toplotnog toka. To su eksperimentalno potvrdili Ozcelik i saradnici (2007), koji su poredili vrednosti ovih parametara pletenina izrađenih od teksturiranih i neteksturiranih pređa. Ustanovljeno je da su vrednosti maksimalne gustine toplotnog toka veće za pletenine koje su izrađene od neteksturiranih pređa, i koje se odlikuju glatkijom površinom. Istraživanja su pokazala da je maksimalna gustina toplotnog toka tkanina uslovljena konfiguracijom vlakana u pređi, odnosno geometrijom pređe od koje je izrađena.

Singh i Nigam (2013) su analizirali uticaj tipa pređe (vlačena, češljana i kompaktna pređa) na maksimalnu gustinu toplotnog toka. Konstatovali su porast vrednosti ovog parametra počev od kardiranih, preko češljanih, do kompaktnih pređa. Ovakav rezultat objašnjavaju porastom gustine pakovanja vlakana u kompaktnoj pređi, uz glatku površinu pređe, što vodi ka glatkijoj površini tkanine i njenom hladnijem opipu. Na osnovu dobijenih

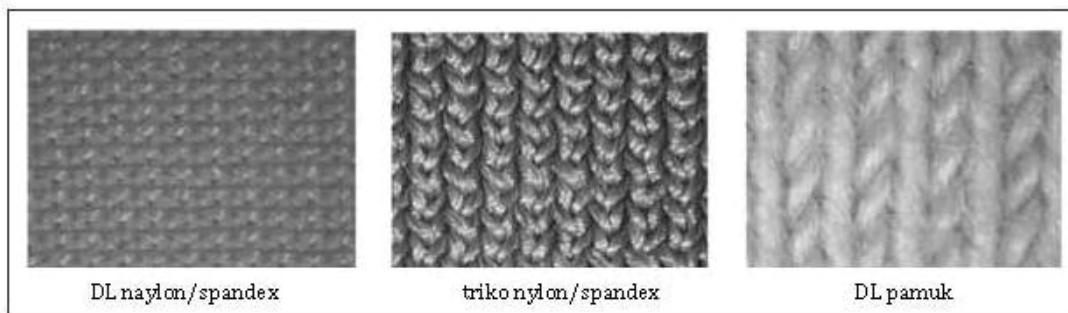
rezultata autori zaključuju da struktura, finoća i površinska svojstva pređe predstavljaju efikasan alat za manipulisanje toplo-hladnim osećajem tkanina (Singh, Nigam, 2013).

Analizirajući toplotna svojstva tkanina izrađenih od pamučne konvencionalne prstenaste pređe i EliTe® kompaktne pređe, Das i saradnici (2007a) su konstatovali da veća vrednost maksimalne gustine toplotnog toka ( $q_{max}$ ) govori o većem intenzitetu toplo/hladnog osećaja prilikom nošenja odeće. Takođe, potvrdili su da na vrednosti maksimalne gustine toplotnog toka  $q_{max}$ , utiču površina kontakta između izvora toplote (kože) i površine tkanine. Tako, tkanine izrađene od EliTe® pređa imaju veće vrednosti  $q_{max}$  za razliku od „konvencionalno“ pređenih pređa. Uzorak tkanine u platno prepletaju (ravna površina), uz najmanju debljinu, okarakterisan je najvećom vrednošću  $q_{max}$ , dok se keper tkanine odlikuju nižim vrednostima  $q_{max}$ . U svakom slučaju, ustanovljeno je da upotreba EliTe® pređa predstavlja prednost u poređenju sa „konvencionalnim,“ pređama u smislu poboljšanja karakteristika komfora pamučnih tkanina (Das et al., 2007a).

Vivekanadan i saradnici (2011) su ispitivali uticaj pranja tkanina na toplotni osećaj i maksimalnu gustinu toplotnog toka ( $q_{max}$ ). Uticaj strukturnih parametara tkanina, kao što su debljina, gustina i pokriveni faktor, na toplotni osećaj pripisuje se postojanju korelacije pokrivenog faktora i debljine tkanina. Deblje tkanine imaju veći pokriveni faktor i relativno neravnomernu površinu koja obezbeđuje topliji opip, dok glatke, ravne površine daju veće vrednosti  $q_{max}$ . Uz potvrdu da se  $q_{max}$  povećava sa povećanjem glatkoće površine tkanine, autori su zaključili da proces pranja tkanina utiče na vrednosti  $q_{max}$  tako što se pranjem generalno poboljšava  $q_{max}$  usled uklanjanja enzimskih i drugih primesa.

Gun (2011) je ispitivao uticaj finoće vlakana i dužine petlji na maksimalnu gustinu toplotnog toka ( $q_{max}$ ). Konstatovao je da se smanjenjem finoće vlakana smanjuje maksimalna gustina toplotnog toka. Pletenine od mikromodalnih vlakana finoće 0,8 dtex imaju najveću vrednost maksimalnog toplotnog toka dok, najniže vrednosti ovog parametra imaju uzorci od modalnih vlakana finoće 1,3 dtex. Jedno od mogućih objašnjenja može biti veza između finoće vlakana i dužine petlje. Smanjenjem dužine petlje povećava se vrednost maksimalne gustine toplotnog toka ( $q_{max}$ ).

Park i saradnici (2018) su ispitivali toplotne karakteristike pletenina izrađenih od kombinacija specijalno profilisanih poliamidnih vlakana sa drugim vlaknima (spandex, poliestar) i poredili ih sa homogenim pleteninama (100% poliestar i 100% pamuk). Utvrđen je porast vrednosti parametra  $q_{max}$  za pletenine koje su sadržale profilisana poliamidna vlakna, ali je pri tome potvrđena i korelacija strukturnih karakteristika pletenina i maksimalne gustine toplotnog toka. Različita hrapavost uzoraka pletenina uticala je na vrednost  $q_{max}$  na način da se sa povećanjem hrapavosti vrednost  $q_{max}$  smanjuje. Tako je vrednost  $q_{max}$  za uzorak glatke DL pamučne pletenine veoma mala u poređenju sa uzorcima glatke DL i triko (osnovoprepletaće) poliamid-spandex pletenina, čiji je izgled prikazan na slici 3.9.



Slika 3.9. Izgled različitih uzoraka pletenina (Park et al., 2018)

### 3.3 Toplotna difuzivnost (brzina provođenja toplote)

Toplotna difuzivnost ( $\alpha_d$ ) ( $m^2/s$ ) se definiše kao brzina širenja toplote kroz tekstilni materijal. Tekstilni materijali koji se odlikuju većom vrednošću toplotne difuzivnosti brže će dostići toplotnu ravnotežu sa okruženjem. Drugim rečima, materijali sa visokim vrednostima toplotne difuzivnosti brzo reaguju na promene, toplota se brzo kreće kroz materijal i nije potrebno puno energije iz okoline da bi se postigla toplotna ravnoteža. Toplotna difuzivnost je definisana relacijom (Ramachandran et al., 2010):

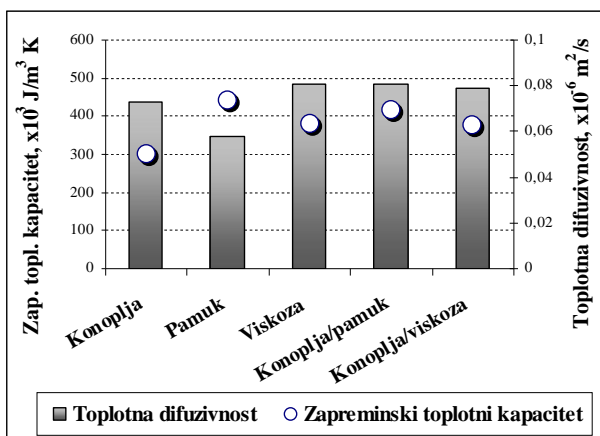
$$\alpha_d = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3.4)$$

gde je  $\alpha_d$  - toplotna difuzivnost ( $m^2/s$ ),  $\lambda$  - toplotna provodljivost ( $W/m \cdot K$ ),  $\rho$  - gustina materijala ( $kg/m^3$ ),  $c$  - specifični toplotni kapacitet ( $J/kg \cdot K$ ).

S obzirom da je toplotna difuzivnost ( $\alpha_d$ ), kao i toplotna apsorptivnost ( $b$ ), uslovljena specifičnim toplotnim kapacitetom i gustinom tekstilnog materijala, ova dva parametra se mogu dovesti u vezu sledećom relacijom (Onal, Yildirim, 2012):

$$\alpha_d = \left( \frac{\lambda}{b} \right)^2 \quad (3.5)$$

Ispitivanjem glatkih i rebrastih pletenina od mešavine pamuk/viloft i poliestar/viloft, došlo se do saznanja da se sa proporcionalnim povećanjem udela viloft vlakna u mešavinama smanjuje vrednost toplotne difuzivnosti pletenina. Autori su to doveli u vezu sa brazdastom površinom viloft vlakna, čime se povećava njena specifična površina i raste otpor prostiranja toplotnog impulsa (Demiryurek, Uysalturk, 2013).



Slika 3.10. Toplotna difuzivnost ( $\alpha_d$ ) pletenina izrađenih od prirodnih i regenerisanih celuloznih vlakana (Pavlović et al., 2014)

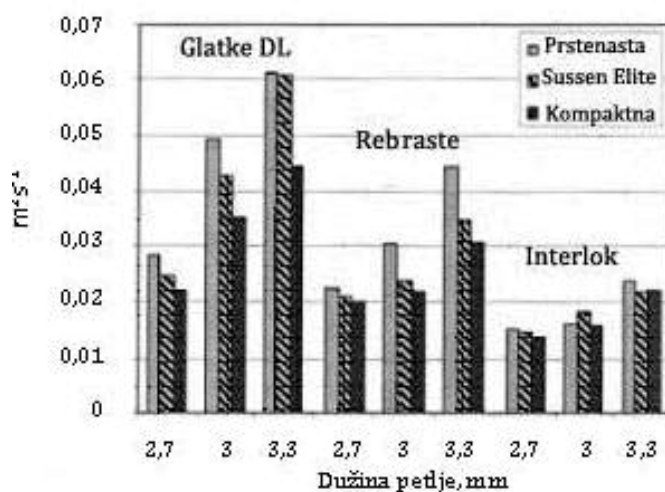
Polazeći od činjenice da je toplotna difuzivnost materijala proporcionalna njegovoj toplotnoj provodljivosti i obrnuto proporcionalna njegovom zapreminskom toplotnom kapacitetu (proizvod gustine i specifičnog toplotnog kapaciteta), Pavlović i saradnici (2014) su u svom istraživanju poredili pletenine homogenog sirovinskog sastava (pamuk, viskoza, konoplja) sa pleteninama istih konstrukcionih karakteristika izrađenih od mešavine istih vlakana (pamuk/konoplja, viskoza/konoplja). Pokazali su da se kombinovanjem sirovina različitog toplotnog kapaciteta mogu projektovati materijali sa „novom“ vrednošću toplotne

difuzivnosti. Tako je na primer, konoplja/pamuk pletenina okarakterisana većom vrednošću toplotne difuzivnosti u poređenju sa homogenim pleteninama (100% konoplja i 100% pamuk), kako je ilustrovano na slici 3.10 (Pavlović i sar., 2014).

Souza i saradnici su ispitivanjem glatkih pletenina izrađenih od različitih funkcionalnih poliestarskih (Craque<sup>®</sup>, Finecool<sup>®</sup>, Coolmax<sup>®</sup>, Holofiber<sup>®</sup>, Airclo<sup>®</sup>, Trevira<sup>®</sup>) i viskoznih pređa (Craque<sup>®</sup>, Seacell<sup>®</sup>) konstatovali da se sve poliestarske pletenine odlikuju većom toplotnom difuzivnošću u poređenju sa viskoznim pleteninama. Pri tome, Airclo<sup>®</sup> i Finecool<sup>®</sup> pređe su obezbedile pleteninama najveće vrednosti toplotne difuzivnosti. Airclo<sup>®</sup> pređa se karakteriše prisustvom šupljine u centru filameta, a Finecool<sup>®</sup> pređa se odlikuje velikom brzinom sušenja. Obe pređe se odlikuju velikom poroznošću i velikom količinom vazduha u strukturi, čime se objašnjava njihova toplotna difuzivnost. Nasuprot tome, viskozna Seacell<sup>®</sup> pletenina ima najniže vrednosti toplotne difuzivnosti zbog velike gustine Seacell<sup>®</sup> pređe (Souza et al., 2018).

Istraživanja su pokazala da je toplotna difuzivnost tekstilnog materijala uslovljena konfiguracijom ili geometrijom pređe od koje je izrađena. Tako su Singh i Nigam (2013) analizirali uticaj tipa pređe (vlačena, češljana i prstenasta kompaktna pređa) na toplotnu difuzivnost tkanina (platno prepletaj) i konstatovali su povećanje vrednosti toplotne difuzivnosti počev od kardiranih preko češljanih, do kompaktnih pređa. To se može objasniti činjenicom da sa porastom gustine pakovanja vlakana u pređu, raste i njena toplotna konduktivnost, a to dalje izaziva porast toplotne difuzivnosti (Singh, Nigam, 2013).

Multivarijacionom analizom Ramachandran i saradnici (2010) su analizirali toplotnu difuzivnost pletenina različite strukture (glatke DL, rebraste i interlok) izrađene od različitih pređa (prstenaste, nekonvencionalne – Suessen Elite, i kompaktna), uz variranje dužine petlje (slika 3.11). Pokazali su da kada se radi o pleteninama, upotreba kompaktna pređe sa središnjom strukturom i većom gustinom pakovanja vlakana, doprinosi smanjenju toplotne difuzivnosti. Upoređujući glatke, rebraste i interlok pletenine ovi autori su pokazali da glatke pletenine imaju najveće vrednosti toplotne difuzivnosti, praćene rebrastim, dok se interlok pletenine odlikuju najmanjim vrednostima. Ovo objašnjavaju povećanjem debljine i površinske mase, što je svojstveno rebrastim, a posebno interlok pleteninama. Pored toga, potvrđena je statistički značajna zavisnost dužine petlje i toplotne difuzivnosti, pri čemu sa povećanjem dužine petlje raste toplotna difuzivnost (Ramachandran et al., 2010).



Slika 3.11. Toplotna difuzivnost pletenina različitih struktura (Ramachandran et al., 2010)

Matusiak (2006) je u svom istraživanju pokazala da vrednost toplotne difuzivnosti opada sa povećanjem površinske mase tkanine. Pored toga, ustanovljeno je da se, zavisno od primenjenog prepletaja, vrednosti toplotne difuzivnosti lica i naličja tkanine mogu razlikovati.

Frydrych i saradnici (2002), ispitivanjem toplotne difuzivnosti pamučnih tkanina, različitih prepletaja (platno, panama i keper), utvrdili su redosled prepletaja prema rastućoj toplotnoj difuzivnosti: platno, panama i keper prepletaj. Pored toga, pokazali su u svom radu da različiti postupci dorade tkanina (enzimske obrade, obrada protiv gužvanja, skrobljenje) mogu da modifikuju njihovu toplotnu difuzivnost, ali bez jasno utvrđenih zavisnosti.

U okviru istraživanja koje je sproveo Gun (2011), glatke DL pletenine su bile proizvedene od tri vrste pređa iste finoće ali izrađenih od modalnih vlakana različite finoće: konvencionalna vlakna finoće 1,3 dtex, i dva mikromodalna vlakna finoće 0,8 i 1,0 dtex. Rezultati ispitivanja su pokazali da finoća vlakana ima značajan uticaj na vrednosti toplotne difuzivnosti pletenina, pri čemu smanjenje finoće vlakana izaziva smanjenje toplotne difuzivnosti. To je pripisano efektu povećanja gustine pletenine u slučajevima manje debljine vlakana, koja je suprotno proporcionalna toplotnoj difuzivnosti (relacija 3.5). Gun je u istom istraživanju ukazao na dužinu petlje kao konstrukcioni parametar pletenine koji može imati uticaj na vrednosti toplotne difuzivnosti. Pokazalo se da pletenina sa najdužim petljama ima najveću toplotnu difuzivnost, što je pripisano najmanjoj gustini ove pletenine.

#### 4. SVOJSTVA UPRAVLJANJA TEČNOŠĆU I VLAGOM

U svakodnevnom životu ljudski organizam se vrlo često nalazi u neravnotežnim uslovima odnosno, dinamičkoj interakciji sa okruženjem. Da bi telo održalo toplotnu ravnotežu sa okruženjem, veoma je važno da se toplota odvodi od tela, ili da se sačuva, u skladu sa uslovima okruženja. Gledano sa aspekta toplotnog komfora, od odevnih tekstilnih materijala se očekuje da aktivno podržavaju termoregulacioni sistem ljudskog tela u smislu održavanja adekvatne temperature ("normalne" temperature tela do 37 °C), uz zadržavanje što je moguće manje količine vlage u mikroklimi. Sposobnost prenosa toplote i difuzije vlage odevnih tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima je od velike važnosti, s obzirom na činjenicu da je ljudsko telo izloženo stalnim klimatskim promenama, (temperaturnim, promenama vlažnosti vazduha), kao i stalnim promenama fizičke aktivnosti. Odvođenje znoja sa površine kože je od fundamentalnog značaja za termodinamičku ravnotežu, i osnovni je zadatak odeće da omogući oslobađanje vlage sa površine kože obezbeđujući prenos i isparavanje znoja. Neki autori smatraju da znojenje i isparavanje znoja odnosno odvođenje znoja od kože predstavlja ključni mehanizam hlađenja ljudskog tela (Hu et al., 2005). Proces prenosa tečnosti kroz tekstilne materijale može se odvijati u dve faze:

- Prenos tečnosti kroz tekstilne materijale u ravnotežnim uslovima i
- Prenos tečnosti kroz tekstilne materijale u neravnotežnim (dinamičkim) uslovima.

Ravnotežno stanje sistema podrazumeva održavanje ravnoteže u razmeni energije i mase sa okruženjem. Ravnotežni procesi se definišu kao procesi kod kojih se karakteristike sistema ne menjaju sa vremenom, tj. protok mase i energije su ovde konstantni, što bi značilo da se u ravnotežnim uslovima tečnost prenosi stalnom brzinom kroz tekstilne materijale u pravcu gradienta koncentracije koji se ne menja sa promenom vremena. Pri uobičajenim fizičkim aktivnostima i neekstremnim klimatskim uslovima ("normalnim" uslovima), telo oslobađa vodenu paru odnosno, dolazi do latentnog (neprimetnog) znojenja, ili drugim rečima, isparavanja vlage u obliku vodene pare. Pri ravnotežnim uslovima, toplota koju ljudski organizam proizvede oslobađa se sa površine kože i prenosi kroz tekstilni materijal kondukcijom, konvekcijom i radijacijom (suva toplota), i difuzijom i konvekcijom (toplota oslobođena isparavanjem znoja - toplota isparavanja), (Stanković, 2012).

Bilo da je čovek svestan ili ne, znojenje se odvija sve vreme, a ne samo tokom perioda intenzivne aktivnosti. Iz tog razloga odeća ima zadatak da prenosi vlagu (paru ili tečnost) sa površine kože i isparava je, što je brže moguće, na spoljnu površinu odnosno, u atmosferu. Znoj se prvobitno pojavi na površini kože u vidu tečnosti koja veoma brzo prelazi u vodenu paru (Manshahia, Das, 2013).

U zavisnosti od agregatnog stanja (para ili tečnost), znoj se prenosi različitim fizičkim mehanizmima kroz tekstilne materijale. U ravnotežnim uslovima, pri odsustvu temperaturnog gradijenta i gradijenta koncentracije vlage, prisutan je stalni prenos vlage u obliku pare. Vodena para se može preneti kroz slojeve tekstilnog materijala (odeće) različitim procesima: difuzija, apsorpcija-desorpcija i prisilna konvekcija (Das et al., 2007b). Proces difuzije obuhvata molekulsku difuziju kroz vlakna, površinsku difuziju molekula adsorbovanih na površini vlakana i molekulsku difuziju kroz pore u materijalu. Smatra se da je u ravnotežnim uslovima dominantno propuštanje vlage kroz tekstilne materijale difuzijom kroz pore materijala (prostore između vlakana i pređe), i može se reći da se odvija nesmetano, uz neznatan uticaj sorpcionih svojstava vlakana, za razliku od usporene difuzije vlage kroz vlakna (Stanković, 2009).

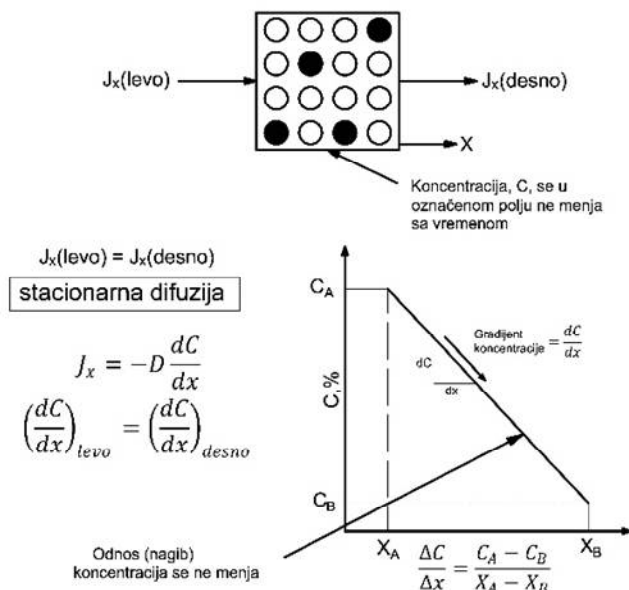
Difuzija vlage predstavlja spontani proces prenosa vlage iz oblasti veće koncentracije u oblast manje koncentracije u cilju uspostavljanja ravnotežnog stanja. Difuzija se definiše kao glavni mehanizam prenosa vlage gde gradijent napona pare deluje kao pokretačka snaga u prenosu vlage sa jedne na drugu stranu materijala (Jere et al., 1976). Širenje pare sa jedne

strane tkanine na drugu odnosno, proces difuzije kroz porozne materijale regulisan je Fikovim zakonom (relacija 4.1) (Das et al., 2007b):

$$J_{AX} = D_{AB} \frac{dC_A}{dx} \quad (4.1)$$

gde je  $J_{AX}$  (mol/m<sup>2</sup>s) - protok vlage u tekstilnom materijalu,  $D_{AB}$ (m<sup>2</sup>/s) - koeficijent difuzije vlage,  $dC_A/dx$  (mol/m<sup>4</sup>) - gradijent koncentracije (Das et al., 2007b).

Prvi Fikov zakon difuzije važi za ravnotežno stanje difuzije (meri se maseni protok vlage ( $J_{AX}$ )). Difuzioni sistem (slika 4.1), predstavlja protok difundujućih čestica ( $J_x$ ) sa leve na desnu stranu pri čemu se čestice kreću od početne visoke koncentracije ( $C_A$ ) ka nižoj koncentraciji ( $C_B$ ) na rastojanju  $\Delta x$  ( $X_A - X_B$ ) u ravnotežnim uslovima. Negativan predznak (ispred koeficijenta difuzije) pokazuje da je smer difuzije od više prema nižoj koncentraciji  $J_{AX} = -D_{AB}(dC_A/dx)$ . Koncentracije  $C_A$  i  $C_B$  su konstantne, gradijent koncentracije ( $dc/dx$ ) je konstantan i pošto je  $C_A > C_B$ , gradijent koncentracije je negativan. Količina vlage koja prođe kroz materijal, raste sa porastom površine,  $A$ , i negativnog gradijenta ( $dc/dx$ ), (Jere et al., 1976).



Slika 4.1. Prvi Fikov zakon (Jere et al., 1976)

Koeficijent difuzije pare uslovljen je strukturom tekstilnih materijala, posebno poroznošću i debljinom, s tim da su debljina i makroporoznost tkanina i pletenina određene prečnikom pređe koji je uslovljen gustinom pakovanja vlakana u pređi. U odevnom kompletu, unutrašnji sloj tekstilnog materijala (sloj koji je u dodiru sa kožom), ima zadatak da vlagu (tečnost ili paru) odvede dalje od kože tela, dok spoljašnji sloj koji nije u direktnom kontaktu sa kožom ima zadatak da zadržava vlagu dalje od tela i da omogući njeno isparavanje u okruženje.

Posmatrano sa stanovišta higroskopnosti tekstilnih materijala, difuzija vlage za hidrofobne i hidrofilne materijale nije ista. Hidrofobni materijali podležu Fikovom zakonu difuzije, (relacija 4.1), sa konstantnim koeficijentom difuzije, dok kod hidrofilnih tekstilnih materijala ima odstupanja od ove relacije zbog afiniteta prema apsorpciji vode a samim tim i pojave bubrenja vlakana (Li, Luo, 1999; Stanković, 2012).



Ispitivanjem vunenih tkanina konstatovano je da dodavanje hidrofobnih vlakana u mešavinu sa vunom utiče na sposobnost propuštanja vodene pare. Povećanjem mase smanjuje se relativna propustljivost vodene pare. Poznato je da veći sadržaj vlage u materijalima značajno pogoršava njihovu sposobnost propuštanja vodene pare. Za vunene tkanine i mešavine od vune i viskoze vrednosti se smanjuju za više od 70-80%. Međutim, u slučaju dodavanja poliestarskih vlakana, efektivna propustljivost vodene pare skoro nestaje, što je prouzrokovano zamenom vazduha u porama materijala vodom (Boguslawska, Hes, 2013).

Neravnotežno stanje sistema nastaje usled čestih promena fizičke aktivnosti čoveka ili promena klimatskih uslova okruženja. Jače fizičke aktivnosti izazivaju porast energije metabolizma pri čemu se luči znoj u obliku tečnosti. Tečni znoj je potrebno dovoljno brzo odvesti sa površine kože, kako ne bi došlo do narušavanja osećaja komfora. Oslobođanje toplote isparavanjem tečnog znoja je izuzetno važno, posebno u situacijama kada je temperaturni gradijent suprotnog smera između kože i okruženja, gde je isparavanje znoja jedini način oslobođanja tela od viška toplote (Novaković et al., 2015c). Znojenjem se čovek u najvećoj meri oslobađa viška toplote. Pošto se sadržaj vlage u vazduhu menja sa promenom temperature vazduha, kao i brzine strujanja vazduha, to dovodi do promene intenziteta razmene toplote ljudskog tela sa okruženjem. Promenom jednog od faktora narušava se toplotna ravnoteža organizma, kao i proces znojenja, što menja intenzitet razmene energije i mase sa okruženjem. Kao što je već spomenuto, višak energije se oslobađa tzv. suvim prenosom toplote na površini kože i latentnim znojenjem (vodena para), kao i "svesnim" znojenjem sa visokim stepenom znojenja kada se znoj javlja u obliku tečnosti. U takvim slučajevima je koncentracija vlage na koži najčešće viša u poređenju sa količinom vlage u vazduhu. Kada je temperatura okruženja niža od temperature kože ljudskog tela, znoj će ispariti sa površine kože. Za ljudski organizam veoma je stresna situacija u uslovima negativnog temperaturnog gradijenta, kada je vlažnost vazduha veća od vlažnosti kože. Nemogućnošću uspostavljanja ravnoteže, nagomilava se energija u organizmu, raste temperatura tela, povećava se vlažnost kože, tekstilni materijal upija znoj i postaje moker što može dovesti do lepljenja odeće za kožu, što sve ukupno dovodi do pojave osećaja nelagodnosti. Vlažnost kože se definiše kao odnos aktuelne brzine isparavanja znoja i maksimalno moguće brzine isparavanja za važeće uslove okruženja (Havenith et al., 2002).

Visok nivo metaboličke toplote sportista izaziva proces znojenja tokom fizičke aktivnosti. Sportisti tokom sportske aktivnosti izluče od 1,5 – 2 l/h tečnosti. U toplim i vlažnim uslovima, kao i zbog opterećenja, ta vrednost se može povećati do 2,5 l/h (Manshahia, Das, 2013). Visok stepen znojenja odnosno, oblik znojenja kojeg je čovek svestan, (tzv."svesno" ili vidljivo znojenje), u većini slučajeva se javlja u situacijama povećane fizičke aktivnosti. Na samom početku "svesnog" znojenja kada vlaga na površini kože dođe u kontakt sa tekstilnim materijalom, izaziva neprijatan osećaj kod čoveka. Zbog toga, voda koja se kondenzuje na koži mora brzo da se prenese na spoljnu površinu odeće kako bi doživljaj toplotnog komfora bio zadovoljen. Tečni znoj kvasi odeću u trenutku kada je sposobnost odeće da propusti vlagu iz kože u okruženje niža od stepena znojenja. Ako jedan sloj odeće ne propušta ili ima nisku propustljivost, vodena para će se kondenzovati u tečni znoj. Pri tom se proces kondenzacije vlage prenosi kroz unutrašnje slojeve odeće prema koži. Prenos znoja zavisi od nekoliko faktora: pritiska vodene pare i relativne vlažnosti mikro klime, odeće i spoljne sredine, kao i pojave procesa apsorpcije-desorpcije, zasićenja/kondenzacije pare u tečnost (Manshahia, Das, 2013).

U neravnotežnim uslovima gde se koncentracija ( $C_x$ ) i gradijent ( $dC/dx$ ), pa i protok ( $J_x$ ) menjaju sa vremenom, relacija kojom se određuje difuzija dobija oblik :

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left( D \frac{dC_x}{dx} \right) \quad (4.2)$$

Ova jednačina je poznata kao Drugi Fikov zakon i koristi se u neravnotežnim uslovima gde koncentracija varira sa rastojanjem ( $x$ ), vremenom ( $t$ ) i difuzivnošću ( $D$ ). Jednačina (4.3) se može pojednostaviti, (Jere et al., 1976):

$$\frac{dC_x}{dt} = \left( D \frac{d^2 C_x}{dx^2} \right) \quad (4.3)$$

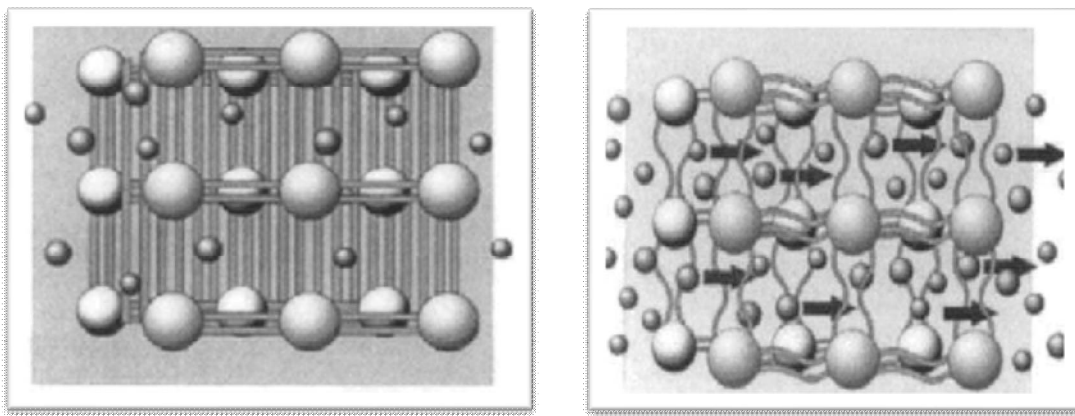
#### 4.1 Upravljanje tečnošću i vlagom u dinamičkim uslovima

Odvođenje znoja sa površine kože postiže se isparavanjem gde je brzina odvođenja tečnosti (znoja) veoma važan parametar za očuvanje toplotnog komfora. Na brzinu isparavanja znoja u najvećoj meri utiče odeća odnosno, tekstilni materijal jer pruža veći ili manji otpor protoku tečnosti. Izborom odgovarajućeg materijala, moguće je u određenoj meri uravnotežiti brzinu isparavanja znoja. Ponašanje tekstilnih materijala u kontaktu sa tečnošću (vodom) posebno je važno kada isparavanje znoja postaje jedini način regulisanja telesne temperature i uspostavljanja ravnoteže između kože ljudskog tela i neposrednog okruženja. Isparavanje se može opisati kao neravnotežni, dinamički proces kod koga se ne može govoriti o potpunoj jednakosti temperatura tečnosti i pare, odnosno o ravnotežnoj temperaturi. U opštem smislu, proces isparavanja obuhvata faznu transformaciju tečnosti u paru, proces pri kome fluid prelazi iz tečne u parnu fazu. Kada je čovekov metabolizam visok odnosno, kada dođe do procesa znojenja i kada je jako važno da znoj brzo ispari treba obratiti pažnju na: penetraciju (sposobnost prodiranja), dinamiku isparavanja, adsorpciju i kretanje-širenje vlage jer mogu biti kritični za održavanje čovekovog termofiziološkog komfora (Gat et al., 2013).

Od tekstilnog materijala se generalno očekuje brzo oslobađanje od vlage, brzo sušenje. Međutim, u zavisnosti od vrste vlakana, tečnost će se zadržati u međuprostorima vlakana ili će se apsorbovati vlaknima (Novaković et al., 2015c). Znoj u obliku tečnosti prenosi se kroz tekstilne materijale putem dva mehanizma:

- adsorpcija po površini vlakana i pređe, i
- kapilarno kvašenje, pri čemu su ovi mehanizmi uslovljeni hidrofiličnošću površine vlakana.

Čovekov izbor odeće zavisi od vremenskih uslova i njegovih aktivnosti, ipak često dolazi do neprilagođenosti situacijama i neusklađenosti kombinovanih slojeva tekstilnih materijala u kompletu odeće. Izbor slojeva u odeći određuje ponašanje u datim uslovima, brzinu odvođenja vlage i pojavu kondenzacije (Fohr et al., 2002). Vodena para unutar odeće se prvo apsorbuje zatim, prenosi kroz tekstilni materijal i emituje sa njegove površine. Na niskim temperaturama molekularni lanci polimera (u vlaknu) formiraju površinu koja ograničava gubitak telesne toplote i tako zaustavljaju prenos pare i toplote. Ukoliko se vodena para kondenzuje u materijalu, oslobađa se toplota. Na višim temperaturama dolazi do promene konfiguracije molekula i formiranja slobodnog prostora. Ovo omogućava prenos toplote i isparavanje znoja, čime se doprinosi sprečavanju zadržavanja vlage u odeći i pojave nelagodnosti (slika 4.2), (Mattila, 2006).



Slika 4.2. Molekulski lanci polimera u vlaknu na niskim temperaturama (a), i na višim temperaturama (b) (Mattila, 2006)

Kod pojačanog znojenja, određena količina znoja se akumulira u odeći koja zadržava deo znoja različitim mehanizmima kao što su apsorpcija od strane vlakana, kondenzacija znoja pri dodiru sa hladnijim slojem odeće ili upijanjem (kapilarnim kvašenjem materijala) znoja sa površine kože. Kada se smanji fizička aktivnost, čovekov metabolizam se usporava i zaustavlja se pojačano znojenje. Međutim, vlaga akumulirana u odeći nastavlja da se desorbuje i isparava što dovodi do nepoželjnog dodatnog hlađenja ljudskog tela. Uspostavljanje ravnoteže oslobođene toplote apsorpcije i utrošene toplote isparavanja uslovljeno je konstrukcionim karakteristikama tekstilnih materijala. Na primer, uspostavljanje ravnoteže zahteva duži vremenski period za deblju pamučnu tkaninu u poređenju sa finijom pamučnom tkaninom istih ostalih karakteritika (Babu et al., 2015).

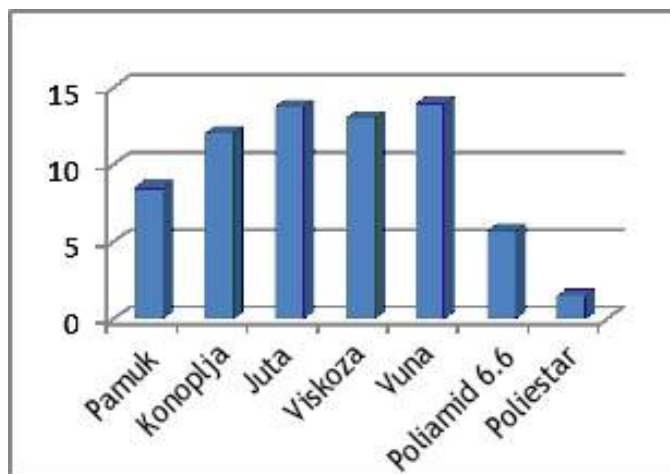
U uslovima niže ambijentalne temperature, prenos vlage unutar tekstilnog materijala uvek je praćen kondenzacijom. Do procesa kondenzacije dolazi kada je para u dodiru sa površinom tela čija je temperatura niža od temperature zasićenja pare pri datom pritisku. Tokom fazne transformacije pare u tečnost (kondenzacije) oslobađa se latentna toplota kondenzacije koja se prenosi kroz materijal dok se formira kondenzat (Das et al., 2007b). Kondenzacija predstavlja proces transformacije gasne faze u tečnu fazu odnosno, prelazak pare u tečnost (vodu). U slučaju kada temperatura postane niža od ravnotežne, vlažan vazduh se ohladi, dolazi do procesa kondenzacije i izdvajanja vlage. Pri kondenzaciji mnogo veći broj molekula prelazi iz gasne u tečnu fazu nego obrnuto. Kondenzacija pare može se zanemariti na temperaturama iznad 20°C, dok na nižim temperaturama eksponencijalno raste (Rossi, Gross, 2004). Razlikuju se dva oblika kondenzacije: filmska i kapljičasta kondenzacija. Filmska kondenzacija nastaje kada kondenzat kvasi površinu i zadržava se na njoj, stvarajući sloj debljeg ili tanjeg filma. Kod kapljičaste kondenzacije stvaraju se pojedinačne kapi kondenzata koje rastu sve dok se zbog svoje težine ne otkinu i oslobode mesto za nove. Kombinacija ova dva oblika predstavlja stvaran proces kondenzovanja (Đorđević i sar., 1997).

Jedan deo istraživanja u ovoj oblasti išla su u pravcu postavljanja matematičkih modela baziranih na osnovnim principima termodinamike sa ciljem adekvatnog opisivanja procesa prenosa toplote i vlage kroz tekstilni materijal. Neki od ovih modela obuhvataju prenos toplote praćen apsorpcijom-desorpcijom ili isparavanjem-kondenzacijom, ili uključuju sva četiri oblika transfera vlage (apsorpcijom, desorpcijom, isparavanjem, kondenzacijom). U procesu apsorpcije-desorpcije higroskopni tekstilni materijali vežu vlagu iz vlažnog vazduha uz površinu kože koja se znoji i otpuštaju je u suvi vazduh. Koju će količinu vodene pare vezati zavisi od vrste tekstilnog materijala kao i vlažnosti atmosferskog vazduha. Ukoliko je tekstilni materijal suv odnosno, niže vlažnosti od vlažnosti prostora u kojem se nalazi, vlakno će upijati vlagu iz vazduha sve do uspostavljanja ravnoteže. Smatra se, da je ravnoteža uspostavljena kada je broj molekula koji prelazi iz gasovite u tečnu fazu jednak broju molekula koji prelaze

iz tečne u gasovitu fazu (para) i tada nema temperaturne razlike između faza. U obrnutom slučaju, kada je materijal vlažan, odvija se otpuštanje molekula vlage pri čemu dolazi do sušenja materijala. Vremenom se uspostavlja ravnoteža, s tim da se izmena molekula vode i dalje odvija u oba smera (Onofrei et al., 2011).

#### 4.1.1 Sadržaj vlage u tekstilnom materijalu

Sa aspekta obezbeđivanja čovekovog termofiziološkog komfora, pored važnosti podataka o vlažnosti atmosferskog vazduha, jednako je važno znati ukupnu količinu vlage prisutne u tekstilnom materijalu, koja se može izraziti pomoću dva parametra: apsolutnog sadržaja vlage – reprize i relativnog sadržaja vlage. Količina vlage u tekstilnom materijalu bitno utiče na gotovo sva njegova svojstva. Sadržaj ukupne količine vlage u tekstilnom materijalu računski se može odrediti pomoću dva parametra: apsolutnog sadržaja vlage (reprize) (R) i relativnog sadržaja vlage (M), dok se ravnotežni sadržaj vlage (EMC) grafički određuje pomoću izoterme sorpcije. Za različite tekstilne materijale različite su i vrednosti reprize (npr. repriza za pamučne materijale iznosi 8,5%), (slika 4.3). Tečnost se uglavnom zadržava u hidrofilnim vlaknima pa zbog toga ovi materijali imaju loša svojstva prenosa tečnosti ka spoljašnjoj sredini (Pan, Sun, 2006a).



Slika 4.3. Sadržaj vlage (repriza) odabranih hidrofilnih i hidrofobnih vlakana

Za određivanje ukupnog sadržaja vlage u tekstilnom materijalu polazi se od mase suvog materijala (D) i mase vlage u materijalu (W). Izračunava se na dva načina:

- Izračunavanjem reprize materijala ( $R_w$ ) koja se definiše kao količina vlage (u procentima) koju apsolutno suvi materijal upije u uslovima standardne vlažnosti pri konstantnoj temperaturi (relacija 4.4):

$$R_w (\%) = \frac{W}{D} 100 \quad (4.4)$$

- Izračunavanjem relativnog sadržaja vlage u materijalu ( $M_w$ ) (relacija 4.5):

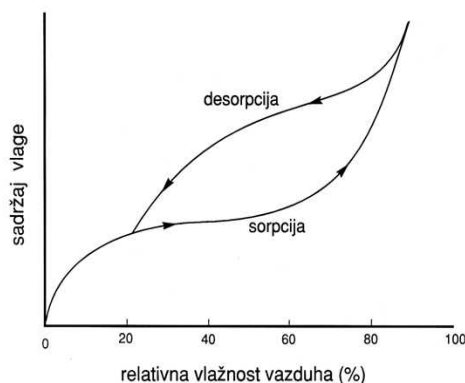
$$M_w (\%) = \frac{W}{(W + D)} 100 \quad (4.5)$$

Međusobni odnos ovih parametara može se prikazati relacijama 4.6 i 4.7

$$R_w(\%) = \frac{M_w(\%)}{\left(1 - \frac{M_w(\%)}{100}\right)} \quad (4.6)$$

$$M_w(\%) = \frac{R_w(\%)}{\left(1 + \frac{R_w(\%)}{100}\right)} \quad (4.7)$$

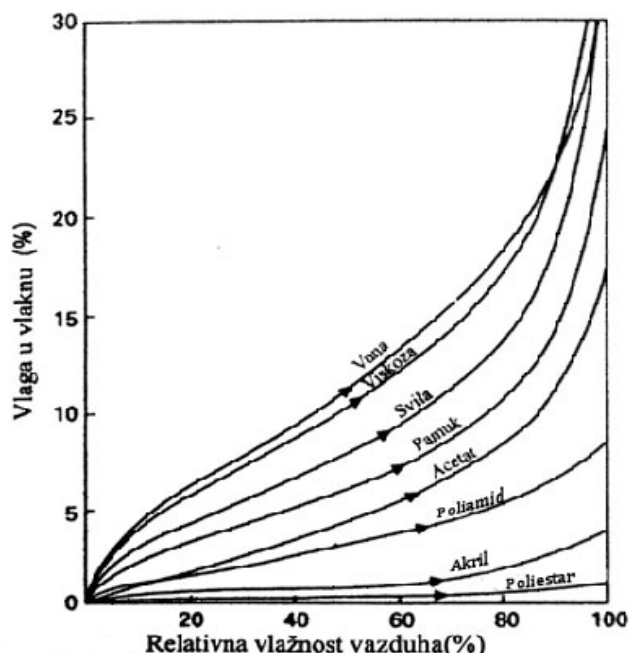
Sadržaj vlage u materijalu koji je u ravnoteži sa vlagom okruženja predstavlja ravnotežnu vlagu. Ravnotežnu vlagu kontrolišu faktori kao što su temperatura i relativna vlažnost vazduha. Standardni uslovi najčešće podrazumevaju uslove pri temperaturi  $t=20\pm 2^\circ\text{C}$  i relativnoj vlažnosti  $R_h=65\pm 2\%$  (Pan, Sun, 2006b). Kriva koja povezuje ravnotežu sadržaja vlage u materijalu sa relativnom vlažnošću vazduha na konstantnoj temperaturi naziva se izoterma sorpcije. Sorpcija vlage definiše se kao svojstvo tekstilnog materijala da upija određenu količinu vlage. Sorpcija vlage obuhvata fenomene apsorpcije i adsorpcije. Kada vlaga iz okruženja dospe na površinu tekstilnog materijala, reč je o adsorpciji odnosno, procesu pri kome dolazi do zadržavanja tečnosti na površini tekstilnog materijala. Međutim, kada vlaga sa površine materijala prodire u unutrašnjost strukture i širi se kroz tekstilni materijal, u tom slučaju reč je o apsorpciji. Drugim rečima, apsorpcija predstavlja fizički ili hemijski proces pri kome molekuli vode prodiru u strukturu materijala. Kriva (izoterma) sorpcije i desorpcije pri konstantnoj temperaturi prikazane su na slici 4.4. (Pan, Sun, 2006b).



Slika 4.4. Apsorpciona i desorpciona izoterma (Morton, Hearle, 1997)

Izoterma apsorpcije dobija se izlaganjem potpuno suvog materijala atmosferskim uslovima uz porast relativne vlažnosti pri konstantnoj temperaturi gde dolazi do povećanja mase materijala (meri se priraštaj mase) usled upijanja vlage. Izoterma desorpcije se dobija kada se meri potpuno mokar materijal pri atmosferskim uslovima uz opadanje relativne vlažnosti i određuje se gubitak sadržaja vlage prilikom sušenja. Razlika se može napraviti između izoterma apsorpcije i desorpcije određujući da li se nivo vlage u materijalu povećava, što ukazuje na kvašenje tekstilnog materijala ili se vlaga postepeno smanjuje što ukazuje na uspostavljanje ravnotežnog stanja sa okruženjem odnosno, ukazuje na proces sušenja tekstilnog materijala (Pan, Sun, 2006b). Izoterme apsorpcije za različita vlakna, koje prikazuju ravnotežnu vlagu u vlaknima u prostoru konstantne temperature i različite vlažnosti, prikazane su na slici 4.5.

Od prirode materijala (hidrofilnosti ili hidrofobnosti) zavisi da li će vlaga u materijalu biti apsorbirana i u kojoj meri. Tekstilni materijali izrađeni od sintetičkih vlakana su poznati kao hidrofobni materijali jer na njihovoj površini postoji manji broj mesta pogodnih za vezivanje molekula vode. Zbog tendencije hidrofobnih vlakna da se ne kvase (ili smanjeno kvase), materijale izrađene od ovih vlakana odlikuje dobra sposobnost prenosa vlage (tečnosti). Usled znatno smanjene apsorpcije vlage sintetičkih vlakana u odnosu na prirodna vlakna, tekstilni materijali izrađeni od sintetičkih vlakana uvek sadrže veći procenat nevezane vlage u porama materijala u poređenju sa prirodnim materijalima. Prirodni materijali (pamučni, vuneni) su vrlo hidrofilni, jer na njihovoj površini postoji veći broj mesta pogodnih za vezivanje tečnosti (molekula vode). Pamučni materijali takođe spadaju u tzv. higroskopne materijale, što znači da imaju dobru sposobnost upijanja vlage u obliku vodene pare. (Pan, Sun, 2006b).



Slika 4.5. Apsorpcijske izoterme za različita vlakna ( $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). (Morton, Hearle, 1997)

#### 4.1.2 Prenos vode u tekstilnom materijalu

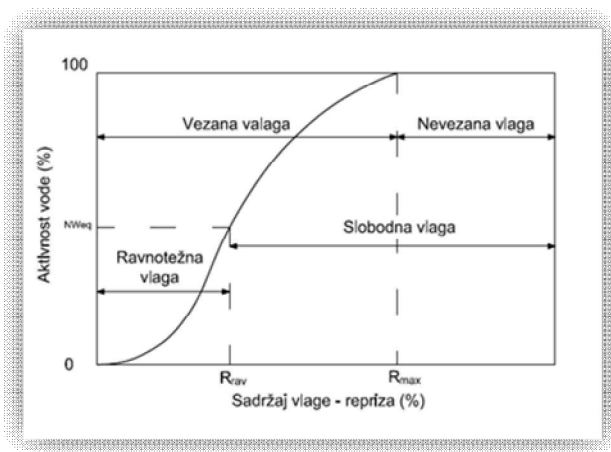
Aktivnost vode ( $a_w$ ) je mera energetskeg statusa vode u specifičnom sistemu (u vazduhu ili u masi vlakna). Različiti materijali tj. specifični sistem u kome se voda nalazi će generisati različitu vrednost aktivnosti vode. Pošto je aktivnost vode mera potencijalne energije, ona predstavlja pokretačku silu za kretanje vode iz područja veće aktivnosti ka područjima manje aktivnosti. Prema tome, aktivnost vode je osnovni uzrok prenosa vode (bilo da je tečnost ili vlaga) kroz porozne materijale. Postoji više faktora koji kontrolišu aktivnost vode u sistemu i oni su matematički sažeti u dobro poznatoj Kelvinovoj jednačini (relacija 4.8):

$$a_w = \frac{p_v}{p_{sv}} = e^{\frac{-2\gamma M}{r\rho RT}} \quad (4.8)$$

gde je  $M$  - molekulska masa vode,  $\gamma$  - površinski napon,  $\rho$  - gustina vode,  $T$  - apsolutna temperatura,  $r$  - poluprečnik vlakna (pređe),  $p_{sv}$  - pritisak zasićenja,  $R$  - konstanta.

Iz Kelvinove jednačine proizilazi da se pritisak zasićenja smanjuje sa smanjenjem prečnika pređe. Kao rezultat, za isti pritisak tačka zasićenja se postiže brže u manjim porama tako da voda kondenzuje unutar njih. To znači da će najmanje pore biti prve ispunjene kondenzovanom tečnošću. Ova preuranjena kondenzacija u porama naziva se kapilarna kondenzacija (Pan, Sun, 2006b). Proces takve kondenzacije nastavlja se sve dok se ne dostigne ravnotežni pritisak, odnosno dok se parcijalni pritisak u vazduhu ne izjednači sa pritiskom unutar pora. Voda koja je "zarobljena" u materijalu ispoljava nižu aktivnost, a za takve porozne materijale se kaže da imaju određena higroskopna svojstva. Prema tome, higroskopno ponašanje materijala se može opisati na osnovu različitih vrednosti aktivnosti vode,  $a_w$ , (slika 4.6) (Pan, Sun, 2006b):

- $a_w \leq 0,2$  formiranje monomolekulskog sloja molekula vode na zidovima pore,
- $0,2 < a_w < 0,6$  formiranje multimolekulskih slojeva molekula vode,
- $a_w \geq 0,6$  dešava se proces kapilarne kondenzacije kako je opisano Kelvinovom jednačinom (relacija 4.8).



Slika 4.6. Higroskopno ponašanje materijala u zavisnosti od aktivnosti vode (Pan, Sun, 2006)

Kelvinova jednačina ukazuje na parametre koji mogu da utiču na snižavanje aktivnosti vode, a to su temperatura i vrsta materijala u kojem se nalazi voda uključujući primese i supstance rastvorene u vodi (boja, so). Aktivnost vode raste sa povećanjem vrednosti poluprečnika pora i temperature vode. Takođe, površinski napon se blago smanjuje sa povećanjem temperature uzrokujući dalji porast aktivnosti vode.

Najčešće posmatrani fenomeni u proizvodnji, preradi i tokom upotrebe tekstilnih materijala, kada voda ili bilo koja druga tečnost dođu u kontakt sa njima ili kada se prenose kroz tekstilne materijale, jesu kvašenje i kapilarno kvašenje. Ponašanje tekstilnih materijala pri kvašenju i kapilarnom kvašenju ima veliki uticaj na komfor odeće, naročito kod sportske odeće, rublja, kao i materijala namenjenih za medicinske svrhe i higijenu (Pan, Sun, 2006b).

Kvašenje i kapilarno kvašenje, kao fenomeni prenosa tečnosti kroz porozne tekstilne strukture su od izuzetnog praktičnog značaja za apsorpciju i protok tečnosti kroz tekstilne materijale. Poznavanje osnova kvašenja i kapilarnog kvašenja kao i razlike između ovih fenomena neophodne su za istraživanje protoka vode kroz tekstilne materijale i njihovog ponašanja kada dođu u kontakt sa vodom. Prenos tečnosti kroz tekstilne materijale Ghali i saradnici (1994) opisuju tri faze: kontakt materijala sa tečnošću, prolaz tečnosti kroz zasićeni

materijal i uklanjanje tečnosti sa materijala. Kvašenje i kapilarno kvašenje su dva procesa međusobno povezana i obično idu jedan sa drugim (Kissa, 1996).

Kvašenje predstavlja inicijalno ponašanje tekstilnog materijala kada dođe u kontakt sa tečnošću. Može se reći da predstavlja početni proces širenja tečnosti kroz tekstilni materijal. Termin "kvašenje" se koristi da opiše ponašanje pri zameni čvrsto - gasovite ili tečno - gasovite faze sa čvrsto - tečnom fazom. Kvašenje je kompleksan proces koga uslovljava struktura tekstilnog materijala (Onofrei et al., 2011). Tokom ove prve faze međusobnog delovanja tečnosti i tekstilnog materijala, i ostvarivanja potpunog kontakta između čvrste i tečne faze, sile međusobnog privlačenja omogućavaju da materijal bude pokvašen. Sile privlačenja zavise kako od svojstava površine tekstilnog materijala, tako i od svojstava tečnosti koja ih kvasi. Kvašenje tekstilnih materijala Chunhong i Masayuki (2015) su opisali kroz nekoliko faza kao što su: uranjanje materijala u tečnost, kapilarna sorpcija, prijanjanje tečnosti na tekstilni materijal i širenje tečnosti kroz tekstilni materijal. U trenutku kada kap vode dodirne odnosno, uspostavi kontakt sa ravnom površinom tekstilnog materijala, mogu se očekivati dve vrste kvašenja:

- Delimično kvašenje koje predstavlja migraciju tečnosti preko čvrste površine do uspostavljanja termodinamičke ravnoteže.
- Potpuno kvašenje koje uključuje spoljne hidrodinamičke ili mehaničke sile koje povećavaju čvrsto - tečnu graničnu površinu izvan statičke ravnoteže (Kissa, 1996).

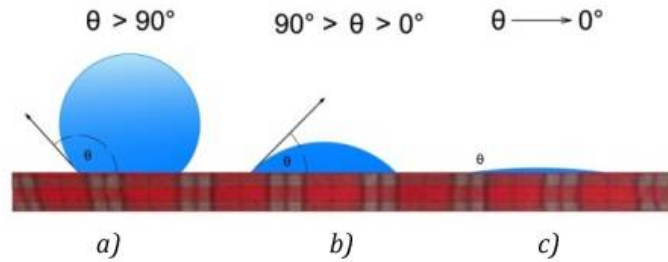
Zhu i Takatera (2015) ukazuju na bitne parametre koji su važni za kvašenje tekstilnih materijala, kao što su hrapavost i zakrivljenje dodirnih površina. Kod ravnih površina za kap tečnosti koja omogućava delimično kvašenje, efekti gravitacije se mogu zanemariti pa se hidrostatički pritisak u kapi izjednačava i kap poprima sferičan oblik. Za potpuno kvašenje ravne površine ovaj pritisak se može smanjiti do nule. Kap vode će kvasiti hrapavu površinu u zavisnosti od geometrije hrapavosti površine, od površinskog trenja tečnosti i slobodne energije između čvrste - gasovite i čvrste - tečne faze. Kap koja je na vrhu površine materijala imaće veći dodirni ugao sa višom energijom, uz vazdušne džepove duž linije dodira sa materijala i vode (Zhu, Takatera, 2015).

Stepen kvašenja tekstilnog materijala zavisi od međusobnog odnosa koji se iskazuje kroz apsorptivnost i atezivnost kao i međusobnog odnosa površinskih sila koje određuju oblik i veličinu kapi tečnosti. Adhezivnost je uslovljena dejstvom adhezivnih sila između tečnosti i podloge i može se reći da predstavlja sposobnost prijanjanja tečnosti na podlogu. Apsorptivnost predstavlja sposobnost podloge (tekstilnog materijala) da prihvati tečnost (Zhong, 2006).

Pri kvašenju tekstilnog materijala, jedan od važnih faktora koji utiče na vrednosti kvašenja, i koji predstavlja direktnu meru kvašenja tekstilnog materijala jeste kontaktni ugao ili ugao kvašenja. Nizak kontaktni ugao objašnjava veću površinu kvašenja. Pored kontaktnog ugla, na proces kvašenja utiču temperatura, gustina i viskoznost tečnosti. Sa povećanjem temperature tečnosti površinski napon se smanjuje a to dovodi do većeg kvašenja. Takođe, sa povećanjem gustine tečnosti i viskoznosti, površinski napon se povećava što smanjuje kvašenje. Pored navedenih parametara, površina materijala veoma utiče na kvašenje jer sa povećanjem hrapavosti površine tekstilnog materijala, širenje tečnosti postaje brže a ugao kvašenja manji (Das et al., 2007c).

Vrednosti ugla kvašenja kreću se u intervalu od 0 do 180°. Položaj i oblik kapljice tečnosti opisuje kvašenje ili ne kvašenje odnosno, dobro i loše kvašenje tekstilnog materijala (slika 4.7). Potpuno kvašenje nastaje kada je kontaktni ugao jednak nuli (slika 4.7c). Kada je kontaktni ugao manji od 90° dolazi do delimičnog kvašenja materijala (slika 4.7b). U slučaju kada je kontaktni ugao veći od 90° (slika 4.7a), tada neće doći do kvašenja tekstilnog materijala (Zhong, 2006).





Slika 4.7. Kap tečnosti na površini tekstilnog materijala

Kvašenje tekstilnih materijala se menja u zavisnosti od sirovinskog sastava tekstilnog materijala. Povećanjem hidrofilnosti tekstilnog materijala kontaktni ugao se smanjuje što znači da se površina kvašenja povećava drugim rečima, za hidrofilne materijale ugao ( $\theta$ ) leži između  $0^\circ$  i  $90^\circ$  ( $\cos\theta$  ima pozitivnu vrednost), dok za hidrofobne materijale ugao kvašenja ( $\theta$ ) leži između  $90^\circ$  i  $180^\circ$  ( $\cos\theta$  ima negativnu vrednost). Kako se povećava mogućnost kvašenja, tako se dodirni ugao smanjuje i  $\cos\theta$  povećava. Hidrofobni materijali su primer lošeg kvašenja (Marmur, 1992).

Wenzel (1936) je proučavao hrapavost hidrofilnih i hidrofobnih materijala i njihovo ponašanje pri kvašenju. Dodirni ugao hrapave površine ( $\theta^*$ ) zavisi od unutrašnjeg dodirnog ugla ( $\theta$ ) i odnosa hrapavosti ( $r$ ) koji se naziva - Wenzelov odnos hrapavosti. Ovaj parametar izražava odnos hrapave u odnosu na ravnu površinu:

$$\cos \theta^* = r \cos \theta \quad (4.9)$$

Ravne ili glatke hidrofilne površine se više kvase za razliku od hrapavih površina gde se povećanjem hrapavosti dodirni ugao smanjuje ( $\theta < 90^\circ$ ). Ova često navođena jednačina upućuje da je:

$$\theta_S < \pi/2 \Rightarrow \theta_{ro} < \theta_S, \text{ ali } \theta_S > \pi/2 \Rightarrow \theta_{ro} > \theta_S \quad (4.10)$$

gde je  $\theta_S$  - dodirni ugao za idealno glatku površinu,  $\theta_{ro}$  - dodirni ugao za hrapavu površinu.

Za tkaninu koja je nepotpuno nakvašena tečnošću, ako je  $f_W$  - deo nakvašene površine a  $f_U$  - deo nenakvašene površine (otvorena površina tkanine), mogućnost kvašenja takvih površina izražava se jednačinom:

$$\cos \theta^* = f_W \cos \theta - f_U \quad (4.11)$$

Wenzel (1936) smatra da će se ugao kvašenja povećati sa povećanjem hrapavosti. Kod hidrofobnih površina, kada tečnost dospe na površinu, vazduh je zarobljen ispod tečnosti usled čega dolazi do stvaranja određeni kompozitni međusloj između čvrste i tečne faze, što se naziva Cassie-vo stanje. Uslov za stabilnost ovog stanja je (relacija 4.12):

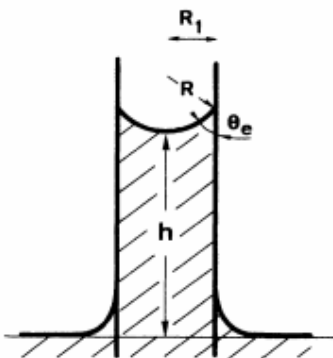
$$\cos \theta < (f - 1)(r - f) \quad (4.12)$$

gde je  $f$  - funkcija ili međusloj na granici faza čvrsto - tečno ispod kapljice (suva površina). Za veoma hrapavu površinu odnos hrapavosti ( $r$ ) je veoma veliki, i  $\cos\theta < 0^\circ$ , što predstavlja uobičajne uslove za hidrofobnost.

Kapilarno kvašenje predstavlja spontani prolaz tečnosti kroz poroznu sredinu, vlakna ili snop vlakana kao i prostore između njih. Proces kapilarnog kvašenja počinje nakon kvašenja površine tekstilnog materijala (Ozturk et al., 2011). Sposobnost održavanja kapilarnog toka tečnosti kroz tekstilni materijal definiše se kao sposobnost kapilarnog kvašenja ili kapilarna kvašljivost (Jhanji et al., 2015b). Kapilarno kvašenje nastaje ulaskom tečnosti u pore materijala usled pojave kapilarnog pritiska, pri čemu se prolaz tečnosti kroz fine pore u materijalu određuje fenomenom kapilarnosti. Kapilarnost se može definisati kao makroskopsko kretanje ili prolaz tečnosti kroz kanale (kapilare) uslovljeno geometrijom sopstvene površine i međufaznim silama.

Chatterjee i Singh (2014) smatraju da su za kapilarno kvašenje odgovorni mikropilarnost (mikropore ili mikropilare između vlakana u pređi), i makropilarnost (makropore ili makropilare između pređa). Oni su definisali kapilarno kvašenje kao sposobnost održavanja kapilarnog protoka koji se pokreće kapilarnim silama usled razlike u pritiscima koje stvara površinski napon tečnosti preko kontakta tečnosti i materijala (Chatterjee, Singh, 2014). Kapilarno kvašenje zavisi još od karakteristika vlakana i strukture pređe. Svojstva vlakana, geometrija površine vlakana i veličina i geometrija pora glavni su parametri koji utiču na kapilarno kvašenje tekstilnih materijala (Das, Ishtiaque, 2004). Za kvašenje, odnosno uvođenje tečnosti u strukturu tekstilnog materijala odgovorne su makropore u materijalu koje se prve pune. Kada se makropore napune tečnošću, počinje kvašenje mikropora (kapilare između vlakana u pređi) koje se brzo pune tečnošću i ubrzavaju tok prenosa tečnosti. Drugim rečima, za napredovanje kapilarnog kvašenja kroz tekstilni materijala odgovorne su kapilare manjih dimenzija (Benltoufa et al., 2008).

Najjednostavniji način predstavljanja kapilarnog kvašenja bi bio pomoću "kapilare" u obliku cevi (slici 4.8), gde se vidi formirani meniskus. Površinski napon tečnosti prouzrokuje razliku pritiska duž zakrivljenja između tečne i gasovite sredine. (Zhong, 2006).



Slika 4.8. Kapilarno kvašenje u kapilari (De Gennes,1985)

Vrednost razlike u pritisku sferične površine (izračunali su 1805. godine nezavisno Thomas Young i Pierre Simon de Laplace) predstavljena je tzv. Young-Laplaceovom jednačinom:

$$\Delta P = \gamma_{LV} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.13)$$

gde su poprečni presezi zakrivljenja  $R_1$  i  $R_2$  jednaki;  $\Delta P$  - razlika u pritisku između dve strane zakrivljene površine,  $\gamma_{LV}$  - površinski napon između dve površine. Sledi da je:

$$\Delta P = \frac{2\gamma_{LV}}{R} \quad (4.14)$$

$$R = \frac{r}{\cos \theta} \quad (4.15)$$

gde je  $r$  - poluprečnik kapilare,  $\theta$  - ugao kvašenja. Otuda se kapilarni pritisak ( $\Delta P$ ) može definisati kao količnik unutrašnje sile kvašenja  $2\gamma_{LV} \cdot \cos \theta$  i poluprečnika kapilare ( $r$ ) (Zhu, Takatera, 2014; Chen et al., 2001).

S obzirom da kapilarni prostori u vlaknastom sklopu nisu ujednačeni, obično se koristi indirektno određeni parametar tj. efektivni poluprečnik kapilara ( $r_e$ ). Ukoliko se poluprečnik kapilare smanjuje, pritisak u kapilari će biti veći što će prouzrokovati brži prolazak tečnosti kroz kapilare.

Kapilarno kvašenje određeno je površinskim naponom između čvrstog tela i tečnosti. Površinski napon može se definisati kao energija koja se mora dopremiti kako bi se povećala površina granice faza za određeni iznos. Van der Waals-ove sile, kao najznačajnije kohezione sile između molekula vode, uvek deluju duž granica faza (tj. duž toka kretanja tečnosti). Povećanje međumolekulskih sila privlačenja na graničnoj površini između dve faze se manifestuje kao površinski napon. Nasuprot kohezionim silama, između različitih molekula (npr. vode i unutrašnje površine staklene cevi) deluju sile prijanjanja - adhezivne sile. One su odgovorne za kapilarno kvašenje. Ako su adhezivne sile veće od kohezionih sila unutar tečnosti, tečnost će rasti/ići na gore unutar staklene cevi (kapilare), (slika 4.9), pa će doći do kapilarnog kretanja koje je izazvano razlikom pritisaka. Pravac protoka tečnosti je takav da smanji postojeću razliku u pritisku, a protok tečnosti prestaje kada razlikom pritisaka postane jednaka nuli (Zhong, 2006). Pošto tečnost napreduje u kapilarama pod dejstvom pokretačke sile ( $\Delta P$ ) odnosno, razlike kapilarnog pritiska može se predstaviti (relacijom 4.16):

$$\Delta P = P_K - \delta \cdot g \cdot h \quad (4.16)$$

gde je  $\delta$  - gustina tečnosti,  $g$  - je gravitaciono ubrzanje ( $980,7 \text{ cm/s}^2$ ),  $h$  - visina tečnosti (cm). U slučaju kada je kapilarni pritisak ( $P_K$ ) veći od mase tečnosti ( $\delta \cdot g \cdot h$ ), pokretačka sila ( $\Delta P$ ) pokreće tečnost na gore (podigne je). Postizanjem ravnotežnog stanja ( $P = \delta \cdot g \cdot h$ ), pokretačka sila ( $\Delta P$ ) postaje jednaka nuli na ravnotežnoj visini  $h$ , te tečnost prestaje da raste (Zhu, Takatera, 2014).

Pod pretpostavkom da je tekstilni materijal potpuno mokar i kontaktni ugao jednak nuli ( $\cos \theta = 1$ ), može se koristiti jednačina koeficijenta kapilarnog kvašenja. Koeficijent kapilarnog kvašenja ( $W_{KK}$ ) zavisi od geometrije pora unutar tekstilnog materijala, i izračunava se na sledeći način (relacija 4.17):

$$W_{KK} = \sqrt{\frac{R\gamma \cos \theta}{2\eta}} \quad (4.17)$$

gde je  $\theta$  - ugao kvašenja (kontaktni ugao),  $\eta$  - viskoznost tečnosti (Sharabaty et al., 2008).

Poiseuille-ova jednačina opisuje brzinu napredovanja tečnosti kroz kapilaru:

$$\frac{dL}{dt_i} = \frac{R^2 \Delta P}{8\eta L} \quad (4.18)$$

gde je  $L$  - visina (dužina) kapilarnog kvašenja,  $t_t$  - vreme,  $R$  - poluprečnik kapilara,  $\eta$  - viskoznost tečnosti,  $\Delta P$  - razlika kapilarnog pritiska (Zhu, Takatera, 2014).

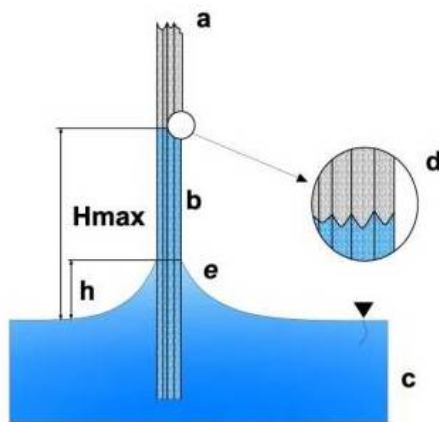
Mnogi istraživači smatraju da protok pod kapilarnim pritiskom horizontalne kapilare mogu modelovati uz pomoć Lukas-Washburn-ove jednačine:

$$L^2 = \frac{\gamma \cdot r \cos \theta}{2\eta} \cdot t_t \quad (4.19)$$

gde je  $L$  – dužina, odnosno visina kapilarnog kvašenja,  $\gamma$  - površinski napon,  $\eta$  - viskoznost tečnosti,  $\theta$  - ugao kvašenja (kontaktni ugao),  $r$  - poluprečnik kapilare,  $t_t$  - vreme (Chen et al., 2001).

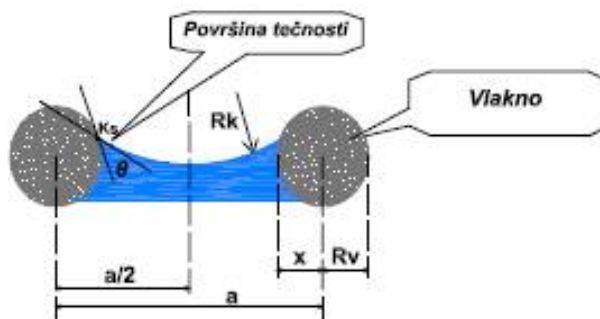
Proučavajući fenomene prolaska tečnosti kroz tekstilne materijale po Lucas-Washburn-u konstatovano je da postoje značajne razlike u visini napredovanja tečnosti zbog različite strukture tekstilnih materijala kao i oblika i veličine pora odgovornih za provođenje molekula vode. U početnoj fazi kapilarnog kvašenja, kada se efekti gravitacije mogu zanemariti, i kada je visina napredovanja tečnosti znatno ispod maksimalne (ravnotežne) visine kvašenja, prema Washburn-ovoj jednačini, kapilarni protok tečnosti zavisi od reoloških svojstava tečnosti, kao i od geometrije kapilare i površinskog napona između tečnosti i pare (Zhu, Takatera, 2014).

Broj vlakana u poprečnom preseku pređe igra veoma važnu ulogu pri određivanju sposobnosti kapilarnog kvašenja tekstilnog materijala. Visina podizanja (napredovanja) tečnosti kroz vertikalni snop vlakana menja se zavisno od broja vlakana u pređi. Prilikom kapilarnog kvašenja snopa vlakana, tečnost zauzima oblik kao što je prikazan na slici 4.9 (Wiener, Dejlova, 2003), gde je  $a$  - snop vlakana (segment bez vode),  $b$  - snop vlakana, (segment sa vodom),  $H_{max}$  - maksimalna visina vode,  $c$  - voda i segment snopa vlakana zaronjen u vodu,  $d$  - ilustracija oblika kontakta vode i vlakna na maksimalnoj visini ( $H_{max}$ ),  $e$  - prelazno stanje (maksimalne visine „ $h$ “) između pokvašenog snopa vlakana i vode koja ga okružuje.



Slika 4.9. Kapilarno kvašenje vertikalnog snopa vlakana (Wiener, Dejlova, 2003)

Karakteristične veličine mogu se dobiti na osnovu eksperimentalnih rezultata za visinu rasta tečnosti ( $h$ ) u određenom vremenu ( $t_t$ ), kao i maksimalne visine koju tečnost dostigne tokom kvašenja ( $H_{max}$ ). Površina tečnosti između dva vlakna šematski je prikazana na slici 4.10, gde je  $R_v$  - poluprečnik vlakna,  $R_k$  - poluprečnik krivine nivoa tečnosti,  $K_s$  - tačka kontakta vlakana sa nivoom tečnosti,  $\theta$  - kontaktni ugao,  $a$  - rastojanje između osa dva susedna vlakna (Wiener, Dejlova, 2003).



Slika 4.10. Geometrija kontakta tečnosti i vlakna na površini tkanine (Wiener, Dejlova, 2003)

Na osnovu date geometrije kontakta tečnosti i vlakna, polazeći od pretpostavke ravnomernog kapilarnog kvašenja može se uspostaviti relacija:

$$a = k \sqrt{\frac{\pi R_v^2}{\mu}} \quad (4.20)$$

gde je  $a$  (m) - rastojanje između osa dva susedna vlakna,  $k$  - koeficijent koji zavisi od položaja vlakana u pređi,  $R_v$  (m) - poluprečnik vlakana,  $\mu$  - ispunjenost snopa vlakana vodom (Wiener, Dejlova, 2003).

Kapilare većeg poluprečnika karakteriše brži protok tečnosti dok se u manjim kapilarama dostižu veće visine, što objašnjava mehanizam kapilarnosti koji je odgovoran za kretanje tečnosti i ukazuje na to da se tečnost kreće iz područja niskog kapilarnog pritiska ka području visokog kapilarnog pritiska. Kako struktura tekstilnog materijala ima uticaja na propustljivost tečnosti veoma često se koristi Darcy-ev zakon kako bi se opisala veza između brzine prolaska tečnosti ( $\theta_T$ ) i gradijenta pritiska ( $\Delta P$ ). Brzina prolaska tečnosti ( $\theta_T$ ) je direktno proporcionalna gradijentu pritiska ( $\Delta P$ ) a obrnuto proporcionalna dužini uzorka ( $L_0$ ) u pravcu protoka tečnosti (Das et al., 2007c):

$$\theta_T = -K_p \frac{\Delta P}{L_0} \quad (4.21)$$

gde je  $K_p$  - konstanta porozne strukture poznate kao propustljivost porozne strukture u odnosu na tečnost. Konstanta „ $K_p$ “ zavisi od svojstava tečnosti i strukture pora u materijalu. Hidraulička provodljivost tečnosti može se preciznije napisati uzimajući u obzir propustljivost tekstilnog materijala i svojstva tečnosti (relacija 4.22):

$$K = \frac{k}{\eta} \quad (4.22)$$

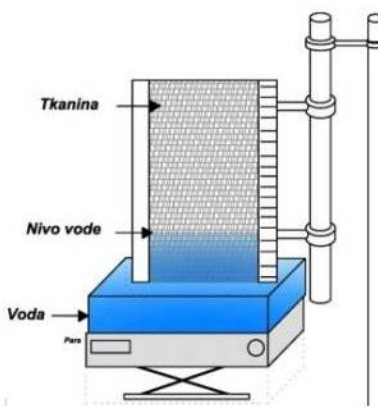
gde je  $k$  - propusnost porozne strukture i  $\eta$  - viskoznost tečnosti.

Kapilarni pritisak i propustljivost su dva osnovna parametra koji se koriste za određivanje ukupne sposobnosti kapilarnog kvašenja tekstilnog materijala (Das et al., 2007c).

Za proučavanje svojstava kapilarnog kvašenja koriste se razne tehnike ispitivanja, počevši od merenja razlika u masi, koristeći Wilhelmy - ploču (Hsieh, Yu, 1992a), preko senzora osetljivih na tečnost čiji se nivo registruje u pravilnim razmacima duž pređe (Zhu,

Takatera, 2015), kao i posmatranje i merenje kapilarnog toka obojene tečnosti i tehnika analize slike kada se beleži visina u određenom vremenskom periodu (Perwuelz et al., 2000).

Vertikalnim kapilarnim kvašenjem svojstva kvašljivosti tekstilnog materijala se utvrđuju merenjem visine upijene tečnosti u materijalu ili merenjem težine pokvašenog materijala uronjenog u rezervoar sa vodom (slika 4.11). Kondicioniranom uzorku tekstilnog materijala (na temperaturi od  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i relativna vlažnost vazduha od  $65 \pm 2\%$ ), jednim krajem uronjenom u tečnost nakon tačno određenog vremena meri se visina koju je dostigla tečnost u materijalu (Patnaik et al., 2006). Vrednost dobijena na ovakav način predstavlja direktan pokazatelj brzine kvašenja uzorka materijala. S obzirom da se prenos vode u odevnom predmetu vrši uglavnom lateralno (transplanarno u odnosu na površinu tekstilnog materijala), rezultati dobijeni u testu vertikalnog kapilarnog kvašenja daju ograničene informacije sa aspekta toplotnog komfora (Fan, 2009).



Slika 4.11. Test vertikalnog kapilarnog kvašenja tekstilnog materijala (Hamdaoui, Nasrallah, 2015)

Lateralno kapilarno kvašenje predstavlja prenos tečnosti (vode) kroz debljinu tekstilnog materijala (tkanine, pletenine). Ovakav način isptivanja kapilarnog kvašenja tekstilnih materijala obezbeđuje realniju sliku sposobnosti materijala da propušta tečnost, budući da se odvođenje tečnosti od kože postiže kretanjem tečnosti kroz debljinu tekstilnog materijala (Kissa, 1996). Do rezultata se dolazi merenjem vremena potrebnog da voda sa jedne strane materijala prođe na drugu stranu (sa lica na naličje ili obrnuto), ili merenjem količine tečnosti koju je materijal upio ili merenjem težine pokvašenog materijala. Količina vode koja prođe na lice pletenine u odnosu na ukupnu količinu nanete vode, predstavlja vrednost distribucije vode na naličju pletenine, i obrnuto (Cao et al., 2006).

## 4.2 Faktori koji utiču na svojstva upravljanja tečnošću kod tekstilnih materijala

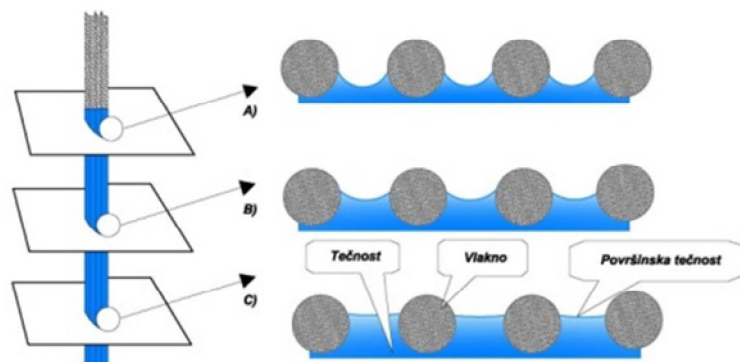
Tekstilni materijali odlikuju se dobrom poroznošću koja je veoma važna za kapilarno kvašenje, i prenos tečnosti kroz tekstilne materijale (Patnaik et al., 2006). Od tekstilnih materijala se generalno očekuje brzo odvođenje vlage sa površine kože ljudskog tela, kao i dobra propustljivost tečnosti. Veoma je važno da se tekstilni materijali brzo suše i ne zadržavaju vlagu koja bi izazvala osećaj hladnoće, lepljivosti za kožu i drugih neprijatnosti koje izazivaju osećaj nelagodnost. Sposobnost tekstilnih materijala da prenose tečnost (znoj) sa kože u okruženje uslovljena je faktorima kao što su: svojstva upotrebljenih vlakana (prečnik, oblik i tip vlakna), način formiranja pređe, finoća pređe, upredenost i maljavost pređe, debljina i poroznost tekstilnog materijala, distribucija pora, atmosferski uslovi (pritisk, temperatura, vetar), (Stanković, 2012).

#### 4.2.1 Uticaj vlakana na svojstva upravljanja tečnošću

Vlakna kao osnovne komponente svih tekstilnih materijala, svojom strukturom i karakteristikama, kao i načinom prerade, utiču na konačan izgled tekstilnih materijala. Različita svojstva vlakana utiču različito na ponašanje tekstilnih materijala u pogledu kvašenja i propuštanja tečnosti. Strukturna svojstva tekstilnih materijala zavise u velikoj meri od rasporeda vlakana u pređi (gustina pakovanja vlakana), od svojstava vlakana (njihove morfologije, prirode, sposobnosti bubrenja), debljine i oblika vlakana koji se smatraju veoma važnim svojstvima u procesu upravljanja tečnošću (Chen et al., 2009).

Ukupna količina tečnosti koju vlakno može da apsorbuje zavisi prvenstveno od vrste vlakna. Prirodna vlakna (pamuk, vuna) su hidrofilna i apsorbuju tečnost. Hidrofilna vlakna na površini sadrže veći broj mesta za vezivanje tečnosti, pa zbog zadržavanja tečnosti imaju lošija svojstva provođenja tečnosti ka spoljašnjoj sredini. Viskozna vlakna su takođe, hidrofilna i imaju dobra svojstva apsorpcije tečnosti. Za razliku od prirodnih vlakana, sintetička vlakna su uglavnom hidrofobna, ne pokvase se, i kao posledica toga imaju dobru sposobnost provođenja tečnosti ka spoljnoj sredini (Fangueiro et al., 2010).

Pri kontaktu tečnosti i vlakana, oblik vlakana je faktor koji reguliše brzinu i smer protoka tečnosti. Protok tečnosti kroz vlakna je takođe uslovljen rasporedom vlakana u pređi, čime je određena veličina i kontinuitet kapilara. Vlakna pod izvesnim okolnostima mogu da promene strukturu pređe (npr., kada su vlažna mogu da promene svojstva) i utiču na ponašanje tečnosti, odnosno kretanje ili zadržavanje tečnosti u materijalu. Bubrenje vlakana doprinosi zadržavanju tečnosti u vlaknima jer usporava protok tečnosti, ili čak može dovesti do zatvaranja kapilara. Ova pojava je naročito prisutna kod pređe od celuloznih vlakana (Das et al., 2007c). Porozna struktura pamučnih vlakana je karakteristična za dobar protok tečnosti, ali zbog svoje neravnomerne površine i formiranja neadekvatnih (diskontinualnih) pora u pređi ne mogu se smatrati idealnim vlaknima u pogledu sposobnosti protoka tečnosti. Usled promene strukture i mogućnosti bubrenja vlakna, sposobnost protoka tečnosti se smanjuje pri većem sadržaju vlage u materijalu. Pored poprečnog preseka vlakana, veoma važan uticaj ima površina vlakna. Neravnomerna površina prirodnih vlakana (npr. prisustvo krljušti kod vunenog vlakna) može dovesti do nepravilnog rasporeda kapilara u pređi, što može uticati na protok tečnosti. Sintetička vlakna imaju glatku površinu i u većim slučajevima okrugao poprečni presek, što doprinosi bržem protoku tečnosti (Burton, 2004).



Slika 4.12. Uticaj negativnog hidrostatičkog pritiska (visine) na oblik kontakta tečnost - vlakno (Wiener, Dejlova, 2003)



Tečnost se zadržava u porama između (međuprostorima) vlakana, pri čemu su mogući sledeći slučajevi (slika 4.12) (Wiener, Dejlova, 2003):

A) - na visini  $H_{max}$  iznad površine slobodne tečnosti - negativan hidrostatički pritisak izuzetno visok i zakrivljenost površine je velika. Mali radijus krive koji daje mogućnost kontakta samo sa susednim vlaknima.

B) - međufaza između A i C.

C) - na maloj visini iznad slobodne površine tečnosti - negativan hidrostatički pritisak je nizak pa je zakrivljenost slobodne površine tečnosti takođe niska (veliki radijus) (Wiener, Dejlova, 2003).

Cimilli i saradnici (2010) slažu se sa činjenicom da tip vlakna, broj vlakana u poprečnom preseku pređe i konfiguracija vlakana u pređi, imaju odlučujući uticaj na svojstva kapilarnog kvašenja. Poređenjem ovih svojstava sportskih čarapa širokog spektra sirovinskog sastava, pokazali su da se vrednosti kapilarnog kvašenja smanjuju redosledno kod sledećih vlakana: mikromodal, hitozan, soja, modal, bambus, viskoza i pamuk. Pored toga, pokazalo se da razlike uslovljene sirovinskim sastavom ovih proizvoda mogu da budu značajne. Ovakve rezultate autori objašnjavaju faktorima kao što su debljina, veličina i oblik poprečnog preseka vlakana. Na primer, pukotine raspoređene uzdužno na površini bambusovog vlakna mogu izazvati značajno zadržavanje vode, što rezultira smanjenim vrednostima kapilarnog kvašenja (Xu et al., 2007). Veću vrednost kapilarnog kvašenja pletenine od mikromodala u poređenju sa pleteninom od modala autori objašnjavaju saznanjima do kojih su došli Ito i Muraoka (1993) prema kojima, za uspešni prenos tečnosti postoji kritičan broj vlakana (monofilamenata) u pređi.

Rajagopalan i saradnici (2001) zaključuju u svom istraživanju da su fenomeni provođenja tečnosti uglavnom uslovljeni poroznošću tekstilnih materijala ili preciznije, veličinom pora, njihovih rasporedom, međusobnom povezanošću i ukupnom zapreminom pora. Struktura pora u materijalima određena je vrstom vlakana, postupkom proizvodnje, kao i prečnikom vlakana, dužinom i oblikom, što sve skupa utiče na distribuciju kapilarnih kanala u vlaknima (Kornev, Neimark, 2001).

Da bi se ljudska koža održala suvom, veoma je bitan pažljiv odabir vlakana za lice i naličje pletenine. Prirodna vlakna su hidrofилna i predstavljaju dobar izbor pri manjim aktivnostima dok, materijali izrađeni od hidrofobnih vlakana predstavljaju dobar izbor za osnovni sloj odeće za primenu u uslovima većih fizičkih aktivnosti. Pojedina istraživanja pokazala su da upotreba mešavine vlakana u materijalima utiče na svojstva upravljanja tečnošću i brzinu sušenja određujući krajnju namenu materijala. Fangueiro i saradnici (2009) proučavali su sposobnost kapilarnog kvašenja i apsorpciju vlage pletenina homogenog sirovinskog sastava (100% vuna, 100% poliestar, 100% Coolmax, 100% Finecool), i pletenina izrađenih od mešavine vune sa poliestarskim i ovim funkcionalnim (tzv. high-tech) vlaknima u odnosu 50% - 50% i 75% - 25%. Najbolja svojstva upravljanja tečnošću, odnosno najbrže kapilarno kvašenje ispoljile su pletenine na bazi Coolmax vlakana. Sa druge strane, pletenine na bazi Finecool vlakana odlikovale su se bržim sušenjem posle kvašenja. Takođe, pokazalo se da je povećanje udela vunениh vlakana smanjilo apsorpciju vode, ali nije doprinelo brzini sušenja pletenina.

Su i saradnici (2007) su ispitivali sposobnost apsorpcije i prenosa vode, kao i brzinu sušenja glatkih DL pletenina izrađenih od kompozitnih pređa, čija je jedna komponenta bila pređa od mešavine profilisanih poliestarskih štapel i pamučnih vlakana, a druga poliestarski filament iste finoće. Ove pletenine su poređene sa varijantom izrađenom bez prisustva pamučnih vlakana. Rezultati su pokazali da prisustvo pamučnih vlakana doprinosi većoj apsorpciji vode, a prisustvo poliestarskog filameta ubrzava prenos tečnosti kroz materijal.

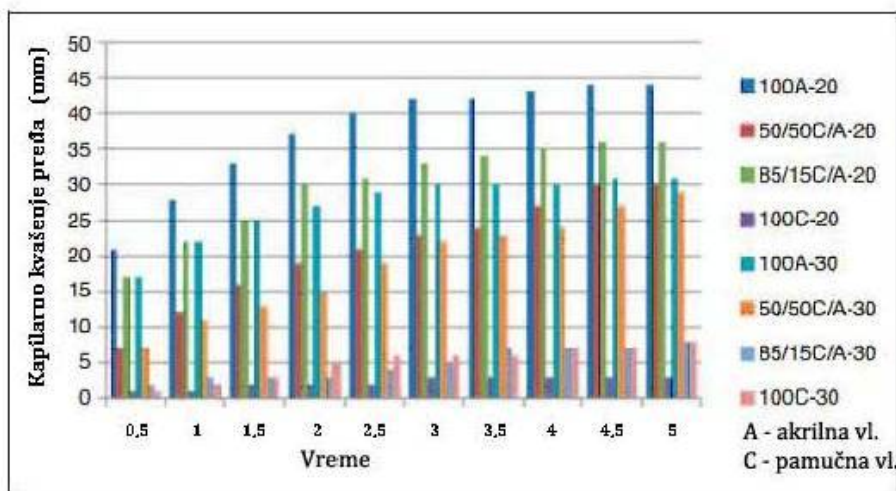
Tyagi i saradnici (2009) su u svom istraživanju ispitivali kapilarno kvašenje tkanina izrađenih od pređa proizvedenih od mešavine poliestarskih štapel vlakana okruglog ili



trilobalnog poprečnog preseka sa pamučnim ili viskoznim vlaknima. Pokazalo se da je bolje kapilarno kvašenje tkanina u slučajevima kada su upotrebljena profilisana (trilobalna) poliestarska vlakna. Takođe se pokazalo da veću sposobnost prenosa tečnosti imaju tkanine izrađene od mešavine poliestarskih i viskoznih vlakana.

U okviru istraživanja koje su sproveli Ozturk i saradnici (2011), ispitivana je sposobnost kapilarnog kvašenja rotorskih pamuk/akrilnih pređa sa različitim udelom vlakana i glatkih DL pletenina izrađenih od ovih pređa. Utvrdili su da se sposobnost kapilarnog kvašenja povećava sa povećanjem udela akrilnih vlakana u pređi (slika 4.13). Pored toga, utvrdili su da povećanje sadržaja akrilnih vlakana u mešavinama dovodi do smanjenja sposobnosti apsorpcije vlage. Razlog tome je činjenica da akrilna vlakna ne dozvoljavaju prodiranje vode u unutrašnjost strukture pređe jer se kretanje vode i apsorpcija javljaju samo na površini akrilnih vlakana.

Das i saradnici (2009a) su proučavali svojstva upravljanja vlagom grupe tekstilnih materijala izrađenih od mešavine viskoznih i poliestarskih štapel vlakana, pri čemu se udeo hidrofilnih vlakana kretao u rasponu od 100% do 20%. Pokazalo se da se vertikalno i horizontalno kvašenje ispitivanih materijala smanjuje sa povećanjem udela viskoznih vlakana u mešavini. Iako su uzorci sa većim sadržajem viskoznih vlakana brže apsorbovali tečnost, veća hidrofilnost ovih materijala dovela je do zadržavanja tečnosti u njima. Zbog toga, autori zaključuju da u uslovima veće količine znoja, bolje performanse obezbeđuju materijali sa većim udelom hidrofobnih (ovde poliestarskih) vlakana koji mogu brzo da prenose tečnost (apsorbovanu manjim udelom viskoznih vlakana) do spoljne površine materijala (Das et al., 2009a).



Slika 4.13 Kapilarno kvašenje pređa (Ozturk et al., 2011)

#### 4.2.2 Uticaj strukture pređe na svojstva upravljanja tečnošću

Struktura pređe i njena svojstva uslovljena su svojstvima vlakana i procesom transformacije vlaknaste mase u pređu. Neravnomernost pređe u pogledu gustine pakovanja vlakana, u velikoj meri utiče na kretanje tečnosti usled nasumičnog rasporeda vlakana u njoj. Povećanjem neravnomernosti odnosno hrapavosti površine pređe, povećava se ugao kvašenja, što usporava kretanje tečnosti (Kamath et al., 1994). Pređe od prirodnih vlakana u principu imaju veoma nepravilne kapilare zbog hrapavosti površine vlakana, neravnomernosti oblika poprečnog preseka i dužine vlakana. Kod pređa sa relativno neuređenim rasporedom vlakana, kontinuitet sistema kapilara je loš, a to uzrokuje promenjivu brzinu toka vode duž pređe. Pređe od sintetičkih vlakana su kompaktne sa jasno

definisanim porama između njih, što rezultira dobrim kapilarnim protokom i povećanom brzinom kapilarnog kvašenja (Su et al., 2007).

Novaković i saradnici (2015c) su ispitivali svojstva upravljanja vlagom glatkih DL pletenina izrađenih od štapelnih jednožičnih pređa od pamuka, konoplje i viskoze iste finoće. Prethodnim dubliranjem jednožičnih štapelnih pređa nastale su homogene pamučne, viskozne i konopljine pređe kao i nehomogene pređe, konoplja-viskoza i konoplja-pamuk. Pamučna pređa je predena rotorskim postupkom predenja, dok su pređe od konoplje i viskoze formirane na konvencionalnim prstenastim predilicama. Na taj način, distribucija pora u pleteninama je bila uslovljena ne samo deformacionim svojstvima upotrebljenih prirodnih i regenerisanih celuloznih vlakana, već i primenjenom tehnikom izrade pređe. Dobijeni rezultati su pokazali da i geometrija površine pređe može imati određenu ulogu u procesu prenosa vlage kroz pleteninu. Sprovedena istraživanja su pokazala da pažljiv izbor vlakana, uz adekvatno projektovanu strukturu pređe omogućuju projektovanje pletenine sa unapred definisanom sposobnošću upravljanja tečnošću.

Liu i saradnici (2008) su pokazali da je upredenost pređe, koja definiše gustinu pakovanja vlakana u pređi, od velikog značaja za upravljanje tečnošću. Sa većim upređanjem pređe dolazi do migracije vlakana, usled čega se modifikuje struktura pora unutar pređe. Sa jedne strane, smanjuje se prečnik mikropora (kapilara između vlakana u pređi), dok se sa druge strane, narušava kontinuitet kapilarnog sistema u pređi. Das i saradnici (2009b) su takođe, ispitujući svojstva upravljanja vlagom poliestar/viskoza tkanina, pokazali da su finoća i upredenost pređe značajni parametri za sposobnost upravljanja tečnošću tekstilnih materijala.

Das i saradnici (2008) su u drugom svom istraživanju proučavali interakciju efekata finoće i upredenosti pređe, kao i intenzitet končanja (sekundarnog upređanja) na kapilarno kvašenje končanih pamučnih pređa. Pređe su podvrgnute različitim metodama horizontalnog i vertikalnog kapilarnog kvašenja, uz korišćenje destilovane vode, slane vode ili nafte. Rezultati su pokazali da finoća i upredenost pređe predstavljaju ključne parametre kapilarnog kvašenja končanih pređa. Efekat sekundarnog upređanja nije tako izražen, posebno u slučajevima kada su primarna i sekundarna upredenost pređe istog intenziteta i suprotno usmerene.

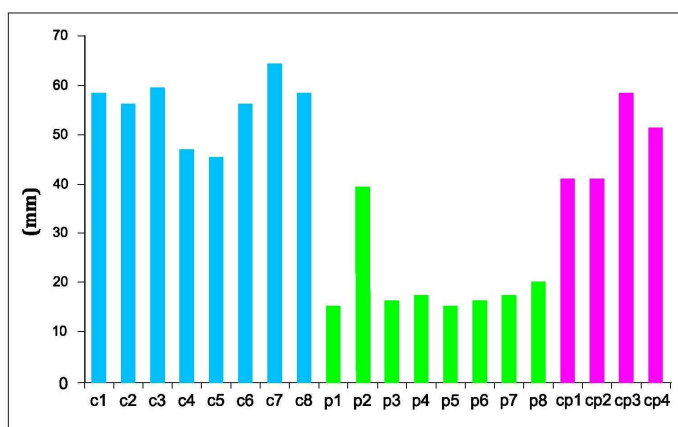
Doakhan i saradnici (2007) su ispitivali kapilarno kvašenje kompozitnih pređa izrađenih na način da jezgro pređe čini poliamidni multifilament, a pamučna pređa formira površinski sloj pređe. Ovakva heterogena struktura pređa, odnosno heterogenost sistema mikrokapilara u kompozitnim pređama, izazvala je značajne varijacije visine napredovanja tečnosti kako po dužini, tako i po poprečnom preseku pređe. Rezultati su takođe pokazali da struktura pređe, odnosno finoća i upredenost pređe, kao i naprezanje komponenata prilikom formiranja kompozitne pređe značajno uslovljavaju kapilarno kvašenje utičući na kontinuitet i veličinu mikrokapilara. Kontinuitet (međusobna povezanost) mikrokapilara smanjuje se sa povećanjem upredenosti i smanjenjem zategnutosti komponenata prilikom izrade kompozitnih pređa. Smanjenje veličine mikrokapilara u pređi dešava se sa povećanjem zategnutosti komponenata, smanjenjem finoće i povećanjem upredenosti poliamidnih multifilamenta (jezgra kompozitne pređe).

Stanković i saradnici (2006) su u svom istraživanju ispitivali svojstva upravljanja tečnošću rebrastih pletenina izrađenih od kompozitnih pređa na bazi konoplje. Kompozitne pređe su prozvedene končanjem konopljine pređe sa viskoznim ili poliamidnim (Tactel<sup>®</sup>) filamentom. Rezultati su pokazali da primena tehnike končanja pređa doprinosi poboljšanju svojstava upravljanja tečnošću (apsorpcija i kapilarno kvašenje) pletenina, jer omogućuje ne samo iskorišćenje prednosti različitih sirovina, već i iskorišćenje pozitivnih aspekata specifične strukture glatkih i teksturiranih filamenata.

Babu i saradnici (2015) su proučavali efekat finoće pređe na karakteristike upravljanja vlagom dvoslojnih pletenina izrađenih od pamučne i polipropilenske pređe. Zaključili su da je

kapilarno kvašenje uglavnom potencirano unutrašnjim polipropilenskim slojem pletenine. Dvoslojna pletenina sa spoljnim slojem od tanje pamučne pređe i debljom polipropilenom pređom u unutrašnjem sloju se odlikuje većom vrednošću vertikalnog kapilarnog kvašenja u poređenju sa drugim uzorcima. Pored toga, pokazalo se da pletenina sa polipropilenskom pređom veće finoće u kombinaciji sa debljom pamučnom pređom ispoljava veću površinu širenja tečnosti u odnosu na druge varijante pletenina. Generalno, potvrđeno je da izbor finoće pređe može biti važan faktor za poboljšanje karakteristika upravljanja vlagom kod dvoslojnih pletenina.

U okviru istraživanja koje su sproveli Jhanji i saradnici (2015b), varijante glatkih platiranih DL pletenina, koje su izrađene kombinovajem prstenaste pamučne pređe na licu pletenine, i poliestarskog, polipropilenskog ili poliamidnog filameta na naličju pletenine, isptivane su u pogledu sposobnosti prenosa tečnosti i brzine sušenja. Rezultati su pokazali da se kapilarno kvašenje u početku povećava sa povećanjem debljine pamučne pređe, međutim, daljim povećanjem njene debljine, usporava se kapilarno kvašenje. Uz činjenicu da je povećanje debljine pamučne pređe dovelo do povećanja apsorpcije (zadržavanje) vode i sporijeg sušenja, autori zaključuju da pletenine sa debljom pamučnom pređom na desnoj strani (licu pletenine) nisu efikasne za upotrebu pri intenzivnim fizičkim aktivnostima. Ispostavilo se da iz istih razloga platirana poliamid/pamučna pletenina nije pogodna za upotrebu u uslovima većih fizičkih aktivnosti. Najbolje performanse tekstilnog materijala namenjenog za upotrebu pri intenzivnim fizičkim aktivnostima ispoljila je platirana polipropilen/pamučna pletenina, sa finoćom upotrebljenih pređa oko 40 tex. U drugom svom istraživanju, Yhanji i saradnici (2017) su pokazali da sa povećanjem finoće pređe u donjem sloju (naličju) platirane pletenine dolazi do smanjenog zadržavanja tečnosti i ubrzanja kapilarnog kvašenja.



Slika 4.14. Eksperimentalni rezultati toka tečnosti kroz pređu (Almoughni, Gong, 2015)

Almoughni i Gong (2015) su sproveli sistematsko istraživanje uticaja strukturnih karakteristika pređa na kapilarno kvašenje glatkih DL pletenina. Njihov eksperimentalni materijal je obuhvatio grupu pređa različitog sirovinskog sastava (pamučne, poliestarske i pamuk/poliestarske pređe), uz variranje finoće, upredenosti i sastava mešavine. Na osnovu teorijske analize razvili su model za koji se pokazalo da je strogo korelisan sa eksperimentalnim rezultatima. Model predviđa da kako se povećava udeo površine mikropora u ukupnoj površini vlakana unutar pređe, očekuje se povećanje protoka tečnosti. Pored toga, model ukazuje na jak efekat ugla kvašenja na tok tečnosti kroz pređu, što su eksperimentalni rezultati i potvrdili. Naime, uočeno je veće kapilarno kvašenje pletenina izrađenih od pamuka (C1 – C8) i od mešavine pamuk/poliestar (CP1 – CP4), posebno onih sa većim sadržajem pamuka (CP3 i CP4) (slika 4.14). Iako se ovakvi rezultati u suprotnosti sa

nekim generalizovanim stavovima o brzini kapilarnog kvašenja materijala izrađenih od hidrofilnih i hidrofobnih vlakana, objašnjenje je u činjenici da je geometrija pamučnih vlakana uzrokovala veću specifičnu površinu i veći broj manjih kapilara u pređi, a to je dovelo do porasta kapilarnih sila. Niže vrednosti kapilarnog kvašenja pamučnih pletenina C4 i C5 prouzrokovane su većom upredenošću pamučnih pređa. Jedino je uzorak poliestarske pletenine (P2) ispoljio veću brzinu kapilarnog kvašenja u odnosu na ostale poliestarske pletenine (P1 – P8), što se objašnjava većom površinom na raspolaganju za tok tečnosti usled veće finoće upotrebljene varijante poliestarske pređe u odnosu na ostale varijante pređa.

Sampath i saradnici (2011) su analizirali uticaj finoće i broja monofilamenata u filamentnoj pređi na sposobnost lateralnog prenosa tečnosti glatkih DL pletenina (iste dužine petlji). Pletenine su izrađene od pet poliestarskih filamenata koji su se međusobno razlikovali po finoći monofilamenata. S obzirom da su se finoće monofilamenata razlikovale, ista finoća svih pet filamentnih pređa (150 den) postignuta je različitim brojem monofilamenata u pređi: 34 monofilamenta (finoća monofilamenta 4,4 den), 48 monofilamenata (finoća monofilamenta 3,13 den), 108 monofilamenata (finoća monofilamenta 1,39 den), 144 monofilamenata (finoća monofilamenta 1,04 den), i 288 monofilamenata (finoća monofilamenta 0,52 den). Upoređujući sve izabrane pletenine, konstatovali su da pletenina izrađena od pređe sa 108 monofilamenata pokazuje veću brzinu kapilarnog kvašenja za 6% do 18% od ostalih uzoraka. Sa druge strane, pletenina izrađena od pređe sa najvećim brojem monofilamenata ima 20% veću površinu širenja vode u odnosu na ostale uzorke. Autori zaključuju da je u slučaju pređa sa tanjim monofilamentima prisutan veći površinski napon koji zadržava tečnost i prenosi je lateralno nasuprot gravitacionoj sili. Pored toga, kod pletenina izrađenih od filamenata sa većim brojem monofilamenata povećana je sposobnost zadržavanja vode.

Ispitujući kapilarno kvašenje tkanina izrađenih od pređa od mešavine vlakana (poliester/pamuk i poliester/viskoza), i izrađenih po postupku prestenastog pređenja ili pređenja vazдушnim mlazom, Tyagi i saradnici (2009) su ustanovili da upotreba pređa izrađenih postupkom pređenja vazдушnim mlazom (eng. air-jet) dovodi do slabijeg kapilarnog kvašenja kod tkanina.

Ozturk i saradnici (2011) su, pored efekta vrste vlakana i udela vlakana u mešavini (slika 4.14) u svom istraživanju potvrdili da se sposobnost kapilarnog kvašenja rotorskih pređa direktno reflektuje na sposobnost kapilarnog kvašenja pletenina izrađenih od njih, i to kako u pravcu nizova, tako i u pravcu redova pletenine. Pored toga, autori su potvrdili porast kapilarnog kvašenja rotorskih pređa i pletenina (izrađenih od njih) sa povećanjem debljine pređe (slika 4.14). Ovo objašnjavaju povećanjem broja vlakana u poprečnom preseku pređe, što verovatno vodi ka razvijenijem sistemu mikrokapilara sa poboljšanom međusobnom povezanošću.

Oglakcioglu i saradnici (2015) su u okviru svog obimnog istraživanja izradili glatke DL pletenine namenjene za letnju odeću koristeći hibridne pređe nastale končanjem tzv. „high-tech“, poliestarske pređe napravljene od profilisaih ili šupljih vlakana sa pamučnom ili liocel pređom. Rezultati ispitivanja svojstava upravljanja tečnošću ovih pletenina pokazali su da upotreba specijalnih poliestarskih pređa doprinosi bržem sušenju pletenina. Posebno se izdvojila pletenina koja je kao komponentu imala pređu od profilisanih poliestarskih vlakana, kao vrlo pogodna za primenu u uslovima visokih temperatura i većih fizičkih aktivnosti.

#### **4.2.3 Uticaj strukture tekstilnih materijala na svojstva upravljanja tečnošću**

Generalno se smatra da je sposobnost tekstilnih materijala da propuštaju ili zadržavaju tečnost uslovljena kako svojstvima vlakana i pređa od kojih su izrađeni, tako i konstrukcionim parametrima samih materijala kojima je definisana distribucija pora u materijalu. Činjenica je da, prilikom kapilarnog kvašenja tekstilnih materijala, pravac kretanja vode prati kapilarne prostore duž pređe, što smanjuje diskontinuitet kapilarnog kvašenja. Otuda, veći broj vlakana

u preseku debljih pređa može dovesti do veće kapilarnosti i kontinuiteta kapilara formiranih vlaknima što potpomaze napredovanje tečnosti. Deblje pletenine mogu obezbediti više prostora za smeštaj vode, što može dovesti do prenosa veće količine vode u zavisnosti od raspoloživog kapilarnog prostora, kao i prisutnog kapilarnog pritiska (Ozturk et al., 2011). Sa druge strane, Crow i Osczevski (1993) tvrde da veća količina vode koju deblja pletenina može da apsorbira otežava isparavanje, odnosno produžava vreme sušenja. Do istog zaključka došli su Bedek i saradnici (2011) ispitujući svojstva upravljanja tečnošću rebrastih i interlok pletenina namenjenih za sportsku odeću.

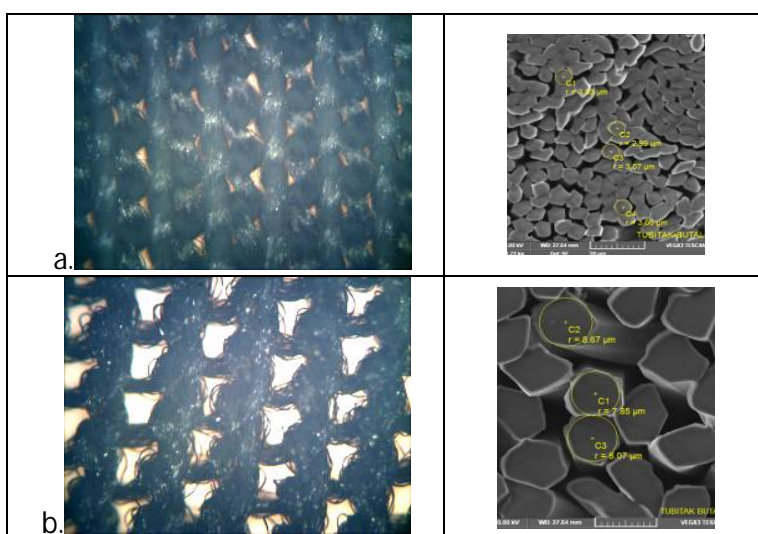
Achour i saradnici (2015) su ispitali uticaj geometrijskih parametara pletenine na kapilarno kvašenje i isparavanje tečnosti koristeći eksperimentalne i analitičke metode. Ispitujući kapilarno kvašenje pletenina u atmosferi zasićenoj vlagom (99%), i u uobičajenim atmosferskim uslovima, potvrdili su značajan uticak gravitacije i efekta isparavanja vode na kapilarno kvašenje pletenina različitih struktura, ili preciznije, na visinu napredovanja tečnosti. Pokazali su da je efekat isparavanja u velikoj meri uslovljen debljinom i poroznošću pletenina.

Zhuang i saradnici (2002) istraživali su propustljivost tečnosti pletenina namenjenih za sportsku odeću i donje rublje (pri različitim pritiscima u različitim vremenskim intervalima). Ispitali su uzorke pletenina u suvom i mokrom stanju, i konstatovali su da na propuštanje tečnosti utiču dva faktora, spoljni pritisak na slojeve pletenine i količina vode. Veći spoljni pritisak, samim tim i veći broj dodirnih tačaka između dva sloja pletenina mogu poboljšati prenos tečnosti. Rezultati su pokazali da je optimalna vrednost pritiska oko 14 kg/m<sup>2</sup> za date pletenine a najveći pritisak simulirao je stanje kada osoba nosi ranac na leđima od 55 kg. Veći pritisak znači brži početak prenosa tečnosti sa vlažnog sloja na prvi sledeći sloj u odeći i na taj način se odvodi višak tečnosti od tela.

Yanilmaz i Kalaoglu (2012) su poredili pletenine različitih prepletaja (glatka DL, DD, rebrasta i interlok) u pogledu sposobnosti kvašenja, kapilarnog kvašenja i brzine sušenja. Pored toga, ispitali su uticaj gustine petlji na ispitivana svojstva pletenina. Kada se radi o kapilarnom kvašenju u pravcu nizova, redosled pletenina u pogledu visine kvašenja je bio isti za obe varijante površinske gustine petlji (broj petlji na jedinici površine pletenine): rebrasta > interlok > DD > glatka DL. Pri tome, bolju sposobnost kapilarnog kvašenja ispoljile su varijante pletenina sa manjom gustinom petlji. Prilikom kvašenja u pravcu redova, došlo je do promene redosleda pletenina: interlok > glatka DL > rebrasta > DD, pri čemu su za sve pletenine veću visinu kapilarnog kvašenja ispoljile varijante pletenina sa većom gustinom petlji. Uočene kompleksne efekte strukture pletenina na svojstva upravljanja tečnošću autori objašnjavaju efektima koje različiti prepletaji pletenina imaju na njihovu debljinu, poroznost, distribuciju pora, dužinu petlje, gustinu i slično. Kada se radi o brzini sušenja ispitivanih pletenina, ustanovljen je sledeći redosled pletenina u pravcu rastuće brzine isparavanja tečnosti: rebrasta < interlok < DD < glatka DL. Varijante pletenina sa manjom gustinom petlji odlikovale su se većom brzinom sušenja. Merenjem ugla kvašenja autori su ocenili sposobnost kvašenja pletenina. Za sve prepletaje, manjim uglom kvašenja su okarakterisane varijante pletenina sa manjom gustinom petlji, što upućuje na veću brzinu prenosa tečnosti. Slične rezultate su dobili i Ramachandran i sar. (2010). Dobijene rezultate autori objašnjavaju uticajem vrste prepletaja i gustine petlji na hrapavost površine pletenina.

Jhanji i saradnici (2017) su ispitali kapilarno kvašenje i brzinu sušenja glatkih platiranih pletenina koje su se, osim različitih komponenti na naličju tkanine, razlikovale i prema dužini petlje. Ustanovljeno je da su varijante pletenina veće dužine petlji imale veću sposobnost zadržavanja vode, pre svega zbog veće zapremine pora. Naime, veća zapremina pora može da primi veću količinu vode u strukturu pletenine. Imajući u vidu istraživanje Longa (1999), u kome je pokazao da apsorpcija vode utiče negativno na prenos tečnosti iz unutrašnjeg na spoljni sloj, može se reći da sa aspekta upravljanja tečnošću prednost imaju platirane pletenine manje dužine petlji.

Kaynak i Babaarslan (2016) su ispitivali dinamička svojstva upravljanja tečnošću glatkih DL pletenina izrađenih od poliestarskih filamenata različite finoće. Kako su pletenine bile izrađene pod istim tehnološkim parametrima, međusobno su se razlikovale u distribuciji pora (mikro- i makropora) u pleteninama (slika 4.15). Pletenina izrađena od debljeg filameta (3,05 dtex) imala je manji broj petlji i makropore većih dimenzija (slika 4.15b). Rezultati su pokazali da ove pletenine brzo i ravnomerno prenose tečnost (kroz pleteninu, kao i po širini pletenine) zbog većih makropora jer, kako je poznato (Benltoufa et al., 2007; Birrfelder et al., 2013), makropore su odgovorne za brzo širenje tečnosti.



Slika 4.15. Pletenine izrađene od filamenata različite finoće: 0,33 dtex (a); 3,05 dtex (b) (Kaynak, Babaarslan, 2016)

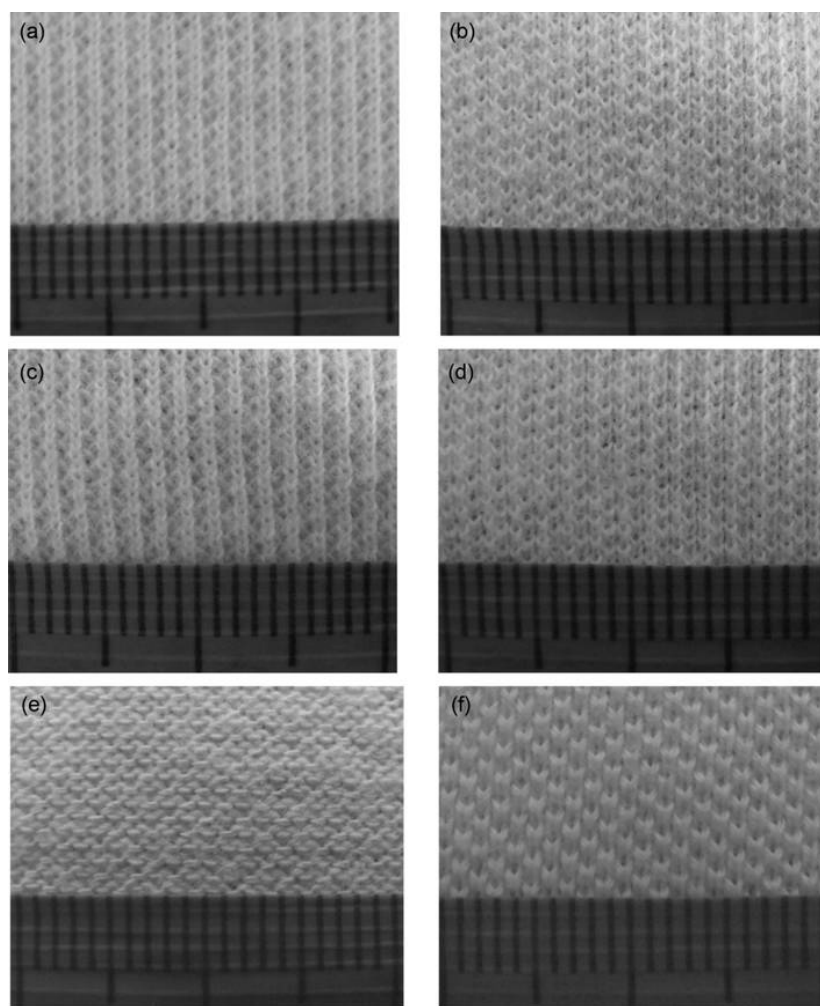
Hu i saradnici (2005) su u svom radu predstavili rezultate ispitivanja svojstava upravljanja tečnošću tekstilnih materijala namenjenih za sportsku odeću svetski poznatih brendova. Konstatovali su da se različiti sportski materijali karakterišu različitim svojstvima dinamičkog prenosa tečnosti. Neki materijali brzo odvedu znoj sa površine kože na spoljnu stranu materijala, dok drugi apsorbiraju vlagu, ili su vodoodbojni. Upoređivanjem objektivnih i subjektivnih metoda ispitivanja sportske odeće tokom vežbanja, pokazalo se da se objektivno određen parametar - ukupni kapacitet upravljanja vlagom (eng. overall moisture management capacity, OMMC) podudara sa subjektivnim osećajem vlažnosti posle 15 - 20 min vežbanja. Time je utvrđeno da se ovaj parametar može koristiti za evaluaciju sportskih materijala u pogledu udobnosti vezane za vlažnost.

Ozkan i Binnaz (2015) su ispitivali šest različitih tipova komercijalno dostupnih poliestarskih pletenina namenjenih za letnju biciklističku odeću. Eksperimentalni materijal je obuhvatao kulirane pletenine (glatke DL, interlok) i osnovo-prepletaće pletenine. Između ostalog, ovi uzorci su poređeni u pogledu svojstava upravljanja vlagom, i ispostavilo se da najbolje performanse upravljanja vlagom ima uzorak osnovo-prepletaće pletenine tipa „rašel“. Ovaj tip pletenine, zahvaljujući dobrim svojstvima upravljanja vlagom, omogućuje da koža ostane suva, ali omogućuje i brzo oslobađanje viška toplote tokom fizičkog napora.

U okviru istraživanja koja su sproveli Chen i saradnici (2015), izrađene su dvoslojne pletenine specijalne strukture kombinovanjem dve pređe u donjem sloju pletenine (formiranjem zahvatnih petlji), i njihovim razdvajanjem da formiraju petlje odvojeno u gornjem sloju, formirajući na taj način dodatni kanal za prenos tečnosti duž pređe, od donjeg ka gornjem sloju pletenine. Na ovaj način su proizvedene 100% pamučna i 100% poliestarska



pletenina, kao i odgovarajući kontrolni uzorci u jednostrukom pike prepletaju. Izgled ovih pletenina prikazan je na slici 4.16. Rezultati su potvrdili veću brzinu kapilarnog kvašenja ovih specijalnih pletenina u poređenju sa kontrolnim uzorcima, pri čemu je poliestarska pletenina ispoljila veću brzinu kapilarnog kvašenja i veću visinu napredovanja tečnosti u odnosu na pamučnu pleteninu, verovatno kao posledica hidrofobnosti poliestarskih vlakana. Rezultati su takođe pokazali da gustina petlji utiče kako na visinu, tako i na brzinu kapilarnog kvašenja. Manja gustina petlji vodi ka većoj brzini kapilarnog kvašenja, ali manjoj visini napredovanja tečnosti. To je pripisano većim dimenzijama kapilara koje sadrže veću količinu vode, čime u određenoj meri jača gravitaciona sila snižavajući ravnotežni nivo (visinu) kvašenja. Pored toga, u većim kapilarama opada kapilarni pritisak koji predstavlja pokretačku silu kapilarnog kvašenja materijala. Proizvedene pletenine specijalne strukture pokazale su i veću brzinu apsorpcije vode u poređenju sa kontrolnim uzorcima. Kako se ove specijalne strukture pletenina odlikuju manjim brojem petlji, a time i većim otvorenim porama na naličju (donjem sloju) pletenine, to je ubrzalo lateralni prenos tečnosti. Veće dimenzije pora kod pletenina sa manjom gustinom petlji uzrokovale su bržu apsorpciju vode. Zahvaljujući hidrofilnoj prirodi pamučnih vlakana, pamučne pletenine su ispoljile značajno veću brzinu apsorpcije vode u poređenju sa poliestarskim pleteninama.



Slika 4.16. Različite strukture pamučnih pletenina: naličje - donji sloj (a) i lice - gornji sloj (b) pletenine veće gustine petlji; lice (c) i naličje (d) pletenine manje gustine petlji; lice (e) i naličje (f) kontrolne pletenine (Chen et al., 2015)

Sedam tipova dvoslojnih pletenina namenjenih za sportsku odeću evaluirano je u pogledu svojstava upravljanja tečnošću u istraživanju koje su sproveli Suganthi i Senthilkumar (2018). Ispitivane pletenine su izrađene kombinovanjem različitih pređa kao spoljni (lice) i unutrašnji (naličje) sloj pletenine: viskoza-polipropilen, modal-polipropilen, viskoza-poliestarska mikrovlakna, modal- poliestarska mikrovlakna, viskoza-poliestar, modal-poliestar, bambusova vlakna-poliestar. Kao najbolja se izdvojila dvoslojna pletenina sa spoljnim slojem od modalnih vlakana i naličjem od poliestarskih mikrovlakana. Ova pletenina je okarakterisana boljim vremenom kvašenja, većim prečnikom kvašenja, i zadovoljavajućom brzinom apsorpcije i širenja tečnosti.

Supuren i saradnici (2011) su ispitivali svojstva upravljanja tečnošću specijalnih dvoslojnih pletenina kod kojih su kombinovane pamučna i polipropilenska pređa na način da iste pređe (obe pamučne ili obe polipropilenske) budu i na licu i na naličju pletenine, ili tako da pamučna pređa bude na licu, a polipropilenska na naličju, i obrnuto. Pokazalo se da se najbolji rezultati u pogledu sposobnosti prenosa tečnosti dobijaju kada se pamučna pređa nalazi na naličju, a polipropilenska pređa na licu dvoslojne pletenine.

Interesantno je istraživanje koje su sproveli Birrfelder i saradnici (2013). Oni su analizirali poliestarske pletenine različitih prepletaja i različite finoće vlakana u pređi, uz pomoć metode rendgenskim zracima (X-zracima) i došli su do rezultata kapilarnog kvašenja gotovo u realnom vremenu. Uočili su pojavu dva fronta prilikom kvašenja ovih pletenina, što je pripisano razlikama u načinu kvašenja mikro (kapilare između vlakana u pređi) i makropora (pore između segmenata pređe u pletenini). Prvi front napredovanja tečnosti, kada je sadržaj vode do 10%, povezan je sa kapilarnim kvašenjem mikropora, dok drugi front, kada je sadržaj vode 50-70% pripada kapilarnom kvašenju makropora. Autori su zaključili da hidrofobni unutrašnji sloj može biti idealan za odvođenje viška tečnosti od kože ljudskog tela ako je drugi sloj hidrofilan od kojeg se očekuje da odvede višak tečnosti dalje od kože da bi koža bila relativno suva. Takođe, na osnovu rezultata autori tvrde da upotreba rebrastih pletenina doprinosi ubrzanju prenosa tečnosti između slojeva pletenine, dok interlok prepletaj preporučuju kao bolji za prenos tečnosti u jednoj ravni. Svi ovi rezultati pokazuju da se izborom odgovarajuće pređe i finoće vlakana, čime se kontrolišu kontaktne površine između slojeva odeće, mogu projektovati materijali sa značajno poboljšanim svojstvima toplotnog komfora.

Troynikov i Wardiningsih (2011) su ispitivali svojstva upravljanja tečnošću glatkih platiranih DL pletenina homogenog sirovinskog sastava (100% vuna, 100% poliestar i 100% bambus), kao i pletenine od mešavine vuna/poliestar i vuna/bambus sa različitim procentualnim udelom pojedinih vlakana, koje su bile namenjene kao baza za sportsku odeću. Kombinovanje različitih sirovina postignuto je prilikom izrade samih pletenina istovremenim polaganjem na igle dve pređe različitog sirovinskog sastava. Kako su se upotrebljene pređe razlikovale u finoći (debljini), dobijen je različit udeo mešavine vlakana. Rezultati su pokazali da se mešanjem ovih vlakana (vuna/poliestar i vuna/bambus) postižu bolja svojstva pletenina u pogledu upravljanja tečnošću u poređenju sa pleteninama homogenog sirovinskog sastava.

Manshahia i Das (2013) analizirali su pletenine za izradu moderne sportske odeće (za tenis i fudbal) poznatih brendova. Sve ispitivane pletenine, koje su se razlikovale po prepletaju (glatka platirana DL, interlok, petinet) su bile izrađene od poliestarskih filamenata sa različito profilisanim poprečnim presekom pređe. Uočeno je brže kapilarno kvašenje pletenina u pravcu nizova u odnosu na pravac redova, kao posledica različite putanje toka tečnosti. Rezultati su ukazali na značajan uticaj oblika poprečnog preseka vlakana na sposobnost kapilarnog kvašenja, pri čemu je doprinos poboljšanju prenosa tečnosti veći u slučaju filamenata čiji oblik poprečnog preseka više odstupa od pravilnog kružnog oblika. Pored toga, pokazalo se da tanji filamenti obezbeđuju bolje kapilarno kvašenje zbog veće specifične površine. Pokazalo se takođe da se veća apsorpcija tečnosti postiže u slučaju veće



debljine pletenine, bez obzira na njen prepletaj. Ipak, utvrđeno je da se najvećim kapacitetom apsorpcije vode odlikuju pletenine sa najvećom poroznošću.

Hsieh (1995) je, pored efekata površine vlakana, ispitivao uticaj geometrije pora u tkaninama na njihovu sposobnost zadržavanja i prenosa tečnosti. On je u svom istraživanju pokazao da zadržavanje i prenos tečnosti u tkaninama nije uslovljeno samo veličinom pora već i ukupnom poroznošću tkanine. Bolje upravljanje tečnošću u tkaninama može se postići kontrolisanjem veličina pora i njihove distribucije. U manjim porama stvara se veći kapilarni pritisak i na taj način poboljšava širenje tečnosti, dok se veća količina tečnosti zadržava u većim porama. Brzinu širenja tečnost kroz vlaknaste materijale olakšavaju manje ravnomerno raspoređene i međusobno povezane pore. Poredeći dve tkanine istog prepletaja, mase i debljine, ali različitog sirovinskog sastava, Hsieh je potvrdio efekat vrste vlakana na svojstva upravljanja tečnošću. Razlika u gustini pamučnih i poliestarskih vlakana od 10% rezultovala je 23% većim kapacitetom apsorpcije vode pamučne tkanine. Bolja sposobnost apsorpcije vode i nepravilan oblik pamučnih vlakana doprineli su većoj sposobnosti apsorpcije vode, i to četiri puta većoj u poređenju sa poliestarskom tkaninom. Na taj način Hsieh je pokazao da svojstva upravljanja tečnošću zavise kako od interakcije vlakno-voda, tako i od geometrijskih parametara poroznosti tekstilnog materijala. Promena bilo kog od ovih faktora rezultira promenama u prenosu i apsorpciji tečnosti.

U drugom svom istraživanju Hsieh i saradnici (1992b) su ispitivali svojstva upravljanja tečnošću tkanina homogenog sirovinskog sastava (100% pamuk, 100% poliestar, 100% naylon, 100% Nomex i 100% acetat) i pamuk (Co)/polestar (PES) mešavine različitog procentualnog udela vlakana (35%Co+65%PES, 50%Co+50%PES i 65%Co+35%PES) putem parametara: trenutno kvašenje i kapilarno kvašenje, distribucija tečnosti u materijalu i ravnotežni kapacitet zadržavanja tečnosti. Rezultati su pokazali da je zadržavanje vode u tkaninama od mešavina koje sadrže 50% ili više pamučnih vlakana bilo slično tkaninama od 100% pamuka, a značajno niže kod tkanina sa 35% ili manje pamučnih vlakana. Manje zadržavanje tečnosti u poliestarskim tkaninama je, osim prirode vlakana, dovedeno u vezu i sa manjom ukupnom zapreminom pora ovih tkanina. Merenjem ugla kvašenja filmova, vlakana i tkanine istog hemijskog sastava (isti polimer), dokazano je da je „specifična“ sposobnost kvašenja tkanine definisana hemijskim sastavom substrata. Međutim, kapacitet zadržavanja tečnosti je, pored površinskih svojstava vlakna (ugao kvašenja površine vlakna), uslovljen i geometrijom mikrokapilara u tkanini.

Ispitivanjem ponašanja tkanina izrađenih od poliestarskih i pamučnih pređa, uz variranje gustine osnove i potke, Yingchun i Li (2010) su došli su do zaključka da brzina apsorpcije vlage zavisi od gustine tkanine. Rezultati su pokazali da je brzina apsorpcije vlage tkanina obrnuto srazmerna odnosu gustine osnove i potke, ili drugim rečima, brzina apsorpcije vlage opada sa povećanjem gustine osnove i potke.

Zahra i saradnici (2018) analizirali su parametre upravljanja vlagom i vreme kvašenja tkanina kod kojih je, pored 100% pamučne pređe za osnovu, za potku upotrebljena 100% tencel, modal, pro modal, bambus, poliestar ili pamučna pređa. Rezultati su generalno pokazali da su ispitivana svojstva tkanina bila uslovljena kako svojstvima vlakana, tako i strukturnim karakteristikama upotrebljenih pređa. Potvrđena je različita brzina kapilarnog kvašenja tkanina u pravcu osnove i u pravcu potke. Tkanine sa potkom od bambusovih i pro modal vlakana ispoljile su slično ponašanje u pogledu svojstava upravljanja vlagom, a zbog njihove povoljnije cene u poređenju sa tencelom i modalom, autori ih predlažu kao pravi izbor u mnogim praktičnim primenama, uključujući i sportsku odeću, konkretno odeću za igrače golfa.

Hamdaoui i Nasrallah (2015) su ispitivali kapilarno kvašenje grupe pamučnih tkanina različitih prepletaja (platno, keper, saten), uz variranje gustine potke. Eksperimentalni rezultati su pokazali da se u početku odvija brz proces kapilarnog protoka vode prvo u makroporama (pore između pređa u tkanini) i mezoporama (pore između vlakana u pređi) a

potom sporiji proces u mikroporama (pore unutar vlakana). Na početku eksperimenta (za kraći vremenski period) za protok tečnosti odgovorne su makro i mezopore dok su za duži vremenski period trajanja eksperimenta odgovorne mikropore. Uočene su značajne razlike u brzini kapilarnog kvašenja i visini napredovanja tečnosti između tkanina različitog prepletaja. Redosled tkanina u pravcu poboljšanja kapilarnog kvašenja je platno < keper < saten. Pored toga, ustanovljeno je da manja gustina potke poboljšava kapilarno kvašenje tkanine. Rezultati su takođe pokazali da sposobnost apsorpcije vode zavisi od prepletaja i od gustine potke. Redosled tkanina u tom smislu je platno (najmanja apsorpcija) < keper < saten. Sa porastom broja žica potke, smanjuje se sposobnost apsorpcije tkanina.

Zhu i Takatera (2015) su u svom istraživanju merili koeficijent kapilarnog kvašenja tkanina kod kojih je osnova od pamučne pređe, a potka od različitih hidrofilnih i hidrofobnih pređa. Pokazalo se da je koeficijent kapilarnog kvašenja približno isti za sve tkanine u pravcu potke. Međutim, prilikom kapilarnog kvašenja tkanina u pravcu osnove, ustanovljena je negativna korelacija između koeficijenta kapilarnog kvašenja i utkanja osnove. Sa porastom utkanja žica osnove, povećava se i putanja kretanja tečnosti čime se smanjuje koeficijent kapilarnog kvašenja. Tečnost se, prolazeći duž osnovinih žica, akumulira u porama između uzdužnih i poprečnih pređa (osnova i potka) (slika 4.17), predstavlja novi rezervoar koji, kada se poveže sa hidrofilnom poprečnom pređom (potkom), omogućuje migraciju tečnosti na suhu pređu. Ovaj efekat se ne zapaža u slučaju kada se u tkanini nalazi hidrofobna potka. Pokazalo se da je najviši koeficijent kapilarnog kvašenja dobijen kada je gustina tkanja po osnovi bila najviša.



Slika 4.17. Uzdužni presek tkanine (Zhu, Takatera, 2015)

## 5. CILJ I SADRŽAJ RADA

Odeća i odevni tekstilni materijali mogu se posmatrati kao deo čovekovog termoregulacionog sistema, čiji je prvenstveni zadatak da održava termofiziološku ravnotežu čoveka razmenom energije i mase sa okruženjem. Ova termodinamička razmena često se dešava u neravnotežnim uslovima usled promene ambijentalnih uslova (temperatura, vlaga) i intenziteta fizičke aktivnosti čoveka. U ovakvim neravnotežnim ili dinamičkim uslovima, tekstilni materijal može da ima presudnu ulogu u procesu ponovnog uspostavljanja ravnotežne razmene energije i mase između čoveka i njegovog bliskog okruženja. Polazeći sa ovog stanovišta, predmet ove doktorske disertacije je ispitivanje i analiza parametara toplotnog komfora koji određuju dinamički odziv tekstilnih materijala na fiziološke impulse i klimatske promene okruženja u cilju utvrđivanja novih saznanja, i unapređenju postojećih fundamentalnih znanja o toplotnim svojstvima, propustljivosti vazduha i tečnosti kod odevnih tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima razmene energije i mase. Pored toga, kako je pregled literature ukazao na nedostatak podataka o svojstvima tekstilnih materijala u pogledu toplotnog komfora u dinamičkim uslovima u periodu njihove upotrebe (nošenje i nega odevnih predmeta), još jedan cilj ove disertacije bio je praćenje i analiza promene ovih svojstava (ispitivanih parametara) posle sprovedenog testa nege i nošenja odevnih predmeta koji su izrađeni od ispitivanih tekstilnih materijala.

Polazeći od prisutnih tendencija održivog razvoja, koje idu u pravcu korišćenja tekstilnih materijala i tekstilnih sirovina sa dobrim potencijalom u pogledu više komponenti održivosti (ekološki, ekonomski, socijalni), u okviru ove doktorske disertacije pošlo se od pređe od konoplje kao osnove za izradu zdravih tekstilnih materijala sa zadovoljavajućim svojstvima komfora i poboljšanim aspektima održivosti. U želji da se anuliraju određeni nedostaci tekstilnih materijala od konoplje u pogledu taktilnog komfora, a koji proističu iz tvrdog opipa i slabe elastičnosti konopljinih vlakana, odabrana je poliakrilonitrilna (PAN) pređa kao komponenta koja bi tekstilnom materijalu obezbedila zadovoljavajuća svojstva taktilnog i toplotnog komfora, i istovremeno unapredila druge performanse tekstilnih materijala i proizvoda na bazi konoplje (lakše održavanje i duži funkcionalni život proizvoda).

Poznato je da tehnologija pletenja nudi određene prednosti u poređenju sa tehnologijom tkanja, kako u pogledu komfora, tako i sa aspekta ekologije i proizvodnih troškova. Pored toga, primenjena tehnologija izrade pletenina (pletenje na kružnoj pletaćoj mašini) omogućila je kombinovanje različitih komponenti tj. pređa različitog sirovinskog sastava na način da budu iskorišćene prednosti interne strukture pojedinih pređa. To je ostvareno kombinovanjem pređa (različitog ili istog sirovinskog sastava) prilikom same izrade pletenina.

U svrhu realizacije cilja ove doktorske disertacije, proizvedene glatke DL pletenine podvrgnute su ispitivanju svojstava koja karakterišu ponašanje tekstilnih materijala u pogledu toplotnog komfora u dinamičkim uslovima. To su toplotna svojstva, svojstva upravljanja tečnošću i propustljivost vazduha. Plan istraživanja u okviru disertacije ostvaren je upotrebom odgovarajućih procedura i eksperimentalnih tehnika prema originalnim, ili modifikovanim postojećim metodama, kao i primenom statističkih metoda (ANOVA, Studentov t-test, t-test uparenih uzoraka) za obradu i analizu dobijenih rezultata.

Toplotna svojstva glatkih DL pletenina definisana su parametrima - toplotna apsorptivnost ( $b$ ) i toplotna difuzivnost ( $\alpha_d$ ), koji definišu toplotno ponašanje tekstilnih materijala u tzv. „prelaznom režimu“ termodinamičke razmene do uspostavljanja ravnotežnog stanja. Prisutne poteškoće prilikom pokušaja eksperimentalnog određivanja parametara (toplotna apsorptivnost i toplotna difuzivnost) koji definišu ponašanje tekstilnih materijala u neravnotežnim uslovima, dovele su do toga da se u istraživačkoj praksi koriste metode koje se zasnivaju na izračunavanju vrednosti ovih parametara na osnovu izmerenih vrednosti drugih parametara (toplotna provodljivost, toplotni kapacitet). U okviru ovih istraživanja, toplotna

apsorptivnost i toplotna difuzivnost izračunati su na osnovu eksperimentalno određenog toplotnog kapaciteta ispitivanih pletenina, i prethodno određenih vrednosti toplotne provodljivosti. U tu svrhu, upotrebljena je metoda za određivanje toplotnog kapaciteta tekstilnih materijala, koja je razvijena na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Svojstva upravljanja tečnošću kod glatkih DL pletenina ispitivana su primenom testa distribucije vode (Malden Mills test), koji je omogućio evaluaciju sposobnosti pletenina da propuštaju tečnost u pravcu njihove debljine, pomoću parametara – sposobnost prenosa tečnosti (WD) i sposobnost zadržavanja tečnosti (W). Pored činjenice da je testom distribucije vode realizovana ocena svojstava lateralnog upravljanja tečnošću kod pletenina (sa jedne na drugu površinu u pravcu debljine pletenine), što odgovara realnoj situaciji prilikom nošenja odevnog predmeta, primenjena metoda je takođe omogućila ispitivanje svojstava upravljanja tečnošću uz kontrolisano variranje sadržaja vlage (0, 5, 10, 15, 20, 25, i 30%) u uzorcima pletenina. Na taj način je bilo moguće praćenje i analiza dinamike lateralnog prenosa tečnosti. Budući da ovakva istraživanja do sada nisu rađena, ovakav eksperimentalni plan je obezbedio određena nova saznanja o fenomenu upravljanja tečnošću, i ukazao na mogućnosti proširenja primene testa distribucije vode za ispitivanje u dinamičkim uslovima.

Imajući u vidu da prilikom lateralnog prenosa tečnosti, dolazi i do radijalnog kvašenja, odnosno do širenja tečnosti po širini tekstilnog materijala mehanizmom kapilarnog kvašenja, sprovedeno je i ispitivanje kapilarnog kvašenja glatkih DL pletenina upotrebom eksperimentalne procedure razvijene na Katedri za tekstilno inženjerstvo Tehnološko-metalurškog fakulteta, a koja se bazira na dobro poznatom principu vertikalnog kvašenja „test-trake“. Sposobnost kapilarnog kvašenja glatkih DL pletenina ocenjena je parametrima – standardni indeks kapilarnosti ( $H_{60}$ ) i maksimalna visina kvašenja ( $H_{max}$ ).

Pored ispitivanja sposobnosti kondicioniranih uzoraka glatkih DL pletenina da propuštaju vazduh, kako je predviđeno prema standardizovanoj proceduri, praćenje propustljivosti vazduha u dinamičkim uslovima realizovano je modifikovanjem uslova eksperimenta, odnosno testiranjem uzoraka uz variranje sadržaja vlage (0, 10, 20, i 30%) u njima. Sva opisana ispitivanja (toplotna svojstva, svojstva upravljanja tečnošću i propustljivost vazduha) sprovedena su i za pletenine posle perioda nege i nošenja.

Realizovana istraživanja i dobijeni rezultati imaju za cilj da unaprede saznanja o „dinamičkom“ toplotnom komforu tekstilnih materijala uopšte, i posebno o komforu tekstilnih materijala na bazi konoplje, kao i da utvrde nova saznanja o ponašanju pletenina na bazi konoplje u uslovima eksploatacije (nege i nošenja), odnosno o efektima promene geometrijskih parametara ovih pletenina na svojstva toplotnog komfora u dinamičkim uslovima. Krajnji cilj ovih istraživanja je doprinos unapređenju principa projektovanja novih tekstilnih materijala na bazi koplje.

## 6. MATERIJAL I METODE ISPITIVANJA

### 6.1 Materijal

Za sprovedena istraživanja korišćene su jednožične štapelne pređe izrađene od vlakana konoplje (Linificio Canapificio Nazionale, Italija) i poliakrilonitrilnih vlakana finoće 3,3 dtex i srednje dužine štapela 83,79 mm (Pirotext, Srbija), iste nominalne finoće (50 tex) i upredenosti (400 u/m). Faktičke vrednosti finoće i upredenosti, kao i geometrijske i relaksacione karakteristike ovih pređa date su u tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Strukturni, geometrijski i relaksacioni parametri upotrebljenih jednožičnih pređa (Mladenović, 2011)

Parametar (jedinica)	Konoplja	PAN
Finoća, $T_t$ (tex), (SD) <sup>a</sup>	47,8 (3,7)	48,7 (2,8)
Upredenost, $U$ ( $m^{-1}$ ), (SD)	370 (18,9)	351 (15,5)
Prečnik, $d$ (mm), (SD)	0,22 (0,02)	0,28 (0,03)
Specifična gustina, $\rho_p$ ( $g/cm^3$ )	1,258	0,791
Faktor pakovanja, FP	0,84	0,66
Maljavost, $H$ ( $m^{-1}$ ), (SD)	3,4 (1,1)	63,5 (5,5)
Maljavost posle samoabrazije, $H_p$ ( $m^{-1}$ ), (SD)	7,1 (1,9)	59,4 (4,8)
Maljavost pre/posle, $H/H_p$	0,48	1,07
Gubitak mase pri samoabraziji, $G$ (%), (SD)	0,17 (0,02)	0,01 (0,004)
Distanca kovrdžanja, $D_p$ (cm), (SD)	5,35 (2,01)	0,55 (0,29)

<sup>a</sup> Standardna devijacija eksperimentalno određenih parametara

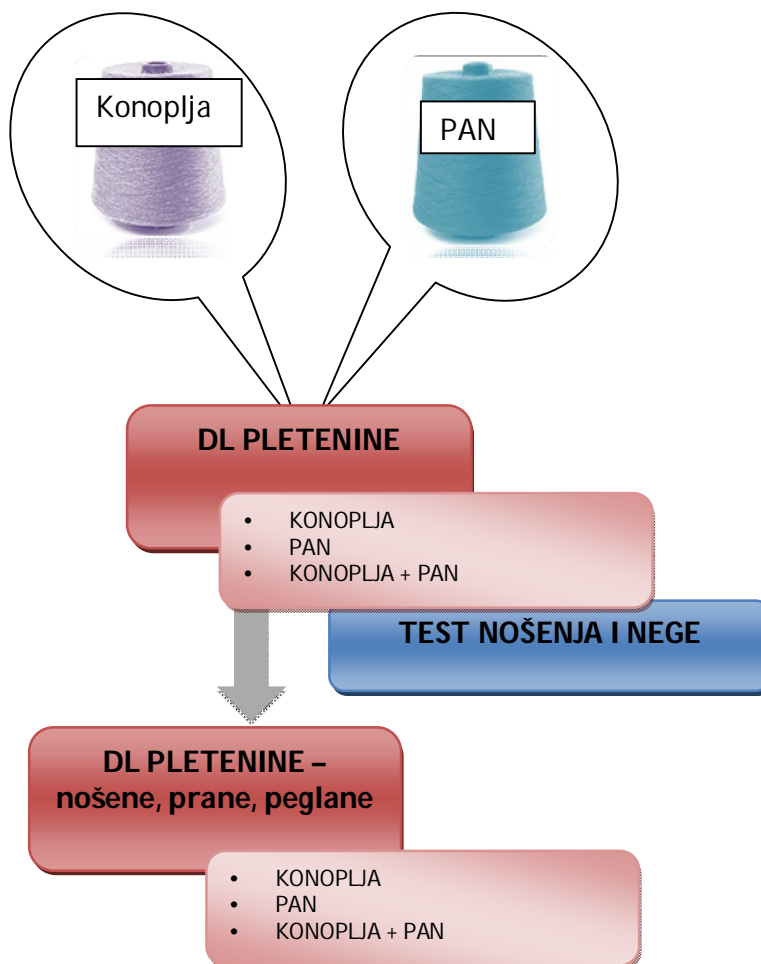
Prečnik pređa ( $d$ ) određen je pomoću svetlosnog mikroskopa SMZ 800N (Nikon Instruments Inc., USA). Vrednost prečnika pređe očitavana je pomoću skale sa podeocima na okularu (uvećanje  $\times 8$ ). Rezultati prečnika pređa, koje su date u tabeli 6.1, predstavljaju srednju vrednost 50 merenja po uzorku. Na osnovu eksperimentalno određenog prečnika izračunata je specifična gustina pređa,  $\rho_p$  ( $g/cm^3$ ), prema relaciji 6.1.

$$\rho_p = \frac{4T_t}{d^2 10^3 \pi} \quad (6.1)$$

gde je  $T_t$  – finoća pređe (tex), i  $d$  – prečnik pređe (mm). Faktor pakovanja pređe (FP), koji predstavlja gustinu pakovanja vlakana u pređi, određen je odnosom gustine pređe i gustine vlakana. Za vlakna konoplje, to je  $1,5 g/cm^3$  (Jovanović, 1989), dok je za gustinu poliakrilonitrilnih vlakana korišćena vrednost  $1,2 g/cm^3$  (Jovanović, 1990).

Od ovih pređa su, prethodnim stručnjem po dve pređe (dubliranjem bez dodatnih uvoja), na kružnoj pletačkoj mašini (Fouquet, F-W&P, Nemačka) finoće NoE 20 (30") izrađene tri varijante kuliranih desno-levih (DL) pletenina - 100% konoplja, 100% PAN i 50%/50% konoplja/PAN. Sve tri pletenine izrađene su uz iste tehnološke parametre (zatezanje pređe, dužina petlje - dužina pređe potrebna za izradu jedne petlje). Primenjena metoda izrade pletenina omogućila je da konopljinu i PAN pređa zauzimaju nasumičan položaj na licu i naličju pletenine. Relaksacija izrađenih pletenina (suva relaksacija) sprovedena je njihovim odležavanjem u slobodnom stanju (bez zatezanja), na ravnoj površini, u prostoriji sa

kondicioniranim uslovima temperature i vlažnosti ( $20\pm 2$  °C, Rh  $65\pm 2$ ). Šematski prikaz eksperimentalnog materijala dat je na slici 6.1.



Slika 6.1. Šematski prikaz eksperimentalnog materijala

Konstrukcije karakteristike suvo relaksiranih pletenina date su u tabeli 6.2. Koristeći ove podatke, kao i strukturne parametre konopljine i PAN pređe, izračunati su sekundarni strukturni parametri koji definišu geometriju proizvedenih pletenina.

Tabela 6.2. Konstrukcije karakteristike suvo relaksiranih DL pletenina (Mladenović, 2011)

Parametar (jedinica)		Konoplja	Konoplja/PAN	PAN
Gustina petlji	$D_v$ <sup>a)</sup> ( $\text{cm}^{-1}$ ), (SD)	13,7 (0,6)	13 (0,05)	11 (0,04)
	$D_h$ <sup>b)</sup> ( $\text{cm}^{-1}$ ), (SD)	5,5 (0,02)	5,5 (0,02)	6,5 (0,01)
	Površinska <sup>c)</sup> ( $\text{cm}^{-2}$ )	75,4	71,5	71,5
Debljina, t (mm), (SD)		0,916 (0,03)	1,038 (0,041)	1,181 (0,043)
Dužina petlje, l (mm), (SD)		5,0 (0,01)	5,2 (0,03)	5, (0,03)
Površinska masa, $M_p$ ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), (SD)		360 (21,7)	359 (9,5)	376 (9,5)

<sup>a)</sup> vertikalna gustina (broj redova); <sup>b)</sup> horizontalna gustina (broj nizova); <sup>c)</sup>  $D_h \times D_v$

Gustina pletenina (zapreminska masa),  $\rho_{PL}$  (g/cm<sup>3</sup>), određena je količnikom njene površinske mase i debljine. Poroznost pletenina,  $P_p$  (%), definisana kao ukupna količina vazduha u pletenini (pore između pređa i pore između vlakana u pređi), izračunata je prema relaciji 6.2, gde je  $\rho_{VL}$  (g/cm<sup>3</sup>)- specifična gustina vlakna (Jovanović, 1989, Jovanović, 1990).

$$P_p = 100 - \frac{\rho_{PL}}{\rho_{VL}} 100 \quad (6.2)$$

Otvorena poroznost pletenina,  $O$  (%), koja predstavlja količinu vazduha u makroporama (pore između pređa), izračunata je prema relaciji 6.3, gde je  $\rho_p$  (g/cm<sup>3</sup>) – specifična gustina pređe (tabela 6.1).

$$O = 100 - \frac{\rho_p}{\rho_{VL}} 100 \quad (6.3)$$

Površina petlje,  $S_p$  (mm<sup>2</sup>), određena je kao proizvod širine petlje,  $A$  (mm), i visine petlje,  $B$  (mm). Kako je širinu i visinu petlje teško odrediti eksperimentalno, ove su vrednosti izračunate na osnovu horizontalne ( $D_h$ ) i vertikalne ( $D_v$ ) gustine pletenine (relacije 6.4 i 6.5).

$$D_h = \frac{10}{A} \quad (6.4)$$

$$D_v = \frac{10}{B} \quad (6.5)$$

Površinski modul petlje,  $\sigma_p$ , dovodi u vezu površinu petlje i površinu koja je u okviru petlje pokrivena pređom, definiše veličinu otvorene pore (makropore). Manja vrednost ovog parametra znači kompaktniju strukturu tj. manju veličinu pora između segmenata pređe po površini petlje. Površinski modul petlje izračunava se prema relaciji (6.6) (Novaković et al., 2020b):

$$\sigma_p = \frac{A \cdot B \sqrt{\pi \cdot \rho_p}}{2l \sqrt{T_t}} \quad (6.6)$$

gde je  $\rho_p$  – specifična gustina pređe (g/cm<sup>3</sup>),  $l$  – dužina petlje (cm) i  $T_t$  – finoća pređe (tex).

Zapreminski modul petlje,  $\sigma_v$ , predstavlja odnos zapremine „kocke“ u kojoj je smeštena jedna petlja i zapremine koju zauzima pređa u toj „kocki“. Izračunava se prema relaciji (6.7). Ovaj parametar karakteriše zapreminsku propustljivost pletenine. Veća vrednost ovog parametra ukazuje na manju zapreminu pređe u jedinici zapremine petlje.

$$\sigma_v = \frac{4A \cdot B \cdot t}{\pi \cdot d^2 \cdot l} \quad (6.7)$$

gde je  $t$  – debljina pletenine (mm) i  $d$  – prečnik pređe (mm).

Kako bi se analiziralo ponašanje pletenina u uslovima eksploatacije sproveden je test nošenja koji je obuhvatio održavanje i negu odevnih predmeta izrađenih od testiranih pletenina. Pre izrade odevnih predmeta i testa nege i nošenja, izvršena je mokra relaksacija pletenina prema nešto izmenjenom postupku predviđenim standardom SRPS F. S2.020,

metoda E (SRPS, 1958). U okviru postupka relaksacije, izvršeno je kvašenje pletenina u toploj vodi (40°C), tako što je uzorak postavljen između dve staklene ploče i potopljen u destilovanu vodu. Posle 2 h statičke relaksacije, uzorak se cedi između upijajuće hartije radi uklanjanja viška vode, i suši se na sobnoj temperaturi i vlažnosti, postavljen da leži na ravnoj žičanoj mreži. Posle perioda kondicioniranja (24 h na 20±2 °C, Rh 65±2) izračunava se procenat skupljanja  $S_s$  (%) pletenine prema relaciji (6.8) (Booth, 1968):

$$S_s = \frac{L_{H0} \cdot L_{V0} - L_{H1} \cdot L_{V1}}{L_{H0} \cdot L_{V0}} 100 \quad (6.8)$$

gde su  $L_{H0}$  i  $L_{V0}$  – dužina epruvete (uzorka) u pravcu redova i nizova pletenine pre kvašenja, a  $L_{H1}$  i  $L_{V1}$  - dužina epruvete (uzorka) u pravcu redova i nizova pletenine posle mokre relaksacije.

Pored konstrukcionih parametara mokro relaksiranih pletenina, određeni su geometrijski parametri pređa (prečnik, specifična gustina i faktor pakovanja) na uzorcima „izvučenim“ iz mokro relaksiranih pletenina, prema prethodno opisanoj proceduri.

U okviru sprovedenog testa, svakodnevno je bilo angažovano 10 osoba – volontera u toku osam nedelja. Svaki volonter je „testirao“ sve tri pletenine tako što je svaki od tri oblikovana odevna predmeta (majica) nosio pet dana po pet sati dnevno u kontinuitetu. Jedan ciklus nošenja i nege odevnog predmeta podrazumevao je petodnevno nošenje, pranje, peglanje i sušenje. Postupak nege odevnih predmeta obuhvatio je pranje (komercijalno dostupnim deterdžentom Perwoll Wool & Delicates, Henkel GmbH) na 40 °C i peglanje u kućnim uslovima (120 °C), i sproveden je između svakog preuzimanja odevnog predmeta od strane volontera, po unapred određenoj proceduri i od strane iste osobe kako bi se izbegao uticaj subjektivnih faktora. Svaki odevni predmet je prošao deset ciklusa nošenja (Stanković, 2015).

Nakon testa nege i nošenja, određeni su prečnik i specifična gustina pređa, „izvučenih“ iz komada pletenina, prema prethodno opisanoj proceduri. Pored konstrukcionih karakteristika i sekundarnih strukturnih parametara, pletenine su okarakterisane u pogledu svojstava toplotnog komfora u dinamičkim uslovima.

Kvalitativna analiza ispitivanih pređa i DL pletenina obavljena je pomoću SEM (Scanning Electron Microscopy) mikrofotografija dobijenih upotrebom uređaja ORION, Jeol JSM T20. Priprema uzoraka podrazumevala je prevlačenje epruveta slojem zlata.

## 6.2. Metode ispitivanja

### 6.2.1. Ispitivanje toplotnih svojstava u dinamičkim uslovima

Za ispitivanje toplotnih svojstava pletenina u dinamičkim uslovima pošlo se od eksperimentalno određenih vrednosti njihovog specifičnog toplotnog kapaciteta ( $c$ ). Primenjena je metoda za eksperimentalno određivanje toplotnog kapaciteta (materijala sa malim vrednostima toplotnog kapaciteta) koja je razvijena na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu (Pavlović et al., 2014). Metoda se zasniva na merenju brzine hlađenja čvrstog tela, koje je zajedno sa posudom (zanemarljivog toplotnog kapaciteta) zagrejano do određene temperature (60 °C), nakon čega sledi hlađenje tela i suda (unutrašnjeg kontejnera) odlaganjem u kalorimetrijski sistem. U ovom eksperimentu, čvrsto telo je predstavljao uzorak pletenine poznate mase. Automatsko merenje temperature uzorka pletenine vršeno je digitalnim termometrom na svakih 10 sekundi. U istim vremenskim intervalima je drugim termometrom merena i temperatura okolne sredine unutar kalorimetrijskog sistema. Akvizicija registrovanih vrednosti temperatura oba termometra vršena je pomoću računara.



Za izračunavanje toplotnog kapaciteta ispitivanih uzoraka pletenina korišćeni su rezultati merenja u intervalu od 50 °C – 25 °C. Procedura izračunavanja toplotnog kapaciteta pletenina zasniava se na Newton-ovom zakonu hlađenja:

$$\frac{1}{C} Q = T = -\frac{dQ}{dt} \cdot R \quad (6.9)$$

gde je  $C$  – toplotni kapacitet tela (materijala) (J/K),  $Q$  – količina toplote (J),  $T$  - temperatura tela (materijala) (K),  $dQ/dt$  – količina toplote koja prolazi kroz telo (materijal) u jedinici vremena,  $R$  – toplotna otpornost tela (materijala)(K/W). Sređivanjem i integracijom prethodne jednačine dolazi se do relacije:

$$(T - T_{amb}) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\left(\frac{1}{RC}\right)t} \quad (6.10)$$

gde je  $T$  – temperatura tela (materijala) u određenom trenutku (K),  $T_0$  – početna temperatura tela (materijala) (K),  $T_{amb}$  – ambijentalna temperatura (temperatura okoline) (K),  $t$  – vreme hlađenja (s). Izraz  $1/R \cdot C$  predstavlja konstantu hlađenja koja je definisana nagibom prave dobijene nanošenjem vremena hlađenja na apscisu i izraza  $\ln[(T - T_{amb}) / (T_0 - T_{amb})]$  na ordinatu. U konkretnom eksperimentu konstanta hlađenja ima oblik:

$$K = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{C + C_0} \right) \quad (6.11)$$

gde je  $R$  - toplotna otpornost sistema sud (unutrašnji kontejner) – okruženje (okolina) (K/W),  $C$  – toplotni kapacitet materijala (pletenine) (J/K),  $C_0$  - toplotni kapacitet unutrašnjeg kalorimetrijskog suda (J/K). S obzirom da se toplotni kapacitet unutrašnjeg kalorimetrijskog suda može zanemariti u odnosu na toplotni kapacitet pletenine, toplotni kapacitet uzorka se može izračunati na sledeći način:

$$C = \frac{1}{K \cdot R} \quad (6.12)$$

gde je  $K$  - konstanta hlađenja uzorka pletenine koja je određena kao srednja vrednost pet ponavljanja po uzorku ( $s^{-1}$ ),  $R$  – toplotna otpornost sistema unutrašnji kalorimetrijski sud – okruženje (okolina) (K/W).

Toplotna otpornost sistema unutrašnji kalorimetrijski sud – okruženje prethodno je eksperimentalno određena upotrebom vode kao supstance čiji je specifični toplotni kapacitet poznat (4,1813 kJ/kg·K). Time je izvršeno kalibrisanje kalorimetrijskog sistema.

Deljenjem dobijenih vrednosti toplotnog kapaciteta pletenina sa masom uzoraka dobijene su vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta,  $c$  (J/kg·K), pletenina. Polazeći od ovih vrednosti, i vrednosti gustine,  $\rho_{PL}$  (kg/m<sup>3</sup>), i toplotne provodljivosti ispitivanih pletenina,  $\lambda$  (W/m·K), izračunati su toplotni parametri toplotna difuzivnost,  $\alpha_d$  (m<sup>2</sup>/s), i toplotna apsorptivnost,  $b$  (W s<sup>1/2</sup>/m<sup>2</sup>K), prema relacijama 6.13 6.14, redosledno, koji opisuju ponašanje pletenina u neravnotežnim uslovima prenosa toplote.

$$\alpha_d = \frac{\lambda}{\rho_{PL} \cdot c} \quad (6.13)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho_{PL} \cdot c} \quad (6.14)$$

Opisani postupak eksperimentalnog određivanja toplotnog kapaciteta pletenina, i izračunavanja parametara - toplotna difuzivnost ( $\alpha_d$ ) i toplotna apsorptivnost (b), ponovljen je i sa pleteninama podvrgnutim testu nege i nošenja.

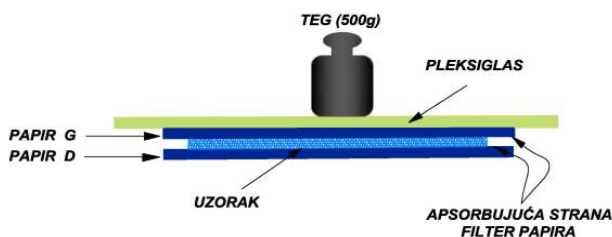
## 6.2.2. Ispitivanje sposobnosti upravljanja tečnošću

### 6.2.2.1. Test distribucije vode

Sposobnost pletenina da propuštaju tečnost ispitivana je primenom nešto modifikovanog testa distribucije vode koji je razvijen od strane kompanije Polartec® LLC (Lawrence, Massachusetts, USA), a u stručnoj literaturi je poznat pod nazivom Malden Mills' test (Cao et al., 2006), kako glasi stari naziv kompanije. Ispitivanje sposobnosti propuštanja vode sprovedeno je pri različitom sadržaju vlage u pleteninama. Sadržaj vlage u uzorcima pletenina regulisan je pomoću uređaja za merenje sadržaja vlage u materijalu (Radwag MA 50.R, slika 6.2), i to u rasponu od apsolutno suvog uzorka do 30% vlažnosti materijala u koracima od 5%. Procedura predviđena testom distribucije vode sprovedena je za svaki uzorak pletenine pri svakom od zadatih nivoa sadržaja vlage u uzorku.



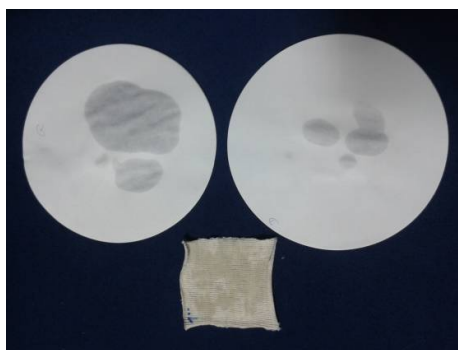
Slika 6.2. Uređaj za merenje sadržaja vlage u materijalu (RADWAG MA 50.R)



Slika 6.3. Malden Mills'-ov test

Prema proceduri ilustrovanoj na slici 6.3, uzorak pletenine dimenzija 7 cm × 7 cm, postavlja se horizontalno između dva filter papira tako okrenutih da njihova apsorbujuća strana bude u kontaktu sa uzorkom. Voda apsorbovana u donjem i gornjem filter papiru omogućuje da se odgovarajućim proračunom dođe do podataka koji definišu distribuciju vode na desnoj (licu) i levoj (naličju) strani pletenine.

Neposredno pre testa registruje se masa filter papira kao  $W_{d,suvo}$  (početna masa filter hartije ispod uzorka pletenine) i  $W_{g,suvo}$  (početna masa filter hartije iznad uzorka pletenine). Uzorak pletenine se postavlja na sredinu donjeg filter papira sa licem (ili naličjem) okrenutim na gore. Na onoj strani pletenine koja je okrenuta na gore nanosi se pipetom određena zapremina vode (1,5 ml). Posle perioda stabilizacije (2 min), uzorak se prekriva gornjim filter papirom (apsorbujuća strana u kontaktu sa površinom pletenine). Preko gornjeg filter papira postavlja se pleksiglas sa opterećenjem (500 g). Po isteku jednog minuta, uklanjaju se opterećenje i pleksiglas, a masa filter papira (gornjeg i donjeg) se meri i označava kao  $W_{d,mokro}$  (masa vlažne filter hartije ispod uzorka pletenine) i  $W_{g,mokro}$  (masa vlažne filter hartije iznad uzorka pletenine). Izgled jednog od uzoraka pletenine i filter papira posle testa distribucije vode prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4. Izgled uzorka pletenine i filter papira nakon sprovedenog testa distribucije vode

Masa vode apsorbovane donjim filter papirom (filter papir ispod uzorka), ( $W_d$ ), izračunava se prema relaciji 6.15, i označava količinu vode koja se distribuira kroz pleteninu, tj. na drugu stranu pletenine.

$$W_d = W_{d,mokro} - W_{d,suvo} \quad (6.15)$$

Masa vode apsorbovane gornjim filter papirom (filter papir iznad uzorka), ( $W_g$ ), izračunava se na sličan način:

$$W_g = W_{g,mokro} - W_{g,suvo} \quad (6.16)$$

Ukupna masa apsorbovane vode u filter papirima ( $W_{uk}$ ) predstavlja zbir prethodne dve vrednosti.

$$W_{uk} = W_d + W_g \quad (6.17)$$

Kada se (ako je uzorak okrenut naličjem na gore) na levu stranu pletenine (naličje) nanese određena zapremina vode (1,5 ml), količina vode koja je prošla na njenu desnu (lice) stranu ( $W_d$ , masa vode apsorbovana donjim filter papirom) u odnosu na ukupnu količinu vode ( $W_{uk}$ ) apsorbovane filter papirima predstavlja vrednost distribucije vode na levoj strani (naličju)

pletene (WD<sub>L</sub>, relaciji 6.18). Ovaj parametar definiše sposobnost pletene da prenosi vodu od naličja ka licu pletene. Veća vrednost parametra (WD<sub>L</sub>) ukazuje na veću sposobnost prenosa tečnosti.

$$WD_L = \frac{W_d}{W_{uk}} \quad (6.18)$$

Za određivanje vrednosti distribucije vode na desnoj strani pletene (WD<sub>D</sub>) procedura se ponavlja, s tim što je uzorak pletene u ovom slučaju okrenut desnom stranom (licem) na gore i na nju je naneta voda. Tada je distribucija vode na desnoj strani pletene WD<sub>D</sub>, odnosno sposobnost pletene da prenosi vodu od lica ka naličju, definisana odnosom mase vode koja je prošla na levu stranu pletene, odnosno na njenu donju stranu u ovoj varijanti eksperimenta (W<sub>d</sub>), i ukupne mase vode apsorbovane filter papirima (relacija 6.19). Veća vrednost ovog parametra (WD<sub>D</sub>) ukazuje na veću sposobnost prenosa tečnosti ka naličju pletene.

$$WD_D = \frac{W_d}{W_{uk}} \quad (6.19)$$

Opisana procedura je za sve pletene, i za svaki od zadatih nivoa sadržaja vlage u pleteni (0, 5, 10, 15, 20, 25, i 30%), ponovljena na po tri uzorka, tako da dobijene vrednosti WD<sub>L</sub> (distribucija vode na levoj strani pletene) i WD<sub>D</sub> (distribucija vode na desnoj strani pletene) predstavljaju srednje vrednosti tri merenja. Na isti način su testirani i uzorci pletena nakon sprovedenog testa nege i nošenja.

Drugi parametar kojim su okarakterisane pletene u testu distribucije vode je sposobnost zadržavanja tečnosti, W (g) koji predstavlja masu vode zadržane u uzorku pletene. Sposobnost zadržavanja tečnosti se izračunava sledećom relacijom:

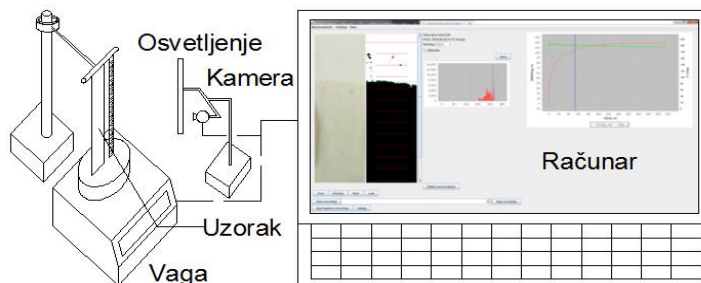
$$W = W_{H_2O} - W_{uk} \quad (6.20)$$

gde je W<sub>H<sub>2</sub>O</sub> - ukupna masa vode u testu, W<sub>uk</sub> - masa vode apsorbovana filter papirima.

### 6.2.2.2. Ispitivanje sposobnosti kapilarnog kvašenja pletena

Ispitivanje sposobnosti kapilarnog kvašenja pletena sprovedeno je uobičajenim postupkom "test-trake". Za tu svrhu upotrebljen je eksperimentalni sklop razvijen na Katedri za tekstilno inženjerstvo Tehnološko-metalurškog fakulteta. Komponente eksperimentalnog sklopa za određivanje kapilarnosti tekstilnih materijala čine: analitička vaga, računar, nosač za uzorak, web kamera, i hardver Arduino, koji su povezani namenski razvijenim "open-source" "Kapilarko" softverom (slika 6.5). Eksperiment je sproveden prema nešto modifikovanom standardu ISO 9073-6. Uzorak u obliku trake (50 × 300 mm) postavlja se na nosač za uzorak, uz predopterećenje na njegovom donjem kraju. Preporučeno predopterećenje za materijale čija je površinska masa veća od 200 g/m<sup>2</sup>, iznosi 10 g. Donji kraj uzorka se uranja u sud sa vodom tako da nivo vode bude iznad postavljenog opterećenja, uz poklapanje sa nultim podeokom na lenjiru. Proces kapilarnog napredovanja vode u uzorku snima se kamerom, dok se masa vode u posudi (u koju je uronjen kraj uzorka) na vagi kontinuirano registruje. Tokom eksperimenta registruje se i temperatura i vlažnost vazduha. Zabeleženi podaci automatski se obrađuju "Kapilarko" softverom u nekoliko koraka: slika se obrađuje pomoću open-source ImageJ biblioteke, i određuje se i beleži visina kapilarnog napredovanja tečnosti za dati trenutak. Na monitoru računara prate se i pored fotografije

merenog uzorka pletenine i „prepoznato“ pokvašeno područje uzorka, kao i registrovana visina napredovanja tečnosti. Obezbeđen je i prikaz krive napredovanja nivoa vode u zavisnosti od vremena. Kapilarno kvašenje DL pletenina ispitivano je u pravcu nizova i u pravcu redova pletenine. Upotrebjeno je po šest epruveta (tri u pravcu nizova i tri u pravcu redova) svaku pleteninu, tako da rezultati predstavljaju srednju vrednost tri merenja. Uz dobijenu krivu kapilarnog kvašenja u zavisnosti od vremena, sposobnost kapilarnog kvašenja ispitivanih pletenina okarakterisana je visinom napredovanja vode u toku prvih 60 min, koja predstavlja standardni indeks kapilarnosti pletenine,  $H_{60}$  (mm), kao i maksimalnom visinom napredovanja tečnosti u pletenini,  $H_{max}$  (mm).



Slika 6.5. Šema eksperimentalnog sklopa za određivanje kapilarnog kvašenja tekstilnih materijala

Prednosti upotrebjene metode za ispitivanje kapilarnog kvašenja pletenina ogledaju se u minimalizovanju subjektivne greške operatera, mogućnosti preciznog praćenja izuzetno brzog napredovanja nivoa tečnosti, mogućnosti dugotrajnih merenja (više sati ili dana), kao i mogućnosti korišćenja vode bez dodatka boje. Pored toga, postupak obezbeđuje digitalni zapis rezultata i akviziciju eksperimentalnih uslova tokom merenja (Milanović et al., 2018).

### 6.2.3. Ispitivanje sposobnosti propuštanja vazduha

Propustljivost vazduha ispitivana je pomoću digitalnog uređaja NBFY (Ningbo Textile Instrument Factory) (Kina), model YG461E (slika 6.6), prema standardnoj proceduri (ASTM D737) prema kojoj se meri protok vazduha kroz tekstilni materijal pri konstantnom gradijentu pritiska. Uzorak pletenine se postavlja licem na gore na okrugli otvor (površine 20 cm<sup>2</sup>) usisne glave aparata i uz konstantnu razliku pritiska (100 Pa) registruje se količina propuštenog vazduha (m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>min)).

Propustljivost vazduha kod pletenina određena je kao srednja vrednost tri merenja. U okviru sprovedenih istraživanja, sposobnost DL pletenina da propuštaju vazduh iskazana je parametrom – koeficijent propustljivosti vazduha,  $A_p$  (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>min), koji je definisan količinom vazduha,  $V_{vaz}$  (m<sup>3</sup>) koji pri konstantnom pritisku u jedinici vremena,  $t_t$  (s) prođe kroz jedinicu površine materijala,  $S_m$  (m<sup>2</sup>), prema relaciji 6.21.

$$A_p = \frac{V_{VAZ}}{S_m \cdot t_t} \quad (6.21)$$



Slika 6.6. Uređaj za merenje propustljivosti vazduha NBFY (model YG461E)

Propustljivost vazduha ispitivana je pri ravnotežnom sadržaju vlage u pleteninama (u standardnim uslovima), i pri povećanom sadržaju vlage u njima, u koracima od 10, 20 i 30% vlažnosti. Pored toga, određena je propustljivost vazduha apsolutno suvih uzoraka. Sadržaj vlage u pleteninama variran je gravimetrijski, odnosno sušenjem uzoraka do potrebne mase (polazeći od mase apsolutno suvog uzorka). Na isti način je ispitivana propustljivost vazduha pletenina nakon sprovedenog testa nege i nošenja.

#### 6.2.4. Statistička analiza eksperimentalnih rezultata

Statistička analiza dobijenih eksperimentalnih rezultata izvršena je pomoću više različitih statističkih metoda. Poređenje eksperimentalnih rezultata za ispitivana svojstva DL pletenina izvršeno je ANOVA statistikom (analiza varijanse). Ovom metodom se porede srednje vrednosti eksperimentalnih rezultata. Kao rezultat ove statistike dobija se srednja vrednost i varijansa ispitivanih uzoraka, vrednost statistike (F), kritična vrednosti statistike ( $F_{crit}$ ), i nivo značajnosti (P) statistike F. Da bi se potvrdio uticaj testiranog faktora, neophodno je da je  $F > F_{crit}$ , uz uslov da je nivo značajnosti statistike (P) manji od praga značajnosti ( $\alpha = 0,05$ ).

Za potrebe analiziranja dve nezavisne grupe podataka, upotrebljen je Studentov t-test. Ovim testom testiraju se dve suprotstavljene hipoteze. Jedna hipoteza tvrdi da su srednje vrednosti dve nezavisne grupe podataka iste, dok prema drugoj hipotezi, dve nezavisne grupe podataka nisu iste. U slučaju kada je nivo značajnosti statistike (P) manji od praga značajnosti ( $\alpha = 0,05$ ), prihvata se hipoteza da dve nezavisne grupe podataka nisu iste, odnosno smatra se da su razlike u rezultatima dve grupe podataka statistički potvrđene (nisu slučajnog karaktera).

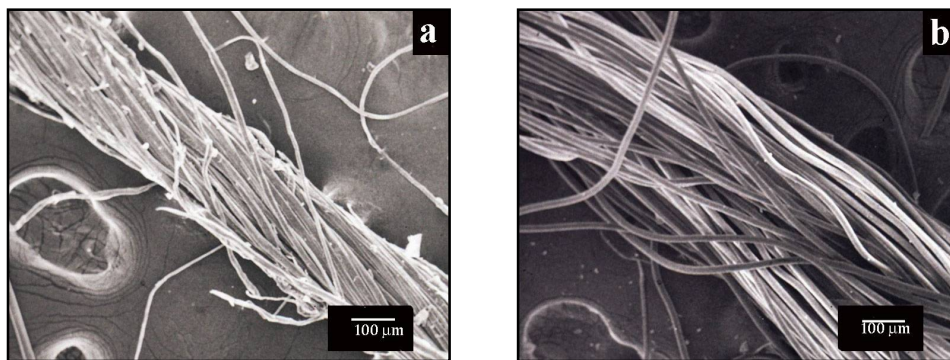
T-test uparenih uzoraka primenjen je za proveru statističke značajnosti promene ispitivanog parametra pletenina posle perioda nege i nošenja. Test polazi od dve suprotstavljene hipoteze. Prema jednoj hipotezi, nema promene ispitivanog parametra posle testa nege i nošenja, dok druga hipoteza tvrdi suprotno. Za potvrdu statističke značajnosti uočenih promena ispitivanih parametara nakon testa nege i nošenja, potrebno je da nivo značajnosti statistike (P) bude manji od praga značajnosti ( $\alpha=0,05$ ).



## 7. REZULTATI I DISKUSIJA

### 7.1 Strukturni i geometrijski parametri pređa i pletenina

Iako su konopljina i PAN pređa imale istu nominalnu finoću i upredenost, zapažene su manje razlike faktičkih (izmerenih) vrednosti ovih parametara, kao što se može videti u tabeli 6.1. Pored toga, uočene male razlike u geometriji pređa mogu se objasniti različitim deformacionim svojstvima konoplje i akrilnih (PAN) vlakana. Smanjena elastičnost vlakana konoplje i njihova manja pokretljivost u poređenju sa PAN vlaknima izazvala je usporenu migraciju vlakana pri formiranju pređe i manji prečnik odnosno, veću specifičnu gustinu i veći faktor pakovanja (tabela 6.1). To ukazuje na kompaktnu strukturu, odnosno povećanu gustinu pakovanja vlakana u pređi od konoplje (slika 7.1a). Pređa od PAN vlakana odlikuje se većim prečnikom pređe odnosno, manjom gustinom pakovanja vlakana u pređi (tabela 6.1). Ovi parametri ukazuju na rastresitu strukturu PAN pređe i veći sadržaj vazduha u unutrašnjosti same PAN pređe (slika 7.1b).



Slika 7.1. SEM mikrofotografija pređa: a) konoplja, b) PAN

Geometrija površine pređa ocenjena je pomoću parametra - maljavost pređe ( $H$ ), koja je definisana kao broj "štrčećih" vlakana na površini pređe po jedinici dužine pređe. Razlika u maljavosti (tabela 6.1) pređa pripisana je uticaju vrste vlakana. Maljavost pređe od konoplje je neuobičajeno mala za pređu od kratkih vlakana, što ukazuje na njenu glatku površinu. Podložnost konopljine i poliakrilonitrilne pređe da menjaju geometriju površine ocenjena je parametrom - maljavost pređe posle samoabrazije ( $H_p$ , tabela 6.1). Podvrgavanje pređa postupku samoabrazije (abrazija pređe u petlji i merenje mase otpalih vlakana na određenoj dužini pređe) omogućilo je simulaciju abrazije (trenja) njihove površine tokom upotrebe pletenina (Mladenović, 2011). Registrovane vrednosti maljavosti pređa nakon testa samoabrazije ( $H_p$ , tabela 6.1) pokazale su da su obe pletenine podložne promenama maljavosti usled nošenja, ali sa različitim pravcem i obimom modifikacije. Maljavost pređe od konoplje je nakon testa nošenja skoro udvostručena ( $H/H_p$ , tabela 6.1), što se pripisuje prirodnom svojstvu krutosti vlakana konoplje, usled čega se, kao posledica trenja tokom nošenja pletenine, izvlače na površinu pređe. Uprkos činjenici da se maljavost konopljine pređe udvostručuje posle samoabrazije, i dalje se može reći da ova pređa ima relativno glatku površinu. Maljavost PAN pređe posle samoabrazije je smanjena za oko 7%. Smatra se da je ova manja promena maljavosti nakon nošenja (u poređenju sa konopljinom pređom) rezultat mekoće PAN vlakana (Mladenović, 2011).

Ispitivane DL pletenine su proizvedene pod istim tehnološkim parametrima, međutim, različita deformaciona svojstva konopljinih i PAN vlakana dovela su, osim varijacija u svojstvima pređa, i do određenih varijacija konstrukcionih karakteristika pletenina (tabela 6.2). Izvesne

razlike horizontalne i vertikalne gustine petlji između pletenina ukazuju na različitu konfiguraciju (oblik) petlji. Kao posledica različite konfiguracije petlji, pletenina od konoplje je imala nešto veću gustinu petlji u poređenju sa ostalim pleteninama, i nešto manju debljinu zbog manjeg prečnika konopljine pređe u odnosu na PAN pređu.

Kako je ovo istraživanje obuhvatilo kako hidrofилna, tako i hidrofobna vlakna, obavljeno je kvašenje (mokra relaksacija) svih pletenina pre testa nege i nošenja, kako bi se osigurao isti relaksacioni tretman prilikom dimenzionog stabilizovanja pletenina. Naime, Munden (1959) je još 1959. godine pokazao da se pletenine izrađene od hidrofobnih sintetičkih vlakana mogu relaksirati (dostići ravnotežno stanje) tokom tzv. suve relaksacije ili odležavanja u određenim uslovima (temperature i vlage) određeno vreme. Međutim, pletenine izrađene od hidrofилnih celuloznih vlakana ne mogu se u potpunosti relaksirati suvom relaksacijom pa je zbog toga primenjena tzv. mokra relaksacija (kvašenje ili pranje prema adekvatnoj proceduri). Mokra relaksacija pletenina sa različitim sadržajem vlakana, rezultirala je određenim razlikama u njihovim konstrukcionim karakteristikama (tabela 7.1), iako su sve izrađene pod istim tehnološkim parametrima. Pored toga, poređenjem podataka datih u tabeli 6.2 i tabeli 7.1 može se konstatovati da je sa mokrom relaksacijom pletenina došlo do očekivane promene u konstrukcionim karakteristikama, u većoj ili manjoj meri zavisno od sirovinskog sastava pletenina. Generalno se može reći da je došlo do povećanja površinske gustine petlji ( $D_h \times D_v$ ), povećanja horizontalne gustine ( $D_h$ ) i smanjenja vertikalne gustine ( $D_v$ ), što ukazuje na širinsko skupljanje pletenina. Imajući u vidu iste osnovne strukturne parametre upotrebljenih pređa, uočene razlike ukazuju na uticaj prirode konopljinih i PAN vlakana. Kvašenje hidrofилnih konopljinih (celuloznih) vlakana dovodi do povećanja prečnika vlakana što za posledicu ima bubrenje pređe odnosno, povećanje prečnika pređe (Vigo, 2013). Smatra se da je bubrenje vlakana konoplje uzrokovalo povećanje, ne samo prečnika pređe, nego i ugla upredanja, čime se dodatno povećava naprezanje pređe (koje je već prisutno usled oblikovanja pređe u petlju) i distorzija petlji. Drugim rečima, dolazi do skupljanja pletenine. Zbog toga je u okviru eksperimentalnog materijala najveći procenat skupljanja ispoljila homogena (100%) konopljina pletenina (tabela 7.1). Opisane fizičke promene u vlaknima konoplje, pređi i pletenini zadržavaju se u određenoj meri i posle sušenja. Zbog toga oblik petlji ostaje trajno promenjen.

Tabela 7.1. Konstrukcione karakteristike mokro relaksiranih pletenina

Parametar (jedinica)		Konoplja	Konoplja /PAN	PAN
Gustina petlji	$D_v$ ( $\text{cm}^{-1}$ ), (SD)	13,6 (0,5)	12 (0,3)	10,4 (0,5)
	$D_h$ ( $\text{cm}^{-1}$ ), (SD)	6,2 (0,2)	6,1 (0,2)	6,9 (0,1)
	Površinska ( $\text{cm}^{-2}$ )	84,3	73,2	71,8
Debljina, t (mm), (SD)		0,957 (0,032)	1,022 (0,038)	1,092 (0,037)
Dužina petlje, l (mm), (SD)		5,2 (0,03)	5,3 (0,02)	5,4 (0,03)
Površinska masa, $M_p$ ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), (SD)		415 (20,2)	376 (6,2)	378 (4,8)
Skupljanje, $S_s$ (%)		11,9	4,6	0,9

Skupljanje kvašene PAN pletenine bilo je ispod 1% (tabela 7.1), što se nije primetno odrazilo na dimenzione karakteristike pletenine. Struktura PAN pređe doprinela je stabilnosti ne samo PAN, već i konoplja/PAN pletenine. Skupljanje konoplja/PAN pletenine od 4,6% ne predstavlja prosečnu vrednost skupljanja homogenih varijanti pletenina (100% konoplja i 100% PAN). Takođe, vrednost gustine petlji konoplja/PAN pletenine bila je bliža PAN pletenini nego pletenini od konoplje (Tabela 7.1). Ovo može biti uzrokovano silama trenja



između PAN i konopljne pređe, čime se ograničava migracija petlji u konoplja/PAN pletenini tokom mokre relaksacije.

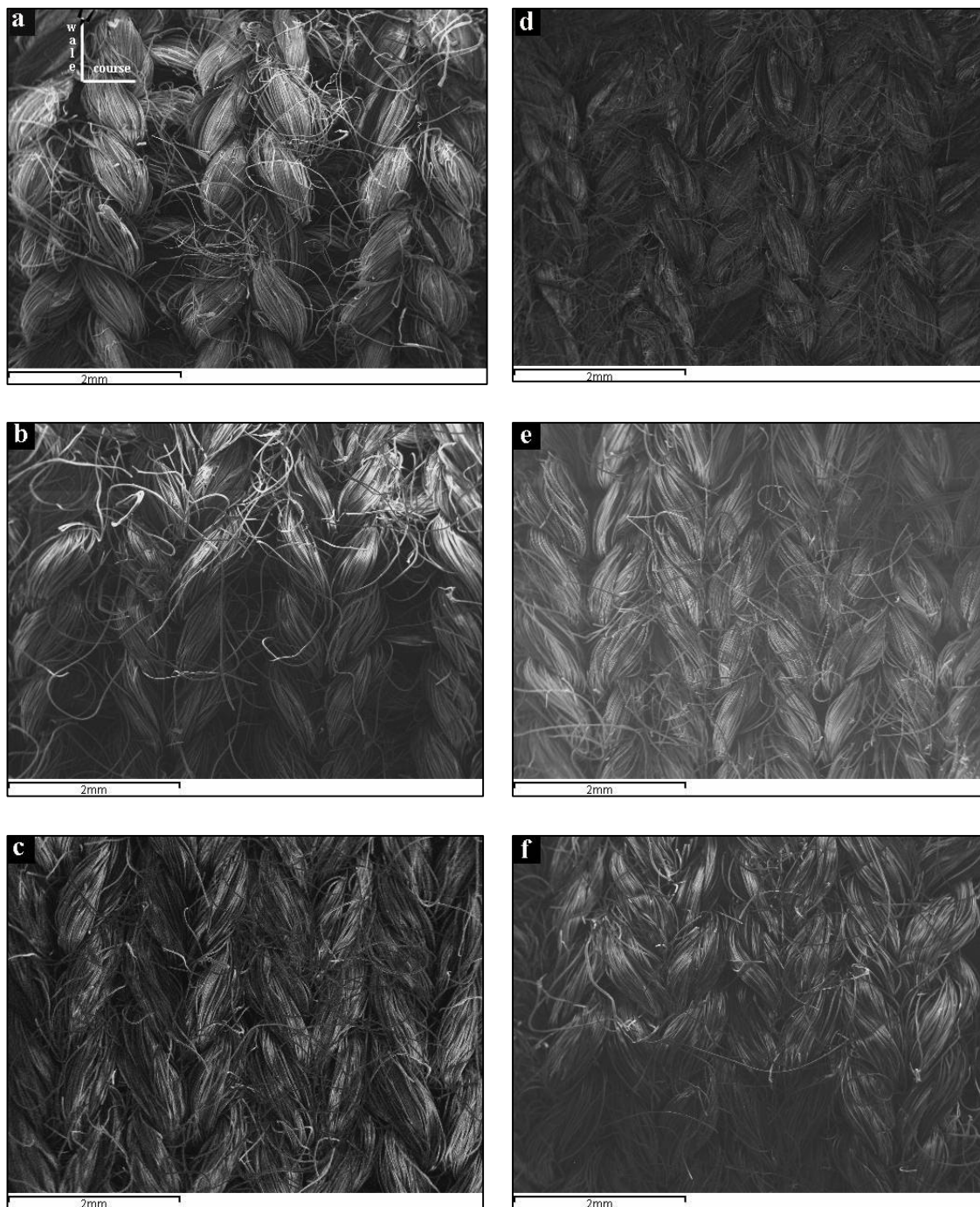
Iako se zna da se u prvom ciklusu pranja dešavaju najveće strukturne promene kod pletenina, neki autori smatraju da je nekada neophodno pet, šest pa i deset ciklusa pranja da bi došlo do stabilizacije strukture (Allan Heap et al., 1985; Quyanor et al., 1999; Annand et al., 2002; Gore et al., 2006). Promene konstrukcionih karakteristika pletenina, do kojih je došlo nakon testa nošenja i nege, prikazane su u tabeli 7.2. Kod pletenine od konoplje zapaženo je širinsko skupljanje (povećanje horizontalne gustine petlji), ali dužinsko istezanje (u pravcu nizova) tj. smanjenje vertikalne gustine petlji. Vertikalna gustina konoplja/PAN pletenine se povećala, ali u manjoj meri u poređenju sa pleteninom od konoplje, dok je horizontalna gustina ostala nepromenjena. Kod PAN pletenine su uočene vrlo male promene horizontalne i vertikalne gustine petlji posle sprovedenog testa nege i nošenja. Zato je kod ove pletenine površinska gustina petlji ostala nepromenjena, za razliku od ostale dve varijante pletenina (konoplja i konoplja/PAN) kod kojih je došlo do povećanja površinske gustine petlji posle testa nege i nošenja (tabela 7.2).

Tabela 7.2. Konstrukcione karakteristike nošenih pletenina

Parametar (jedinica)		Konoplja	Konoplja /PAN	PAN
Gustina petlji	Dv (cm <sup>-1</sup> ), (SD)	12 (0,4)	12 (0,3)	11 (0,3)
	Dh (cm <sup>-1</sup> ), (SD)	8 (0,2)	7 (0,2)	6,5 (0,1)
	Površinska (cm <sup>-2</sup> )	96	84	71,5
Debljina, t (mm), (SD)		1,042 (0,038)	1,055 (0,032)	1,056 (0,054)
Dužina petelje, l (mm), (SD)		5,2 (0,02)	5,4 (0,04)	5,4 (0,03)
Površinska masa, M <sub>p</sub> (g/m <sup>2</sup> ), (SD)		477 (9,6)	438 (5,5)	376 (4,5)

Dobijeni rezultati se mogu pripisati procesima koji se dešavaju prilikom kvašenja pletenina – relaksacija napona u pređi kojem je pređa izložena tokom pletenja, i konsolidacija strukture usled bubrenja pređe. Obimna istraživanja sprovedena od strane Allan Heap-a i sar. (Allan Heap, 1985) pokazala su da je proces oslobađanja od napona tokom pletenja brz, i da se relaksacija završava već posle jednog ili dva ciklusa pranja. Konsolidacija strukture, tj. rekonfiguracija strukture usled promene oblika petlji, dešava se sporo i nekada se ne završava ni posle deset ciklusa pranja. Uočene promene konstrukcionih karakteristika pletenina posle testa nege i nošenja pokazuju da je zaista u ovom eksploatacionom periodu nastavljeno određeno modifikovanje strukture pletenina. S obzirom da se ovde radi ne samo o pranju odevnih materijala, već i o njihovom nošenju, može se reći da je rezultujuća modifikacija strukture pletenine rezultat kompleksne interakcije dva međusobno suprotstavljena procesa. Jedan proces podrazumeva bubrenje pređe usled kvašenja, što je praćeno i efektom „podmazivanja“ („lubrikacija“) vodom čime se smanjuje trenje u tačkama preplitanja segmenata pređe u petljama. Mehaničko dejstvo na materijal tokom pranja obezbeđuje dodatnu energiju koja savladava frikcionu silu, pa petlje mogu da zauzmu svoj ravnotežni položaj. Suprotstavljeno dejstvo se javlja kada se odevni predmet nosi, jer je materijal izložen različitim deformacionim silama (savijanje, kompresija, istezanje, smicanje i njihova kombinacija), zbog kojih dolazi do biaksijalnog istezanja (širenje materijala u svim pravcima), što su u svom istraživanju pokazali Allan Heap i sar. (1985). U slučaju PAN pletenine, ovi suprotstavljani procesi su bili gotovo izbalansirani kao posledica dobro uravnotežene strukture PAN pređe i hidrofobne prirode PAN vlakana, što je rezultiralo nepromenjenom gustinom petlji i površinskom masom (tabele 7.1 i 7.2). Ovo je ilustrovano SEM mikrofotografijama PAN pletenine pre i posle testa nege i nošenja (slike 7.2c i 7.2f). Smanjena debljina PAN pletenine (tabela 7.2) rezultat je lateralne konsolidacije (kompresije) njene

strukture tokom nošenja i nege (pranje i peglanje). Imajući u vidu veoma mali gubitak težine kod samoabrazije PAN pređe (0,01%), (tabela 6.1), smatra se da krajevi štrčućih PAN vlakana sa površine pređe prijanjaju uz pređu i vizuelno povećavaju prečnik pređe, umesto da se odvoje (ishabaju) tokom testa nege i nošenja. Ovo potvrđuje povećanje prečnika PAN pređe nakon testa nošenja (tabela 7.3). Prečnik je izmeren na pređi izvučenoj iz nošene pletenine, međutim, kada je upletena u pleteninu, meka PAN pređa se sabija u tačkama preplitanja petlji pa ne može da doprinese povećanju debljine nošene pletenine.



Slika 7.2. SEM mikrofotografije pletenina: mokro relaksirana konoplja (a), konoplja/PAN (b), PAN (c), i nakon testa nege i nošenja: konoplja (d), konoplja/PAN (e), PAN (f) (Novaković et al., 2020a)

Tabela 7.3. Geometrija pređa (mokro relaksiranih i nošenih pletenina)

Parametar (jedinica)		Konoplja	PAN
Prečnik, d (mm), (SD)	Mokro relaksirano	0,23 (0,02)	0,28 (0,04)
	Nošeno	0,24 (0,03)	0,30 (0,04)
Gustina, $\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	Mokro relaksirano	1,151	0,791
	Nošeno	1,014	0,689
Faktor pakovanja, FP	Mokro relaksirano	0,77	0,66
	Nošeno	0,68	0,57

Uprkos skupljanju mokro relaksirane konopljinke pletenine, u njoj su još uvek prisutne relativno velike pore između nizova petlji, što je ilustrovano na slici 7.2a. Prisustvo ovih pora omogućava dalje skupljanje pletenine (rekonfiguraciju strukture) prilikom ciklusa pranja. Ove šupljine su kod konoplja/PAN pletenine manje zastupljene (slika 7.2b), što vodi ka manjem skupljanju ove pletenine tokom pranja. Bubrenje konopljinke pređe dovelo je do povećanja njenog prečnika i smanjenja gustine nakon što su pletenine podvrgnute testu nege i nošenja (tabela 7.3). Ovo povećanje prečnika konopljinke pređe, uz izobličenje petlji nakon pranja, doprinelo je povećanju debljine konoplje i konoplja/PAN pletenine (tabela 7.2). Pored toga, skupljanje dovodi do povećanja gustine petlji i površinske mase konopljinke i konoplja/PAN pletenina. Kao rezultat promene prečnika konopljinke i PAN pređe, posle perioda nege i nošenja debljina konoplja/PAN pletenine je identična debljini PAN pletenine, iako je pre testa debljina ove pletenine bila između vrednosti debljine konopljinke i PAN pletenine (tabela 7.2).

Rezultati geometrijskih parametara ispitivanih pletenina (tabela 7.4), koji su izračunati prema relacijama datim u tački 6 (Materijali i metode), ukazuju na povećanje gustine pletenina (konoplja i konoplja/PAN), kako posle mokre relaksacije tako i posle perioda nege i nošenja. Kod pletenine od konoplje i konoplja/PAN pletenine, povećanje gustine je posledica povećanja površinske mase pletenina usled skupljanja pređe prilikom kvašenja. Pošto kod PAN pletenine nije došlo do promene u površinskoj masi nakon mokre relaksacije i testa nošenja, povećanje gustine pletenine je posledica smanjenja njene debljine. Može se konstatovati da je promena gustine PAN pletenine najmanje izražena, posebno posle testa nege i nošenja. Generalno, pletenina od konoplje se odlikuje najvećom gustinom jer je ova pletenina pretrpela najveće promene u toku perioda nege i nošenja.

Poroznost pletenina se smanjuje kako mokrom relaksacijom, tako i nakon testa nege i nošenja. Međutim, kako su prethodno opisane strukturne promene tokom mokre relaksacije i testa nege i nošenja bile različitog intenziteta, u zavisnosti od sirovinskog sastava pletenina, redosled pletenina u pogledu poroznosti se menjao (tabela 7.4). Pre mokre relaksacije, konoplja/PAN pletenina je imala nešto veću poroznost, i taj odnos se zadržava posle kvašenja pletenina. Posle perioda nege i nošenja, najvećom ukupnom poroznošću se odlikuje PAN pletenina.

Sa aspekta svojstava toplotnog komfora, još važniji parametar je otvorena poroznost pletenina (pore između pređa) (Stanković et al., 2008). Najvećom otvorenom poroznošću se odlikuje pletenina od konoplje, i to u sva tri slučaja: suvo relaksirana, mokro relaksirana i nošena. To se objašnjava većom zapreminskom gustinom pređe od konoplje, odnosno većom gustinom pakovanja vlakana u ovoj pređi (tabela 7.3). Tokom mokre relaksacije i perioda nege i nošenja dolazi do smanjenja otvorene poroznosti svih ispitivanih pletenina (tabela 7.4).

Tabela 7.4. Geometrijski parametri pletenina pre i posle testa nege i nošenja (Novaković et al., 2020b)

Parametar (jedinica)		Konoplja	Konoplja /PAN	PAN
Gustina, $\rho_{PL}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Suvo relaksirano	393,0	345,9	318,4
	Mokro relaksirano	433,7	367,9	346,2
	Nošeno	457,8	415,2	356,1
Poroznost, $P_P$ (%)	Suvo relaksirano	73,8	74,4	73,5
	Mokro relaksirano	71,1	72,8	71,2
	Nošeno	69,5	69,2	70,3
Otvorena poroznost, $O$ (%)	Suvo relaksirano	68,8	66,2	59,8
	Mokro relaksirano	62,4	62,1	56,3
	Nošeno	54,8	51,3	48,3
Površina petlje, $S_p$ (mm <sup>2</sup> )	Suvo relaksirano	1,33	1,39	1,4
	Mokro relaksirano	1,18	1,37	1,4
	Nošeno	1,04	1,2	1,4
Površinski modul petlje, $\sigma_p$	Suvo relaksirano	0,85	0,77	0,65
	Mokro relaksirano	0,69	0,72	0,65
	Nošeno	0,57	0,58	0,6
Zapreminski modul petlje, $\sigma_v$	Suvo relaksirano	1,60	1,31	1,15
	Mokro relaksirano	1,43	1,28	1,02
	Nošeno	1,24	1,15	0,96

Parametar otvorena poroznost pletenine definiše njenu ukupnu otvorenu slobodnu površinu, ne dajući uvid u veličinu otvorenih pora. Zbog toga se pristupilo izračunavanju površine petlje. Površina petlje PAN pletenine nije se menjala primenom mokre relaksacije i testa nege i nošenja (tabela 7.4), jer pri tome nije došlo do promene visine i širine petlje. To se može uočiti i na SEM mikrofotografijama na slici 7.2 (c i f). Rezultati prikazani u tabeli 7.4 pokazuju da je do smanjenja površine petlji konopljinine i konoplja/PAN pletenina došlo posle mokre relaksacije, ali i u periodu nege i nošenja. Promena konfiguracije petlje kod konopljinine i konoplja/PAN pletenine, do koje je došlo usled skupljanja vlakana i konopljinine pređe prilikom kvašenja, kao i usled dejstva mehaničkih sila prilikom nošenja, dovela je do promene veličine petlje. Površina petlje ovih pletenina je smanjena (tabela 7.4), jer je sa skupljanjem pletenine došlo do povećanja gustine petlji (veći broj petlji po cm<sup>2</sup>). To se može videti i na SEM mikrofotografijama konopljinine pletenine pre (slika 7.2a) i posle testa nege i nošenja (slika 7.2d), kao i na mikrofotografijama konoplja/PAN pletenine pre (slika 7.2b) i posle testa nege i nošenja (slika 7.2e). Pre testa nege i nošenja, vrednost površine petlje konoplja/PAN pletenine je bila bliža PAN pletenini, dok se nakon testa vrednost površine petlje konoplja/PAN pletenine nalazila između vrednosti pletenine od konoplje i PAN pletenine.

Povećani broj manjih petlji na jedinici površine pletenine upućuje na zaključak da je došlo do preraspodele otvorene slobodne površine u pletenini, odnosno upućuje na smanjenje veličine makropora. Smanjenje makropora kod pletenine od konoplje i konoplja/PAN pletenine nakon nege i nošenja može se jasno videti na slici 7.2. Imajući u vidu činjenicu da je nakon mokre relaksacije i sprovedenog testa nošenja i nege, došlo do promena ne samo konfiguracije petlji pletenina već i geometrije pređe, izračunati su parametri (površinski modul petlje i zapreminski modul petlje), koji „uzimaju u obzir“ i parametre pređe.

Površinski modul petlje (relacija 6.6) definiše površinu petlje i površinu koju zauzima pređa u petlji (površina petlje pokrivena pređom). Drugim rečima, definiše veličinu otvorenih pora odnosno, makropora. Manja vrednost ovog parametra podrazumeva kompaktniju strukturu tj. manju veličinu pora između pređa. Može se konstatovati da je nakon sprovedenog postupka mokre relaksacije pletenina došlo do smanjenja vrednosti površinskog modula petlje kod pletenine od konoplje i konoplja/PAN pletenine, dok je vrednost ovog parametra ostala nepromenjena za PAN pleteninu (tabela 7.4). Ovo je posledica činjenice da prilikom kvašenja PAN pletenine nije došlo do promene specifične gustine PAN pređe (tabela 7.3), uz nepromenjene vrednosti površine petlje (tabela 7.4). Pored promene specifične gustine pređe od konoplje (tabela 7.3), kod pletenine od konoplje i konoplja/PAN pletenine, došlo je do promene površine petlji. Pošto su ove promene bile izraženije kod pletenine od konoplje, izraženije je i smanjenje površinskog modula petlje. Kod pređe od konoplje, nakon perioda nege i nošenja došlo je do daljeg smanjenja specifične gustine. Takođe, došlo je do daljih promena oblika i dimenzija petlji kod pletenine od konoplje i konoplja/PAN pletenine, što vodi ka daljem smanjenju vrednosti površinskog modula petlje (tabela 7.4). Nakon perioda nošenja i nege promenila se specifična gustina i PAN pređe, što je dovelo do snižavanja vrednosti površinskog modula petlje PAN pletenine, odnosno došlo je do snižavanja veličine makropora i ove pletenine.

S obzirom da se zapreminski modul petlje definiše kao odnos zapremine jedne petlje prema zapremini koju zauzima pređa od koje je petlja oblikovana, relacija po kojoj se izračunava zapreminski modul petlje, pored oblika i dimenzija petlje, uključuje prečnik pređe i debljinu pletenine (relacija 6.7). Zapreminski modul petlje može da ukaže na voluminoznost pletenine. Vrednost zapreminskog modula petlje je obrnuto proporcionalna kvadratu prečnika pređe. Kod suvo relaksiranih uzoraka, pletenina od konoplje se odlikuje najvećom vrednošću zapreminskog modula, zatim sledi konoplja/PAN i PAN pletenina. Najveća vrednost zapreminskog modula petlje ukazuje na „najotvoreniju“ strukturu konopljine pletenine, jer sadrži najmanju zapreminu pređe u zapremini jedne petlje. Prilikom mokre relaksacije došlo je do snižavanja vrednosti zapreminskog modula svih pletenina, iako se promenio prečnik samo konopljine pređe, dok je prečnik PAN pređe ostao nepromenjen. Na to je uticala promena debljine pletenina (tabela 7.1). Posle sprovedenog testa nege i nošenja, pletenine se odlikuju približnijim vrednostima debljine (tabela 7.2), a prečnik konopljine i PAN pređe je povećan (tabela 7.3), što je dovelo do daljeg smanjenja vrednosti zapreminskog modula petlje svih pletenina (tabela 7.4). Posle testa nege i nošenja, redosled pletenina u pogledu vrednosti zapreminskog modula petlje nije se promenio. Vrednost zapreminskog modula konoplja/PAN pletenine bliža je vrednosti modula konopljine pletenine, kako pre, tako i posle testa nege i nošenja (tabela 7.4).

Tabela 7.5. Procentualne vrednosti promene geometrijskih parametara pletenina nakon testa nege i nošenja

Parametar	Konoplja	Konoplja/PAN	PAN
Poroznost, $P_p$	-2,3 %	-4,9 %	-1,3 %
Otvorena poroznost, $O$	-12,2 %	-17,4 %	-14,2 %
Površina petlje; $S_p$	-11,9 %	-12,4 %	-
Površinski modul petlje; $\sigma_p$	-17,4 %	-19,4 %	-7,7 %
Zapreminski modul petlje, $\sigma_v$	-13,3 %	-10,2 %	-5,9 %

Procentualne vrednosti promene geometrijskih parametara pletenina nakon testa nege i nošenja prikazane su u tabeli 7.5. Najveće promene geometrijskih parametara pletenina uočene su kod konoplja/PAN pletenine, izuzev kada se radi o zapreminskom modulu petlje.

To se može pripisati prethodno analiziranim specifičnostima konopljinine i PAN pređe proisteklim iz osobenosti konopljinih i PAN vlakana. Pre svega, radi se o različitim deformacionim svojstvima i dobro poznatim različitim afinitetima ka apsorpciji vode ovih vlakana. Naime, kao što je već u prethodnom delu teksta rečeno, za razliku od vlakana konoplje koja su poznata kao tvrda i nesavitljiva (Sponner et al., 2005), poliakrilonitrilna vlakna su porozna i meka (Cox, 2005). Imajući u vidu i hidrofobnost poliakrilonitrilnih vlakana, moglo bi se reći da je uočena najmanja promena geometrije PAN pletenine posle testa nege i nišenja bila i očekivana.

## 7.2. Toplotna svojstva pletenina u dinamičkim uslovima

Specifični toplotni kapacitet ( $c$ ) je definisan kao količina toplote koja prođe kroz pleteninu u jedinici vremena, koja je potrebna da podigne temperaturu za  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Pavlović et al., 2014). Prema prethodno opisanoj proceduri (tačka 6.2.1) dobijene su krive hlađenja za sve tri pletenine (konoplja, konoplja/PAN, PAN). Krive hlađenja konstruisane su tako da su na y-osi nanete vrednosti  $\ln[(T-T_{\text{amb}})/(T_0-T_{\text{amb}})]$ , a vreme hlađenja na x-osi, (slika 7.3). Na osnovu krive hlađenja za svaku pleteninu izračunate su konstante hlađenja. Suštinski, konstante hlađenja su definisane nagibom krive hlađenja. Vrednost koeficijenta pravca krive hlađenja (na grafikonima obeležena sa „b“), predstavlja konstantu hlađenja (obeleženu sa „K“ u relaciji 6.11 i 6.12) za određenu pleteninu. Krive hlađenja i odgovarajuće konstante hlađenja za uzorke pletenina pre testa nege i nošenja prikazane su na slici 7.3. Različite vrednosti konstante hlađenja ispitivanih pletenina ukazuju na razlike u vrednostima toplotnih kapaciteta. Ipak, iako je ANOVA statistička analiza potvrdila statistički značajnu razliku u vrednostima konstante hlađenja pletenina [ $F(6,48) > F(3,88)$  za  $P(0,012) < \alpha(0,05)$ ], t-test nije potvrdio razliku između pletenina od konoplje i konoplja/PAN pletenine  $P(0,32) > \alpha(0,05)$ . Drugim rečima, za ove dve pletenine se može zaključiti da imaju približne vrednosti konstanti hlađenja, na osnovu čega se mogu očekivati i približne vrednosti toplotnog kapaciteta ( $C$ ).

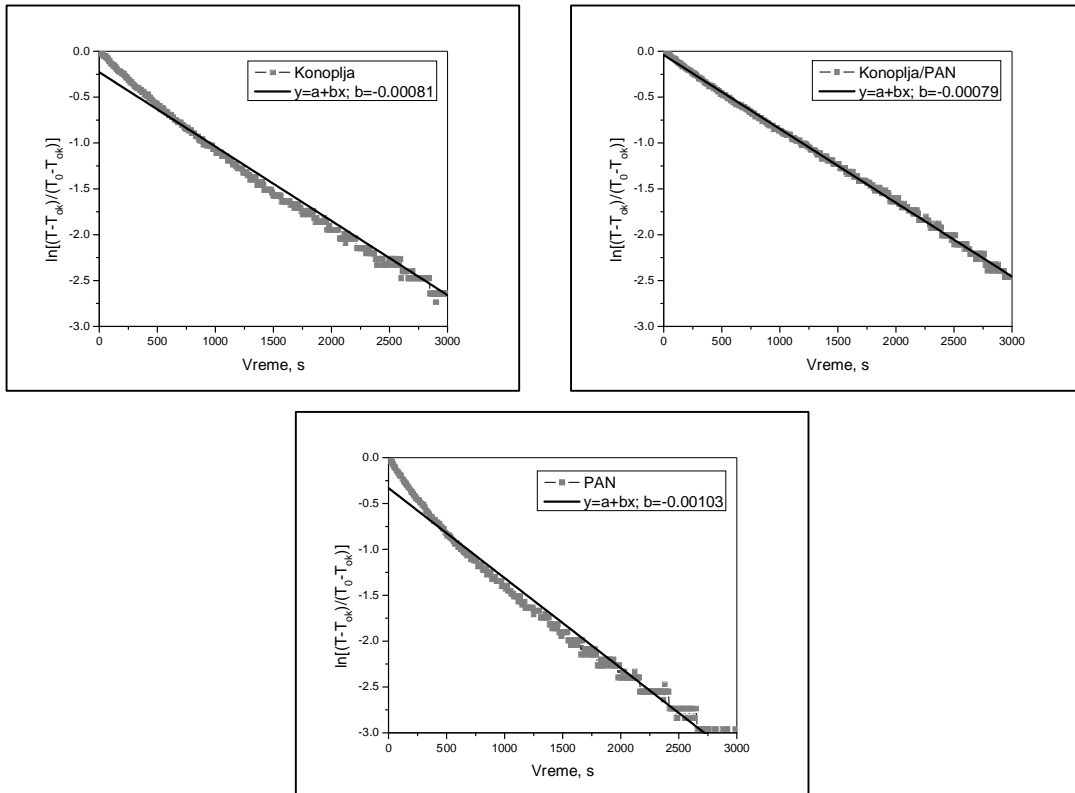
Na slici 7.4 date su krive hlađenja i konstante hlađenja za pletenine nakon sprovedenog testa nege i nošenja. Različit nagib ovih kriva hlađenja, koji je kvantitativno iskazan kroz različite konstante hlađenja, ukazuje na različite toplotne kapacitete uzoraka pletenina posle testa nošenja. ANOVA statistikom su potvrđene različite vrednosti konstante hlađenja za pletenine posle testa nege i nošenja [ $F(72,81) > F(3,88)$  za  $P(0,0001) < \alpha(0,05)$ ].

Poređenjem vrednosti konstante hlađenja za pletenine pre i posle testa nege i nošenja može se zaključiti da je došlo do promene toplotnog kapaciteta ovih pletenina nakon perioda nošenja i nege. Međutim, t-test uparenih uzoraka je potvrdio razliku u vrednosti konstante hlađenja pre i posle testa nege i nošenja za pleteninu od konoplje i konoplja/PAN pleteninu, dok uočena razlika u vrednosti konstante hlađenja pre i posle testa nošenja za PAN pleteninu nije statistički potvrđena (tabela 7.6).

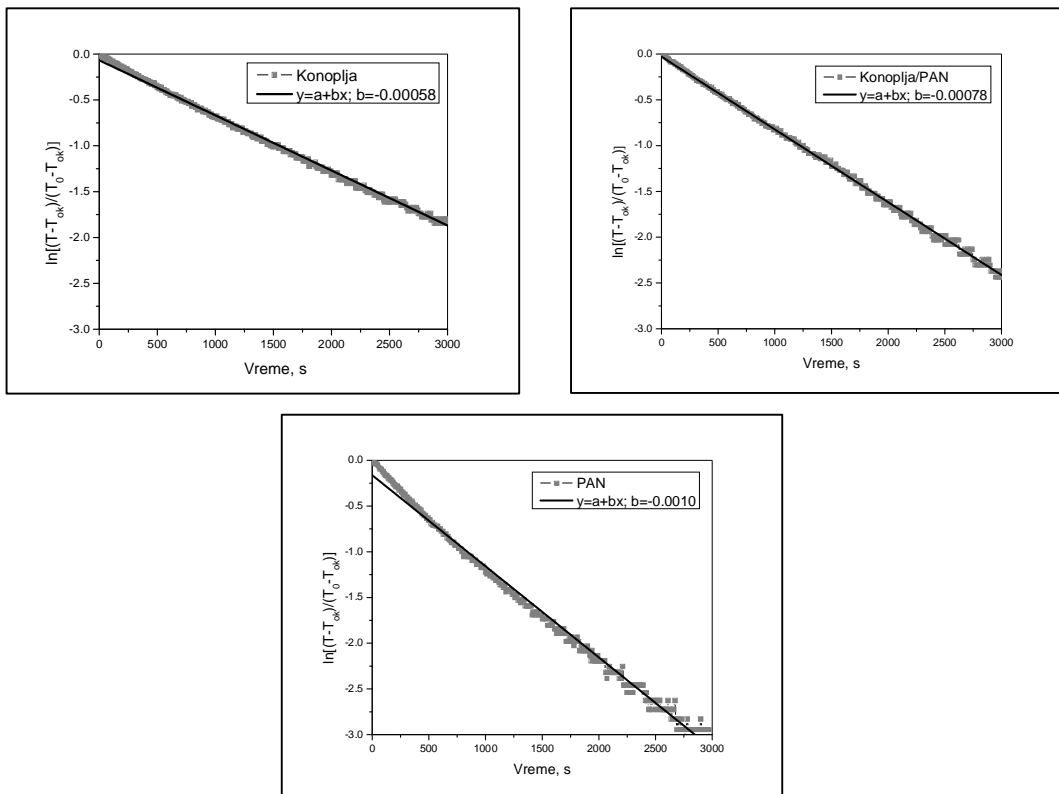
Tabela 7.6. Vrednosti parametara t-testa uparenih uzoraka (pre i posle testa nege i nošenja) (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sirovinski sastav	$t_{\text{stat}}^{\text{a)}$	$t_{\text{crit}}^{\text{b)}$	$P^{\text{c)} < \alpha(0,05)$
Konoplja	8,38	2,78	0,001*
Konoplja/PAN	4,15	2,78	0,014*
PAN	1,36	2,78	0,245

a) vrednost t-statistike; b) kritična vrednost t-statistike; c) nivo značajnosti



Slika 7.3. Krive hlađenja DL pletenina pre testa nege i nošenja;  $b$  ( $s^{-1}$ ) - konstanta hlađenja



Slika 7.4. Krive hlađenja DL pletenina posle testa nege i nošenja;  $b$  ( $s^{-1}$ ) - konstanta hlađenja

Na osnovu relacije 6.12 izračunati su toplotni kapaciteti pletenina ( $C$ ), a zatim i specifični toplotni kapaciteti ( $c$ ) svođenjem na 1 g pletenine. S obzirom da su se ispitivane pletenine razlikovale u gustini ( $\rho_{PL}$ , tabela 7.4), izračunate su vrednosti zapreminskog toplotnog kapaciteta pletenina ( $C_{zap}$ ) množenjem gustine i specifičnog toplotnog kapaciteta. Vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta i zapreminskog toplotnog kapaciteta pletenina pre i posle testa nege i nošenja date su u tabeli 7.7.

Poređenjem rezultata specifičnog toplotnog kapaciteta ( $c$ ) ispitivanih pletenina pre i posle testa nošenja (tabela 7.7) zapaženo je smanjenje vrednosti ovog parametra kod svih pletenina posle perioda nege i nošenja. Poznato je da je toplotni kapacitet polimernih materijala uslovljen strukturom i stanjem polimera (Wen, 2007). Uočeno smanjenje specifičnog toplotnog kapaciteta posle sprovedenog testa nege i nošenja, nastalo je kao rezultat promena u morfologiji vlakana, što je uticalo na toplotne vibracije na mikroskopskom nivou. Vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta ( $c$ ) pletenina pre testa nošenja međusobno su se razlikovale posebno kod pletenine od konoplje i PAN pletenine. Iako je razlika između vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta PAN pletenine i pletenine od konoplje nakon testa nege i nošenja znatno smanjena, prisutna je značajna razlika u zapreminskom toplotnom kapacitetu ( $C_{zap}$ , tabela 7.7), jer se konopljna pletenina odlikuje većom gustinom.

Tabela 7.7. Toplotni kapacitet pletenina, pre i posle testa nege i nošenja (Novaković et al., 2020a)

Parametar (jedinica)		Konoplja	Konoplja/PAN	PAN
Specifični toplotni kapacitet, $c$ (J/g K)	Pre testa	1,75 ± 0,08	1,71 ± 0,08	1,46 ± 0,07
	Posle testa	1,34 ± 0,05	1,51 ± 0,06	1,30 ± 0,05
Zapreminski toplotni kapacitet, $C_{zap}$ ( $\times 10^3$ J/m <sup>3</sup> K)	Pre testa	758,98	629,11	505,45
	Posle testa	613,45	626,95	462,93

Polazeći od vrednosti zapreminskog toplotnog kapaciteta i toplotne provodljivosti pletenina (tabela 7.8, Mladenović, 2011) izračunate su toplotne karakteristike pletenina u dinamičkim uslovima, pre i posle testa nege i nošenja.

Tabela 7.8. Toplotna provodljivost pletenina pre i posle testa nege i nošenja (Mladenović, 2011).

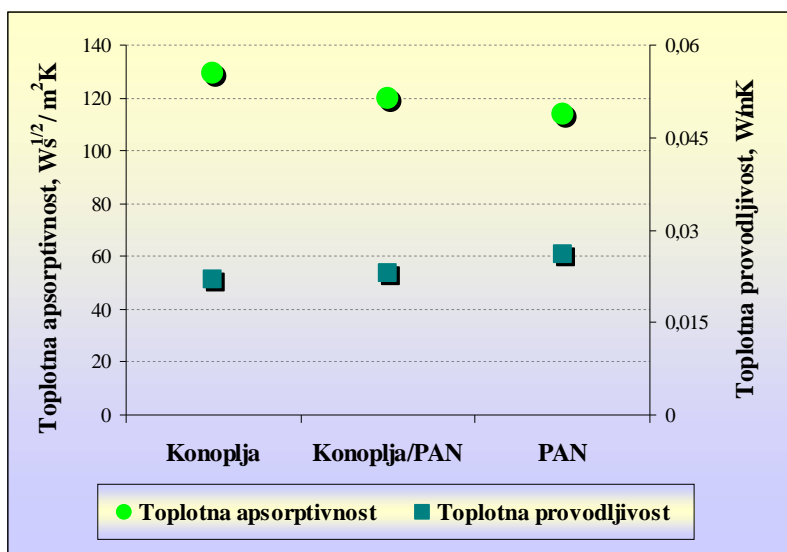
Pletenina	Toplotna provodljivost, $\lambda$ (W/m K)	
	Pre testa nege i nošenja	Posle testa nege i nošenja
Konoplja	0,022±0,001	0,033±0,003
Konoplja/PAN	0,023±0,001	0,025±0,002
PAN	0,026±0,001	0,022±0,001

### 7.2.1. Toplotna apsorptivnost

Toplotna apsorptivnost ( $b$ ) je parametar koji se koristi za procenu toplo-hladnog osećaja tekstilnih materijala, a definiše se kvadratnim korenom proizvoda toplotne provodljivosti ( $\lambda$ ) i zapreminskog toplotnog kapaciteta ( $C_{zap}$ ). Toplotna apsorptivnost predstavlja tzv. prolaznu kondukciju toplote (toplotna provodljivost u dinamičkim uslovima) u trenutku kontakta kože i tekstilnog materijala, čija je temperatura najčešće niža od temperature čovekove kože, pa se toplota odaje sa površine kože. Veća vrednost toplotne



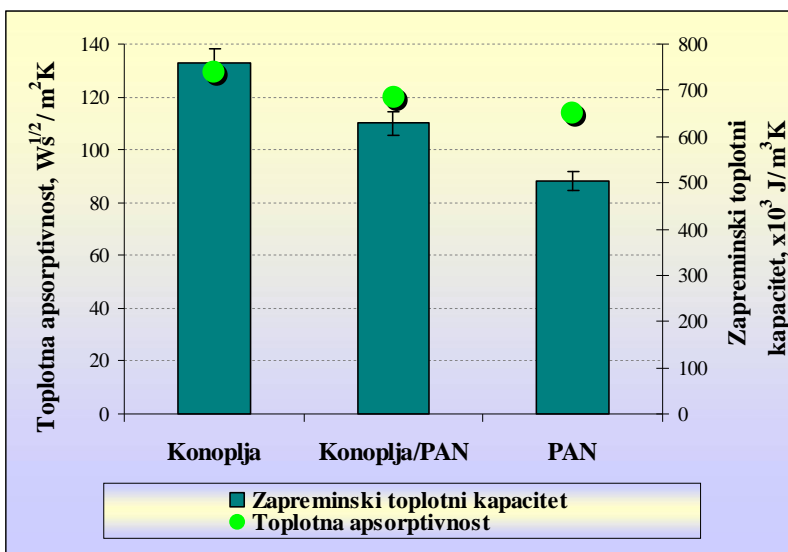
apsorptivnosti ukazuje na veći pad temperature kože i hladniji opip u trenutku kontakta sa tekstilnim materijalom (Pac, 2001). Rezultati izračunavanja toplotne apsorptivnosti pletenina prikazani su na slikama 7.5 i 7.6. Pre testa nege i nošenja, pletenina od konoplje se odlikovala najvećom vrednošću toplotne apsorptivnosti. Smatra se da je to posledica najmanje vrednosti toplotne provodljivosti (slika 7.5) i najveće vrednosti zapreminskog toplotnog kapaciteta ove pletenine (slika 7.6). Najveća toplotna apsorptivnost ove pletenine pokazuje da ona ima najhladniji opip u trenutku kontakta sa čovekovom kožom. Kako se vrednosti toplotne provodljivosti i zapreminskog toplotnog kapaciteta konoplja/PAN pletenine (tabele 7.7 i 7.8) nalaze između vrednosti druge dve pletenine (konoplja i PAN pletenina), ova pletenina ima srednju vrednost toplotne apsorptivnosti (slike 7.5 i 7.6), i „neutralniji“ ili manje hladan osećaj prilikom nošenja (Novaković et al., 2015a). PAN pletenina sa najvećom toplotnom provodljivošću ( $\lambda$ , tabela 7.8) i najmanjim zapreminskim toplotnim kapacitetom ( $C_{zap}$ ), što je posledica najmanje gustine ( $\rho_{PL}$ ) i toplotnog kapaciteta ( $c$ ) ove pletenine (tabela 7.7), ispoljila je najnižu vrednost toplotne apsorptivnosti (b). To ukazuje na najtopliji opip (u poređenju sa ostalim pleteninama) u dodiru sa kožom. Dobijeni rezultati su u skladu sa konstatacijom da su PAN vlakna jedna od najtoplijih, kao i da hidrofilna vlakna obezbeđuju hladniji opip (Hes, 1999).



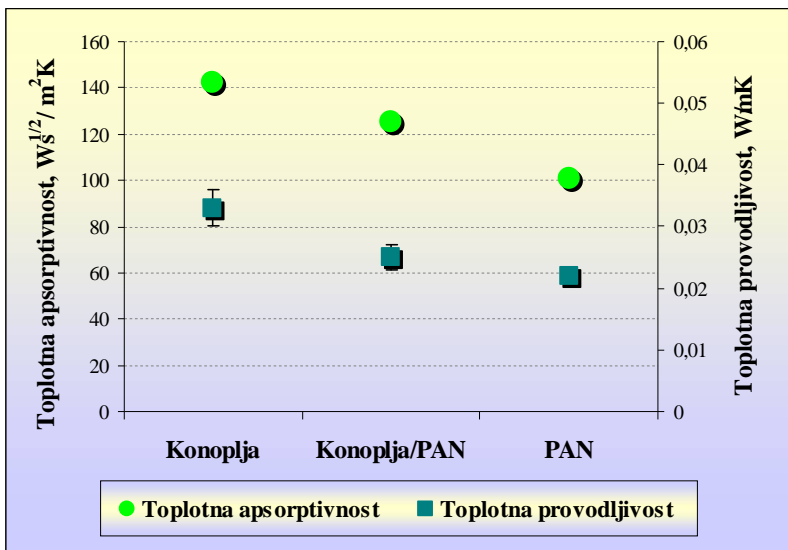
Slika 7.5. Toplotna apsorptivnost i toplotna provodljivost pletenina pre testa nege i nošenja

Vrednosti toplotne apsorptivnosti pletenina su izmenjene nakon testa nege i nošenja u zavisnosti od promena geometrije i toplotnih karakteristika pletenina. Ipak, pletenina od konoplje zadržava najveću vrednost toplotne apsorptivnosti (slike 7.7 i 7.8), jer se, uprkos smanjenom zapreminskom toplotnom kapacitetu (zbog smanjenog specifičnog toplotnog kapaciteta, tabela 7.7), odlikuje najvećom toplotnom provodljivošću (tabela 7.8, usled povećane površinske gustine pletenine). Pre testa nege i nošenja, najveća toplotna apsorptivnost pletenine od konoplje bila je rezultat najvećeg zapreminskog toplotnog kapaciteta, međutim, nakon testa nege i nošenja, smanjenje njenog specifičnog toplotnog kapaciteta kompenzovano je promenom geometrije pletenine koja je dovela do povećanja toplotne provodljivosti (Novaković et al., 2015b). Povećanje toplotne provodljivosti konoplja/PAN pletenine ( $\lambda$ , tabela 7.8), nakon testa nege i nošenja doprinelo je povećanju toplotne apsorptivnosti (b). Iako je specifični toplotni kapacitet ( $c$ ) ove pletenine snižen posle testa nege i nošenja, povećanje njene gustine ( $\rho_{PL}$ ) doprinelo je tome da zapreminski toplotni kapacitet ( $C_{zap}$ ) ostane gotovo nepromenjen, i ne odrazi se na promenu toplotne

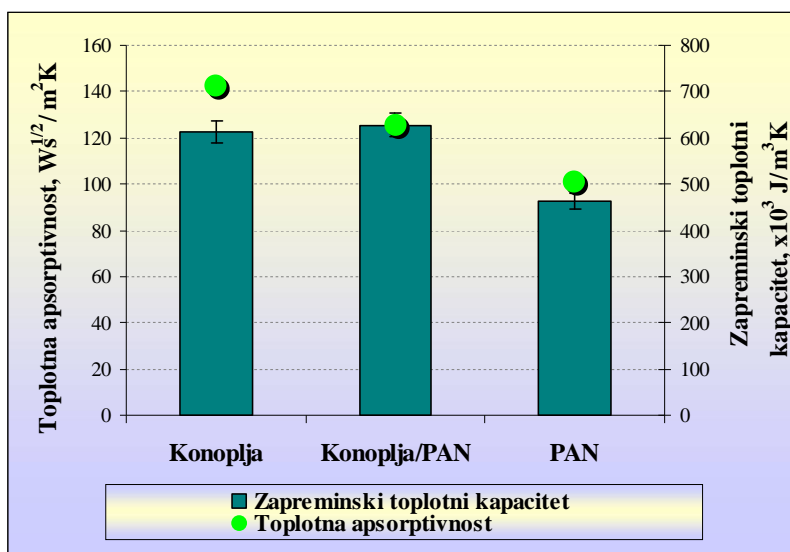
apsorptivnosti konoplja/PAN pletenine. Smanjenje vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta ( $c$ , tabela 7.7), i toplotne provodljivosti ( $\lambda$ ) PAN pletenine nakon testa nege i nošenja (zbog preorijentacije površinskih vlakana), prouzrokovale su najmanju vrednost toplotne apsorptivnosti ove pletenine (slike 7.7 i 7.8). Iako rezultati subjektivne ocene komfora dobijeni u testu nege i nošenja nisu predmet ove analize, interesantna je činjenica da su učesnici u testu ocenili konopljinu pleteninu kao „neutralnu“ u pogledu toplotnog osećaja. Konoplja/PAN pletenina je ocenjena kao „delimično topla“, dok se ocena toplotnog osećaja PAN pletenine kretala od „delimično topla“ do „topla“ (Stanković, 2012; Stanković, 2015).



Slika 7.6. Toplotna apsorptivnost i zapreminski toplotni kapacitet pletenina pre testa nege i nošenja



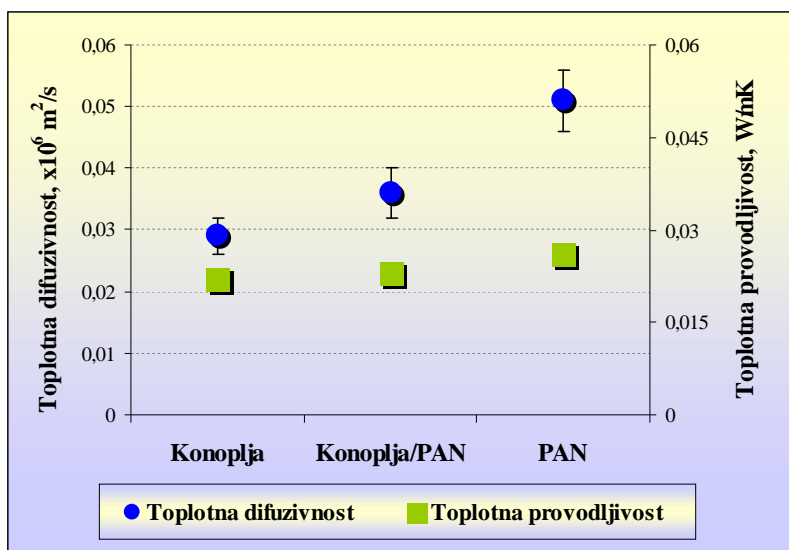
Slika 7.7. Toplotna apsorptivnost i toplotna provodljivost pletenina posle testa nege i nošenja



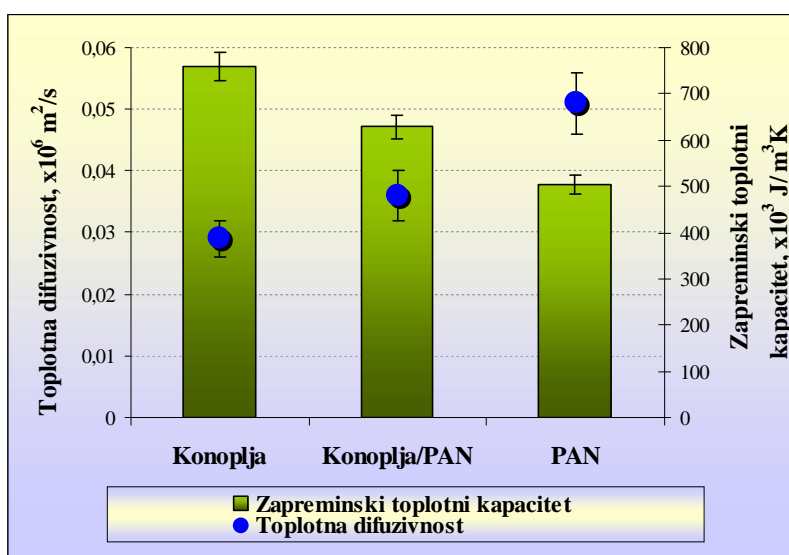
Slika 7.8. Toplotna apsorptivnost i zapreminski toplotni kapacitet pletenina posle testa nege i nošenja

### 7.2.2. Toplotna difuzivnost

Toplotna difuzivnost ( $\alpha_d$ ) predstavlja meru brzine prenosa toplote kroz pleteninu. Veća vrednost toplotne difuzivnosti pletenine pokazuje da će se toplota brže kretati kroz pleteninu odnosno, brže će uspostaviti toplotnu ravnotežu sa okruženjem, što jeste cilj, bilo da se radi o zimskoj ili letnjoj odeći. Toplotna difuzivnost ( $\alpha_d$ ) je direktno proporcionalna toplotnoj provodljivosti ( $\lambda$ ) i obrnuto proporcionalna zapreminskom toplotnom kapacitetu ( $c_{zap}$ ). Prema relaciji 6.13, proističe da će visoku vrednost toplotne difuzivnosti imati pletenina sa visokom toplotnom provodljivošću, niskom gustinom i niskim toplotnim kapacitetom. Pre testa nege i nošenja, najveću toplotnu difuzivnost pokazala je PAN pletenina (slike 7.9 i 7.10), što je posledica njene najveće toplotne provodljivosti (tabela 7.8), najmanje gustine ( $\rho_{PL}$ , tabela 7.4), i najmanjeg specifičnog toplotnog kapaciteta ( $c$ , tabela 7.7). Drugim rečima, najmanji zapreminski toplotni kapacitet PAN pletenine i najveća toplotna provodljivost doprineli su najvećoj toplotnoj difuzivnosti ove pletenine, koja je za oko 75% veća od vrednosti toplotne difuzivnosti za pleteninu od konoplje, i 42% veća u poređenju sa konoplja/PAN pleteninom. Pletenina od konoplje, budući da je okarakterisana najvećim zapreminskim toplotnim kapacitetom ( $c_{zap}$ ) i najmanjom toplotnom provodljivošću ( $\lambda$ ), ispoljila je najmanju toplotnu difuzivnost (slike 7.9 i 7.10). S obzirom da se vrednosti toplotne provodljivosti (tabela 7.8), i zapreminskog toplotnog kapaciteta (tabela 7.7), konoplja/PAN pletenine nalaze između datih vrednosti ovih parametara homogenih pletenina (konoplja i PAN pletenine), toplotna difuzivnost ove pletenine je između vrednosti toplotne difuzivnosti konopljine i PAN pletenine.



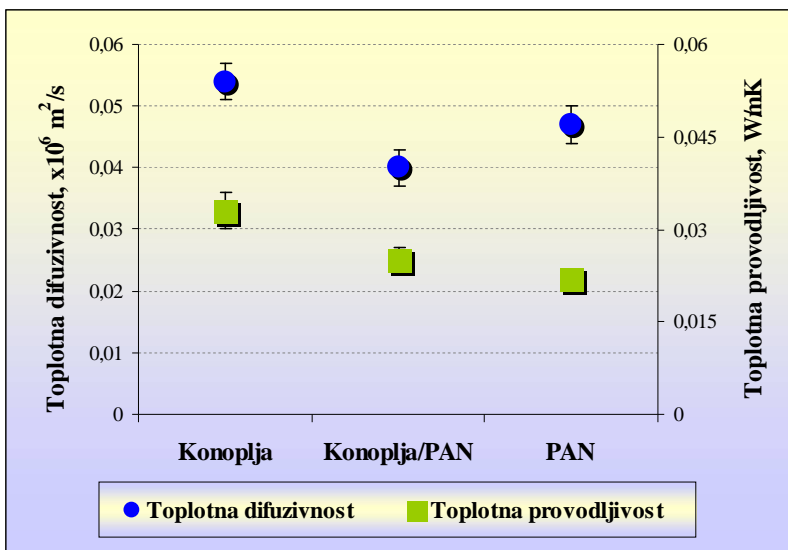
Slika 7.9. Toplotna difuzivnost i toplotna provodljivost pletenina pre testa nege i nošenja



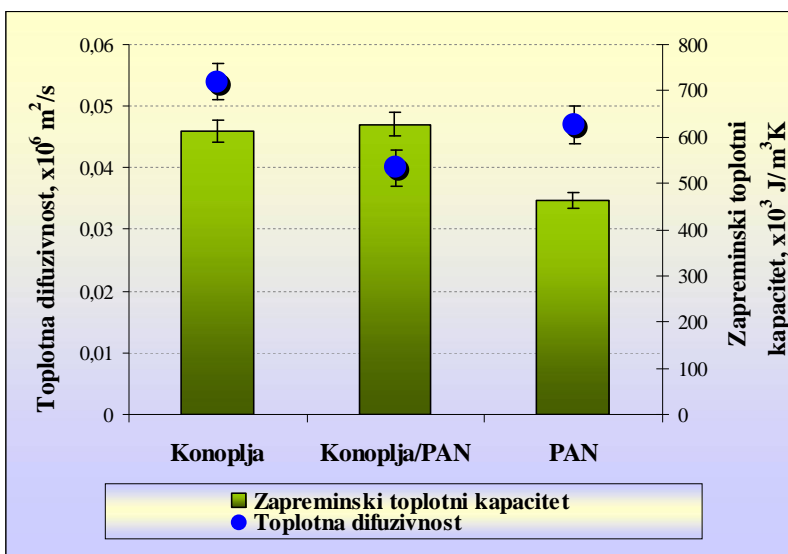
Slika 7.10. Toplotna difuzivnost i zapremski toplotni kapacitet pletenina pre testa nege i nošenja

Vrednosti toplotne difuzivnosti ( $\alpha_d$ ) pletenina nakon perioda nege i nošenja grafički su prikazane na slikama 7.11 i 7.12. Može se uočiti da je došlo do promene u redosledu pletenina u pogledu toplotne difuzivnosti. Najveće promene su uočene kod pletenine od konoplje koja je pre testa nege i nošenja pokazala najmanju vrednost toplotne difuzivnosti, dok se posle testa odlikovala najvećom vrednošću toplotne difuzivnosti. Pošto je specifični toplotni kapacitet ove pletenine smanjen nakon nošenja (c, tabela 7.7), smatra se da je povećana toplotna provodljivost (najveća u poređenju sa ostale dve pletenine, tabela 7.8), dala veći doprinos povećanju vrednosti toplotne difuzivnosti (Novaković et al., 2015b). Upoređujući vrednosti toplotne difuzivnosti svih ispitivanih pletenina, zapažena je najniža vrednost kod konoplja/PAN pletenine (slike 7.11 i 7.12), što se smatra posledicom najvećeg specifičnog toplotnog kapaciteta ove pletenine nakon testa nege i nošenja (c, tabela 7.7). Najveća vrednost

specifičnog toplotnog kapaciteta konoplja/PAN pletenine nakon testa nege i nošenja dovela je do toga da se ona karakteriše najvećim zapreminskim toplotnim kapacitetom ( $C_{zap}$ , tabela 7.7), iako se ne odlikuje najvećom gustinom. Toplotna difuzivnost PAN pletenine veća je od vrednosti ovog parametara za konoplja/PAN pleteninu, jer iako je okarakterisana nižim zapreminskim toplotnim kapacitetom, odlikuje se i nižom vrednošću toplotne provodljivosti.



Slika 7.11. Toplotna difuzivnost i toplotna provodljivost pletenina posle testa nege i nošenja



Slika 7.12. Toplotna difuzivnost i zapreminski toplotni kapacitet pletenina posle testa nege i nošenja

Procentualne vrednosti promena ispitivanih toplotnih parametara date u tabeli 7.9 (Novaković et al., 2020a) ukazuju na najveće promene kod pletenine od konoplje, posebno za toplotnu difuzivnost ( $\alpha_d$ ). Vrednost toplotne apsorptivnosti (b) ove pletenine takođe je povećana, ali u značajno manjoj meri što je posledica smanjenja njenog zapreminskog toplotnog kapaciteta posle nege i nošenja. Međutim, vrednosti toplotnih parametara PAN

pletenine smanjene su nakon perioda nošenja (tabela 7.9) kao posledica smanjenja toplotne provodljivosti ( $\lambda$ ) i zapreminskog toplotnog kapaciteta ( $C_{zap}$ ). Toplotna apsorptivnost je smanjena u većoj meri zbog direktne proporcionalnosti ovih parametara. Konoplja/PAN pletenina pokazala je povećanje toplotne difuzivnosti, dok je povećanje toplotne apsorptivnosti nešto niže zbog skoro nepromenjenog zapreminskog toplotnog kapaciteta (tabela 7.9). Iako je konoplja/PAN pletenina prošla kroz najveće promene geometrije, nakon testa nege i nošenja (tabela 7.4), povećanje toplotne provodljivosti bilo je umereno u poređenju sa pleteninom od konoplje (tabela 7.8). Ovo se može objasniti činjenicom da se konopljina pletenina nakon testa nege i nošenja odlikovala najgušćim pakovanjem vlakana u pređi (FP, tabela 7.3) i najvećom površinskom ( $D_H \times D_V$ , tabela 7.2) i zapreminskom gustinom ( $\rho_{PL}$ , tabela 7.4) pletenine. Poređenjem vrednosti toplotnih parametara mokro relaksirane (pre testa) konopljine i konoplja/PAN pletenine posle perioda nege i nošenja, može se zaključiti da je konoplja/PAN pletenina zadržala "karakter konoplje" nakon perioda njene upotrebe.

Tabela 7.9. Procentualne vrednosti promene toplotnih svojstava pletenina nakon testa nege i nošenja (Novaković et al., 2020a)

Parametar (%)	Konoplja	Konoplja/PAN	PAN
Zapreminski toplotni kapacitet, $C_{zap}$	-19,2%	-0,34%	-8,54%
Toplotna difuzivnost, $\alpha_d$	+85,5%	+11,1%	-7,8%
Toplotna apsorptivnost, $b$	+10,1%	+4,0%	-22,0%

### 7.3 Svojstva upravljanja tečnošću

Sposobnost DL pletenina da propuštaju vodu u lateralnom pravcu (u pravcu debljine pletenine) ocenjena je primenom testa distribucije vode na licu (desnoj strani) i naličju (levoj strani) pletenine. Test distribucije vode opisuje sposobnost upravljanja tečnošću preko dva parametra – sposobnost prenosa tečnosti i sposobnost zadržavanja tečnosti. Sposobnost vertikalnog upravljanja tečnošću ocenjena je pomoću testa kapilarnog kvašenja DL pletenina.

#### 7.3.1 Sposobnost lateralnog upravljanja tečnošću

Sadržaj vlage u pleteninama prilikom sprovođenja testa distribucije vode varirao je od 0% do 30%, iako sadržaj vlage od 0% (apsolutno suvi uzorak) nije prirodno stanje tekstilnog materijala, budući da sva tekstilna vlakna sadrže određenu količinu vlage zavisno od temperature i vlažnosti vazduha. Poznato je da u standardnim uslovima vlakna konoplje sadrže u proseku 10% (od 8 do 12%) vlage (Sponner et al., 2005), a istraživanja su pokazala da mogu da apsorbuju i do 30% tečnosti (Baltazar-y-Jimenez, Bismarck, 2007). Ona količina vlage u tekstilnom materijalu koja je iznad ravnotežnog sadržaja vlage ispunjava pore materijala ili je apsorbovana vlaknima. Imajući u vidu hidrofilnu prirodu konopljinih vlakana, može se očekivati da je višak vlage (iznad 10%) apsorbovan vlaknima. Kako je apsorpcija vode praćena bubrenjem vlakana, dolazi neminovno do smanjenja veličine pora između vlakana (mikropora) kao i pora između pređa (makropora). To znači da veličina makropora određena površinskim modulom i zapreminskim modulom petlje (tabela 7.4) odgovara uzorcima pletenine sa sadržajem vlage do 10% (Novaković et al., 2020b). Vrednosti modula petlje nisu kvantifikovani za uzorke sa većim sadržajem vlage, jer je nemoguće da se u svega par minuta (dok uzorak pletenine sadrži zadati procenat vlage) eksperimentalno odredi tačan

prečnik pređe. Međutim, sa sigurnošću se može reći da su dimenzije makropora u konopljinom pletenini, pri većim procentima vlage, smanjene u odnosu na vrednosti definisane modulima petlje.

Složenu geometrijsku konfiguraciju sistema mikropora u pređi je izuzetno teško definisati, ali se ona može proceniti na osnovu gustine pređe i faktora pakovanja. Vrednosti gustine i faktora pakovanja konopljine pređe, koje su date u tabeli 7.2, odnose se na pređu izvučenu iz mokro relaksiranog uzorka i nošene pletenine sa ravnotežnim sadržajem vlage. Za uzorke sa većim sadržajem vlage, veličina mikropora je morala biti manja.

### 7.3.1.1. Sposobnost prenosa tečnosti

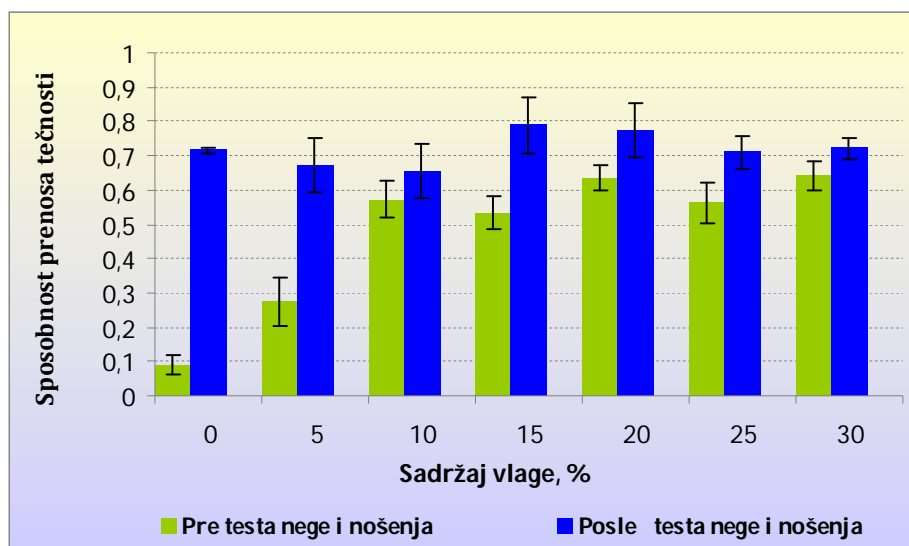
Konoplja se generalno smatra sirovinom sa visokim potencijalom u pogledu sposobnosti upravljanja vlagom, što se pripisuje prisustvu lumena u unutrašnjosti vlakna i njihovoj hidrofilnoj prirodi. Povećan afinitet vlakana konoplje prema vodi definiše sposobnost konopljine pletenine da propušta tečnost. U tabeli 7.10 date su vrednosti distribucije vode ili sposobnost prenosa vode konopljine pletenine (pri različitom sadržaju vlage u uzorku), za desnu (lice), ( $WD_D$ ), i levu (naličje), ( $WD_L$ ) stranu pletenine, pre i posle testa nege i nošenja. Veća vrednost parametra ukazuje na veću sposobnost prenosa tečnosti. Statističkom analizom rezultata polaznih uzoraka (pre testa nege i nošenja), lica i naličja pletenine, konstatovano je da nema razlike u sposobnosti prenosa vode. Drugim rečima, zapaženo je da bez obzira koja je strana pletenine u kontaktu sa vodom, distribucija vode u pletenini je ista (tabela 7.10). Statističkom analizom (Studentov t-test) potvrđen je isti efekat i nakon sprovedenog testa nege i nošenja pletenine od konoplje. Zbog toga je dalja analiza rezultata izvršena usrednjavanjem vrednosti sposobnosti prenosa tečnosti, i ti rezultati su prikazani na slici 7.13.

Tabela 7.10. Sposobnost prenosa tečnosti pletenine od konoplje (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja		
	Lice ( $WD_D$ )	Naličje ( $WD_L$ )	P	Lice ( $WD_D$ )	Naličje ( $WD_L$ )	P
0	0,0096	0,1699	0,275	0,7907	0,6413	0,076
5	0,2953	0,2532	0,851	0,6654	0,6788	0,908
10	0,5309	0,6160	0,819	0,7899	0,5222	0,458
15	0,3661	0,7001	0,076	0,7917	0,7861	0,948
20	0,5672	0,7013	0,301	0,8091	0,7398	0,301
25	0,6449	0,4795	0,429	0,7825	0,6368	0,174
30	0,6586	0,6243	0,527	0,7824	0,6609	0,103

U sprovedenom testu distribucije vode prenos tečnosti kroz pleteninu se vrši transplanarno i radijalno. U prvom momentu, prilikom kontakta pletenine i tečnosti, voda puni makropore, jer je to put najmanjeg otpora kretanju tečnosti. Na taj način najbrže prolazi na suprotnu stranu pletenine. Kada se makropore napune tečnošću služe kao rezervoar iz koga se pune mikropore tj. počinje radijalno kapilarno kvašenje (Benltoufa et al., 2008). Kod pletenine od konoplje se mogu uočiti dve zone. Prvu zonu - do 10 % vlažnosti pletenine, karakteriše niska sposobnost prenosa tečnosti, što se može pripisati hidrofilnoj prirodi konopljinih vlakana. Drugim rečima, može se očekivati da će najveći deo tečnosti nanete na pleteninu biti apsorbovan vlaknima konoplje. U drugoj zoni vlažnosti pletenine – iznad 10%, sposobnost prenosa tečnosti konopljine pletenine naglo se povećava (slika 7.13). To se može objasniti promenom geometrije pređe i pletenine usled bubrenja vlakana i pređe, kako je

prethodno navedeno. Smanjenjem dimenzija makropora, koje su delimično ispunjene vodom, ubrzava se transplanarno kapilarno kvašenje. Smanjenje dimenzija mikropora u uzorcima sa većim sadržajem vlage (iznad ravnotežnog) dovodi do napredovanja radijalnog kapilarnog kvašenja usled porasta kapilarnog pritiska u mikroporama. Statistička analiza je potvrdila uticaj sadržaja vlage na sposobnost prenosa tečnosti pletenine od konoplje [ $F(5,17) > F_{crit}(2,37)$  za  $P(6,75E-4) < \alpha(0,05)$ ].



Slika 7.13. Sposobnost prenosa tečnosti pletenine od konoplje pre i posle testa nege i nošenja

Poređenjem uzoraka pletenine od konoplje pre i posle sprovedenog testa nege i nošenja (slika 7.13), zapaženo je da su pletenine nakon testa nege i nošenja pokazale više vrednosti distribucije vode odnosno, pokazale su veću sposobnost prenosa vode, i to pri svim procentima sadržaja vlage u uzorku (0% - 30%). Ovo povećanje sposobnosti prenosa tečnosti pripisuje se promenama strukture i geometrije konopljinje pletenine. Smanjenje veličine makropora u konopljinjoj pletenini posle testa nege i nošenja, kako je utvrđeno u delu 7.1 (tabela 7.4), dovelo je do ubrzanja transplanarnog prenosa tečnosti. Međutim, sprovedenim t-testom uparenih uzoraka statistički je potvrđeno povećanje sposobnosti prenosa vode samo za neke nivoe vlage u materijalu (tabela 7.11). Razlog možda treba tražiti u činjenici da se veličina mikropora, odnosno kapilara unutar konopljinje pređe promenila u odnosu na pređu pre testa nege i nošenja. Smanjenje gustine pređe, odnosno smanjenje gustine pakovanja vlakana u pređi posle perioda nege i nošenja pletenine (tabela 7.3), upućuje na izvesno povećanje dimenzija mikropora čime se usporava napredovanje tečnosti u radijalnom pravcu. Moguće je da su ovi suprotstavljeni efekti smanjenja veličine makropora, i određeno razmicanje vlakana konoplje u pređi doveli do toga da posle perioda nege i nošenja pletenine sadržaj vlage u pletenini nije jednoznačno uticao na njenu sposobnost da propušta vodu (Novković et al., 2020b). ANOVA statistika je to i potvrdila [ $F(0,93) < F_{crit}(2,37)$  za  $P(0,48) > \alpha(0,05)$ ].

Tabela 7.11. t-test uparenih uzoraka - konoplja (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha=0,05$ )

$\alpha=0,05$	Sadržaj vlage (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
P	0,0002*	0,002*	0,24	0,03*	0,11	0,20	0,03*



Za razliku od vlakana konoplje, PAN vlakna se prema sposobnosti apsorpcije vlage svrstavaju u hidrofobna vlakna, jer ona upijaju svega 1,5-2,5 % vlage (Fuzek, 1985). Zbog toga, može se očekivati da će se višak tečnosti (iznad ravnotežnog sadržaja vlage) nalaziti u porama u pletenini, ispunjavajući delimično makro i mikro pore. Sposobnost propuštanja tečnosti PAN pletenine pri različitom sadržaju vlage, pre i posle testa nege i nošenja, prikazane su u tabeli 7.12. Statističkom analizom dobijenih rezultata (Studentov t-test) konstatovano je da ne postoje statistički značajne razlike u distribuciji vode na licu i naličju PAN pletenine. Drugim rečima, bez obzira koja je strana pletenine u kontaktu sa vodom, PAN pletenina ima istu sposobnost prenosa tečnosti.

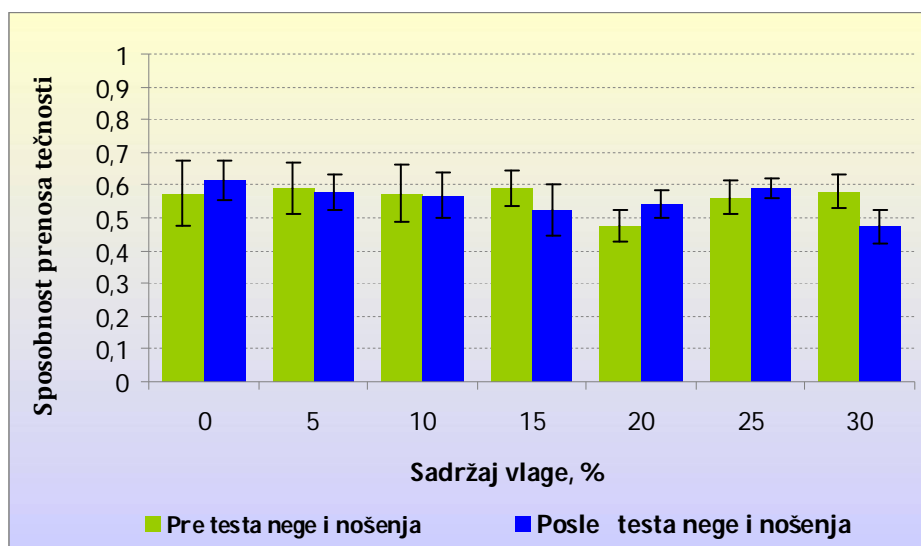
Tabela 7.12. Sposobnost prenosa tečnosti PAN pletenine (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja		
	Lice (WD <sub>D</sub> )	Naličje (WD <sub>L</sub> )	P	Lice (WD <sub>D</sub> )	Naličje (WD <sub>L</sub> )	P
0	0,4971	0,6523	0,678	0,5160	0,7098	0,213
5	0,5816	0,5970	0,957	0,7153	0,4412	0,094
10	0,5927	0,5575	0,860	0,6580	0,4765	0,179
15	0,6606	0,5219	0,164	0,4977	0,5483	0,751
20	0,5051	0,4450	0,485	0,5903	0,4943	0,159
25	0,6034	0,5200	0,329	0,5446	0,6364	0,961
30	0,6340	0,5281	0,248	0,4541	0,4935	0,634

Na osnovu vrednosti datih u tabeli 7.12 izračunata je sposobnost prenosa tečnosti pri različitim nivoima vlage u pletenini, što je prikazano na slici 7.14. ANOVA statistika je pokazala da sposobnost PAN pletenine da prenosi tečnost nije uslovljena količinom vlage koju sadrži [ $F(0,79) < F_{crit}(2,37)$  za  $P(0,58) > \alpha(0,05)$ ]. Razlog tome je upravo činjenica da se višak vode nalazi kao slobodna voda u porama PAN pletenine, pri čemu se ne menjaju dimenzije ni makro- ni mikropora. Drugim rečima, može se reći da geometrijski parametri PAN pletenine, dati u tabeli 7.4, ostaju isti bez obzira na količinu vode u njoj. Međutim, može se zapaziti da je posle perioda nege i nošenja došlo do izvesnog povećanja sposobnosti propuštanja tečnosti (slika 7.14). Ovo povećanje može se pripisati određenom smanjenju dimenzija makropora (tabela 7.5), čime je ubrzan transversalni prenos tečnosti. Nepromenjena površina petlje PAN pletenine ( $S_p$ , tabela 7.4) posle testa nošenja navodi na zaključak da je smanjenje veličine makropora posledica povećanja prečnika PAN pređe ( $d$ , tabela 7.3). Sa druge strane, smanjena gustina pakovanja PAN vlakana u pređi ( $FP$ , tabela 7.3) ukazuje na povećanje mikropora, što vodi ka smanjenju kapilarnog pritiska i usporavanja radijalnog napredovanja tečnosti. Veruje se da zbog ovih suprotstavljenih efekata, povećanje sposobnosti prenosa tečnosti PAN pletenine nije statistički potvrđeno (tabela 7.13). Iz istih razloga kao i pre testa nege i nošenja, sposobnost prenosa tečnosti se nije menjala sa promenom sadržaja vode u PAN pletenini [ $F(0,61) < F_{crit}(2,37)$  za  $P(0,72) > \alpha(0,05)$ ] (Novaković et al., 2020b).

Tabela 7.13. t-test uparenih uzoraka - PAN (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
P	0,63	0,94	0,95	0,53	0,18	0,75	0,18



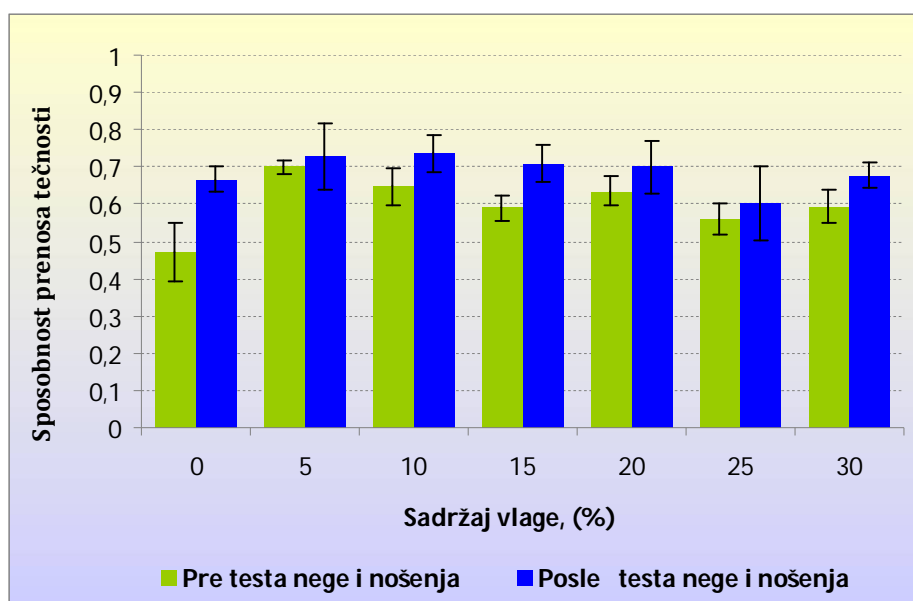
Slika 7.14. Sposobnost prenosa tečnosti PAN pletenine pre i posle testa nege i nošenja

Kod konoplja/PAN pletenine kod koje su kombinovane konopljina i PAN pređa, opravdano je očekivati da se deo viška vode apsorbuje vlaknima konoplje smanjujući u određenoj meri veličinu mikropora u konopljinoj pređi i dimenzije makropora u konoplja/PAN pletenini. Deo vlage se verovatno zadržava u kapilarama PAN pređe. Zbog toga se može očekivati da, u uzorcima pletenine sa povećanim sadržajem vlage, dimenzije makropora odstupaju od vrednosti datih u tabeli 7.4. U tabeli 7.14 prikazane su vrednosti parametra – sposobnosti prenosa tečnosti ( $WD_D$ ,  $WD_L$ ) konoplja/PAN pletenine pri različitom sadržaju vlage, pre i posle testa nege i nošenja. Može se uočiti da je pre testa nege i nošenja, sposobnost prenosa tečnosti konoplja/PAN pletenine veća kada je desna strana (lice), ( $WD_D$ ), u kontaktu sa tečnošću. Statistička analiza je to potvrdila za određeni sadržaj vlage u pletenini (0%, 10% i 15% vlage, tabela 7.14). Moguće objašnjenje uočene pojave je činjenica da konopljina i PAN pređa zauzimaju slučajni položaj prilikom izrade pletenine. Naime, prilikom izrade DL pletenina nije bilo moguće kontrolisati položaj komponenti u pletenini, odnosno nije bilo moguće regulisati koja će se pređa naći na licu a koja na naličju pletenine. Ipak, sudeći prema rezultatima (veća sposobnost prenosa vode u pravcu od lica ka naličju), čini se da je položaj PAN pređe bio na licu konoplja/PAN pletenine. Statistička analiza je to potvrdila za određene nivoe sadržaja vlage (apsolutno suv uzorak, 10 i 15% vlage, tabela 7.14). Pokazalo se, međutim, da posle testa nege i nošenja ovaj efekat razmeštanja komponenti u konoplja/PAN pletenini ne utiče značajno na sposobnost prenosa tečnosti. Zbog toga, kao i zbog lakšeg praćenja dobijenih rezultata, izračunate su srednje vrednosti parametra (sposobnost prenosa tečnosti), i kao takve, prikazane su na slici 7.15.

Kada konoplja/PAN pletenina sadrži količinu vlage veću od ravnotežne, deo vlage se apsorbuje vlaknima konoplje, što dovodi do njihovog bubrenja čime se smanjuje prečnik makropora u konopljinoj pređi. Slično kao kod 100% konopljine pletenine, smanjenje veličine mikropora u konopljinoj komponenti vodi ka intenziviranju radijalnog "napredovanja" vode. Međutim, kako ovde konopljina pređa predstavlja samo jednu komponentu, dok je druga komponenta PAN pređa, uticaj sadržaja vlage na sposobnost pletenine da prenosi tečnost nije nedvosmisleno utvrđen. Statistička analiza, takođe, nije potvrdila uticaj sadržaja vlage u konoplja/PAN pletenini na njenu sposobnost da propušta tečnost [ $F(0,81) < F_{crit}(2,37)$  za  $P(0,56) > \alpha(0,05)$ ].

Tabela 7.14. Sposobnost prenosa tečnosti konoplja/PAN pletenine (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja		
	Lice ( $WD_D$ )	Naličje ( $WD_L$ )	P	Lice ( $WD_D$ )	Naličje ( $WD_L$ )	P
0	0,7417	0,2008	0,016*	0,6953	0,6372	0,308
5	0,8681	0,5301	0,053	0,7282	0,7349	0,962
10	0,8453	0,4519	0,005*	0,7700	0,7049	0,610
15	0,6674	0,5137	0,026*	0,7529	0,6625	0,478
20	0,7263	0,5441	0,140	0,7342	0,6674	0,624
25	0,6234	0,4963	0,109	0,6745	0,5260	0,749
30	0,6799	0,5050	0,150	0,7045	0,6485	0,624



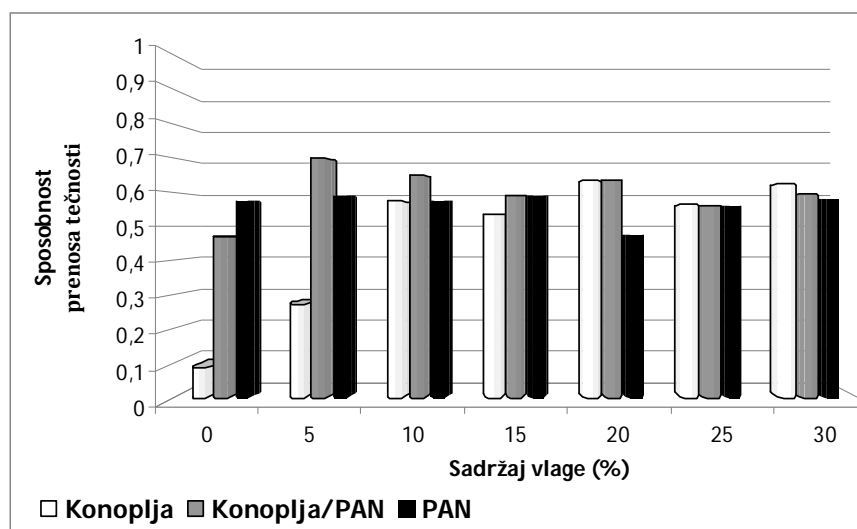
Slika 7.15. Sposobnost prenosa tečnosti konoplja/PAN pletenine pre i posle testa nege i nošenja

Pokazalo se da je sposobnost prenosa tečnosti konoplja/PAN pletenine povećana posle perioda nege i nošenja u čitavom rasponu sadržaja vlage u pletenini (Novaković et al., 2020b). I u ovom slučaju se to može pripisati promenama u geometriji pletenine izazvanim pranjem i deformacionim silama prilikom nege i nošenja. Smanjenje dimenzija makropora (ocenjeno na osnovu modula petlje, tabela 7.4) dovelo je do ubrzanja transverzalnog prenosa tečnosti. Sa druge strane, radialno „napredovanje“ (širenje) tečnosti je u slučaju obe pređa usporeno kao posledica ranije opisanog smanjenja njihove gustine posle testa nege i nošenja ( $\rho_p$ , tabela 7.3). Kao rezultat, povećanje sposobnosti prenosa tečnosti posle period nege i nošenja je statistički dokazano samo u slučaju kada je sadržaj vlage u konoplja/PAN pletenini iznosio 10 i 15% (tabela 7.15). Pored toga, statističkom analizom je potvrđeno da sposobnost prenosa tečnosti konoplja/PAN pletenine nije uslovljena sadržajem vlage ni posle perioda nege i nošenja [ $F(0,38) < F_{crit}(2,37)$  za  $P(0,88) > \alpha(0,05)$ ].

Tabela 7.15. t-test uparenih uzoraka – konoplja/PAN (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

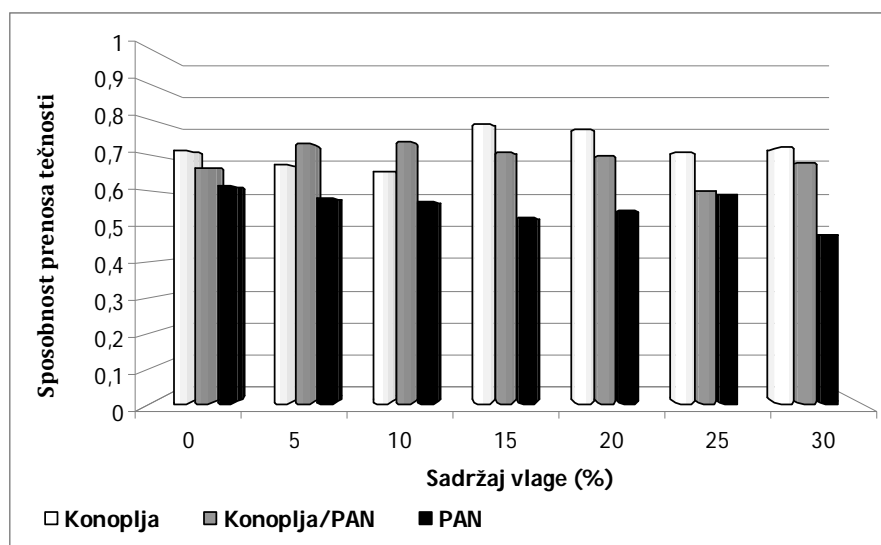
$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
P	0,17	0,76	0,04*	0,04*	0,33	0,21	0,14

Poređenje ispitivanih DL pletenina u pogledu sposobnosti prenosa tečnosti pre testa nege i nošenja dato je na slici 7.16. Kao što se može videti, u zoni sadržaja vlage u pleteninama do 10% značajno manju sposobnost prenosa tečnosti ispoljila je pletenina od konoplje iz razloga koji su ranije navedeni (veličina makropora). U istoj zoni, konoplja/PAN i PAN pletenina ispoljile su slično ponašanje u pogledu sposobnosti propuštanja tečnosti. U zoni većeg sadržaja vlage u pletenini (10-30%), sve tri pletenine ispoljile su sličnu sposobnost prenosa tečnosti. To se pripisuje činjenici da je usled bubrenja konopljinih vlakana i pređe u prisustvu veće količine vlage u konopljinoj pletenini došlo do delimičnog zatvaranja makropora dovoljno da se ubrza transplanarni prenos vode. Statistička analiza rezultata je to i potvrdila (tabela 7.16).



Slika 7.16. Poređenje sposobnosti prenosa vode pre testa nege i nošenja

Na slici 7.17 prikazano je poređenje pletenina prema sposobnosti prenosa tečnosti posle testa nege i nošenja. Za razliku od situacije pre perioda nege i nošenja kada se u zoni nižeg sadržaja vlage, konopljina pletenina odlikovala niskom sposobnošću prenosa tečnosti, posle testa nege i nošenja sve tri pletenine imaju slično ponašanje u tom pogledu. Ovo je potvrđeno statističkom analizom (tabela 7.16) za pletenine u zoni sadržaja vlage od 0% do 15% sadržaja vlage. Razlog tome su svakako, strukturne promene koje je pretrpela konopljina pletenina tokom nošenja i održavanja (pranje, peglanje). Pored toga, čini se da je pri većem sadržaju vlage u pletenini od konoplje, smanjenje veličine makropora usled bubrenja pređe bilo do te mere značajno da, počev od 15%-tnog sadržaja vlage, sposobnost prenosa tečnosti ove pletenine statistički značajno nadmašuje PAN pleteninu. U tom smislu, izuzetno je važna činjenica da se za povećani sadržaj vlage u pletenini (15-30%), sposobnost prenosa tečnosti konoplja/PAN pletenine podudara sa pleteninom od konoplje (slika 7.17), što je i statistički potvrđeno (tabela 7.16).



Slika 7.17. Poređenje sposobnosti prenosa vode u pleteninama posle testa nege i nošenja

Tabela 7.16. Statistička analiza rezultata sposobnosti prenosa vode za sve ispitivane pletenine (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Vlaga (%)	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja			ANOVA, P	
	ANOVA, P	Studentov t-test, P			Studentov t-test, P			
		Konoplja	Konoplja /PAN	PAN	Konoplja	Konoplja /PAN		PAN
0	0,004*	0,03*			0,35			0,39
			0,21		0,52			
5	0,03*	0,01*			0,46			0,24
			0,49		0,14			
10	0,87	0,69			0,82			0,054
			0,57		0,07			
15	0,72	0,51			0,25			0,01*
			0,79		0,03*			
20	0,06	0,98			0,29			0,005*
			0,34		0,04*			
25	0,36	0,26			0,40			0,10
			0,97		0,23			
30	0,55	0,41			0,48			0,001*
			0,87		0,007*			

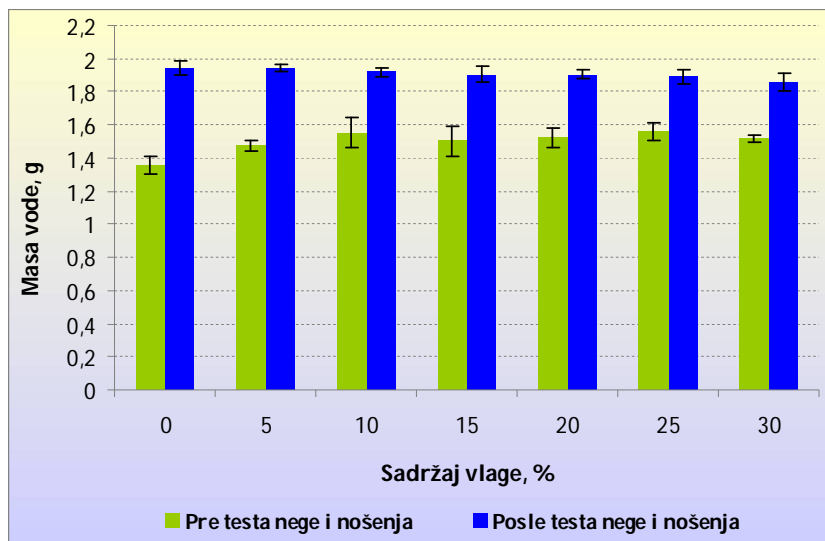
### 7.3.1.2. Sposobnost zadržavanja tečnosti

Sposobnost glatkih DL pletenina da zadržavaju tečnost ocenjena je izračunavanjem mase vode zaostale u uzorku pletenine (W) u testu distribucije vode. U tabeli 7.17 prikazane su vrednosti mase vode zadržane u konopljinjoj pletenini pri različitom sadržaju vlage u uzorku, kako za pleteninu pre, tako i za pleteninu posle testa nege i nošenja. Statističkom analizom rezultata koji se odnose na lice (desna strana) i naličje (leva strana) pletenine pre testa nege i nošenja konstatovano je da nema razlike u sposobnosti zadržavanja vode. Drugim rečima, pokazalo se da u pletenini od konoplje zaostaje ista količina vode, bez obzira koja je

strana pletenine u kontaktu sa tečnošću u testu distribucije vode. Statističkom analizom (Studentov t-test) isti efekat je potvrđen i kod pletenine od konoplje nakon sprovedenog testa nege i nošenja. Zbog toga su u daljem toku analize, rezultati sposobnosti zadržavanja vode konopljine pletenine predstavljeni kao srednje vrednosti rezultata dobijenih u oba slučaja (i leva i desna strana pletenine). Tako dobijeni rezultati prikazani su na slici 7.18.

Tabela 7.17. Sposobnost zadržavanja vode pletenine od konoplje (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	Voda zadržana u pletenini, W (g)					
	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja		
	Lice	Naličje	P	Lice	Naličje	P
0	1,3591	1,3526	0,241	1,9177	1,9660	0,621
5	1,5316	1,4142	0,453	1,9312	1,9563	0,052
10	1,5652	1,5389	0,895	1,9056	1,9347	0,208
15	1,5080	1,4946	0,409	1,8975	1,9148	0,667
20	1,5050	1,5464	0,409	1,8877	1,9237	0,339
25	1,5217	1,5995	0,752	1,8760	1,9045	0,469
30	1,4885	1,5434	0,760	1,8488	1,8646	0,725



Slika 7.18. Sposobnost zadržavanja vode pletenine od konoplje pre i posle testa nege i nošenja

Analiza varijanse (ANOVA) je pokazala da sadržaj vlage u pletenini od konoplje ne utiče na njenu sposobnost zadržavanja vode [ $P(0,55) > \alpha(0,05)$ ]. To se objašnjava konstantnim brojem hidroksilnih grupa u celulozi koje sa molekulima vode uspostavljaju vodonične veze. Sadržaj mesta dostupnih za uspostavljanje vodoničnih veza sa molekulima vode nije se promenio sa porastom sadržaja vlage (do 30%) u konopljinoj pletenini. Iz istog razloga, sadržaj vlage u konopljinoj pletenini posle sprovedenog testa nege i nošenja nije uticao na njenu sposobnost zadržavanja vode [ $P(0,31) > \alpha(0,05)$ ]. Međutim, poređenjem konopljine pletenine pre i posle sprovedenog testa nege i nošenja (slika 7.18), zapaženo je da nošene pletenine imaju veću sposobnost zadržavanja vode, i to za sve ispitivane vrednosti sadržaja vlage u uzorku (0-30%). Ovo je statistički potvrđeno t-testom uparenih uzoraka (tabela 7.18). Veća sposobnost zadržavanja vode konopljine pletenine posle sprovedenog testa uzrokovana

je njenim strukturnim promenama, pre svega povećanjem površinske mase (tabela 7.2) i gustine pletenine (tabela 7.4). Naime, povećanje broja vlakana na jedinici površine pletenine, odnosno povećanje gustine vlakana na jedinici zapremine pletenine podrazumeva veći broj hidroksilnih grupa dostupnih za vezivanje sa molekulima vode.

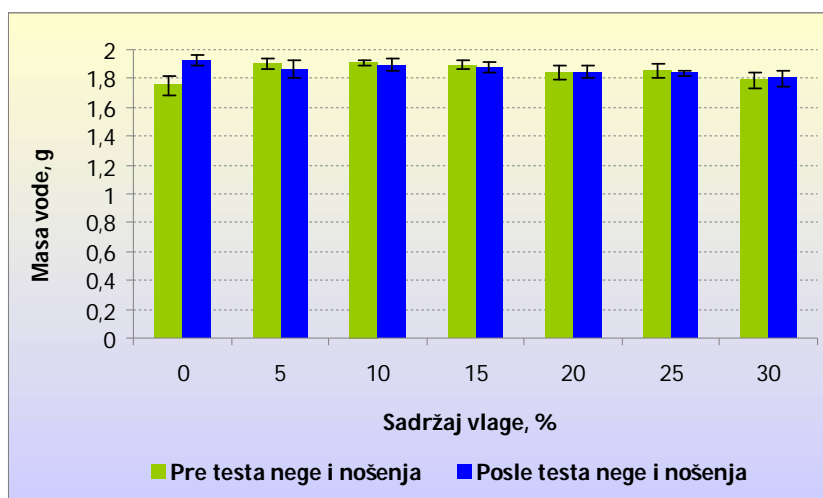
Tabela 7.18. t-test uparenih uzoraka (sposobnost zadržavanja vode) - konoplja (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
P	0,003*	0,001*	0,008*	0,008*	0,014*	0,034*	0,009*

Vrednosti mase zadržane vode u PAN pletenini, pri različitom sadržaju vlage u uzorku, pre i posle testa nege i nošenja prikazane su u tabeli 7.19. S obzirom da je Studentov t-test je pokazao da jedino kod apsolutno suvog uzorka PAN pletenine pre testa nege i nošenja postoji statistički značajna razlika u sposobnosti zadržavanja vode kada je desna ili leva strana uzorka u kontaktu sa vodom, izračunate su srednje vrednosti sposobnosti zadržavanja vode PAN pletenine za ispitivani interval sadržaja vlage, koje su uključivale obe strane pletenine. Tako dobijeni rezultati sposobnosti zadržavanja vode PAN pletenine pre i posle testa nege i nošenja prikazani su na slici 7.19. Može se uočiti trend opadanja sposobnosti zadržavanja vode PAN pletenine kada je u uzorku prisutna veća količina vode (iznad 20%), kako pre, tako i posle sprovedenog testa nege i nošenja. To je potvrđeno ANOVA statistikom za PAN pleteninu pre  $[F(28,24) > F_{crit}(2,37)]$  za  $P(4,89 \times 10^{-12}) < \alpha(0,05)]$  i posle  $[F(3,36) > F_{crit}(2,37)]$  za  $P(0,01) < \alpha(0,05)]$  testa nege i nošenja. Efekat opadanja sposobnosti zadržavanja vode u prisustvu veće količine vode (iznad 20%) u PAN pletenini objašnjava se činjenicom da, kada su makropore već delimično popunjene tečnošću, dolazi do njihovog bržeg punjenja sa novom količinom vode. Brže punjenje makropora dovodi do ubrzanja radijalnog kvašenja, odnosno do bržeg kapilarnog kvašenja, kada voda prisutna u mikroporama pletenine brže „izbija“ na njenu suprotnu površinu (Novaković et al., 2015c). Iako ovaj efekat nije značajno uticao na sposobnost prenosa tečnosti PAN pletenine (slika 7.14) pre i posle testa nege i nošenja, veruje se da je ipak doprineo smanjenju sposobnosti zadržavanja tečnosti u PAN pletenini.

Tabela 7.19. Sposobnost zadržavanja vode PAN pletenine (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	Voda zadržana u pletenini, W (g)					
	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja		
	Lice	Naličje	P	Lice	Naličje	P
0	1,9218	1,5816	0,006*	1,9412	1,9137	0,307
5	1,9218	1,8847	0,224	1,8881	1,8522	0,692
10	1,9218	1,8976	0,460	1,9115	1,8788	0,560
15	1,9135	1,8778	0,245	1,8913	1,8576	0,389
20	1,8324	1,8563	0,674	1,8600	1,8287	0,503
25	1,8324	1,8694	0,577	1,8539	1,8230	0,133
30	1,8015	1,7722	0,639	1,8040	1,8015	0,961



Slika 7.19. Sposobnost zadržavanja vode PAN pletenine pre i posle testa nege i nošenja

Statističkim t-testom uparenih uzoraka (tabela 7.20) potvrđeno je da nema statistički značajnih razlika u sposobnosti zadržavanja tečnosti PAN pletenine pre i posle sprovedenog testa nege i nošenja. Ovo se može objasniti minimalnim promenama strukture PAN pletenine posle testa nege i nošenja, kako je opisano u tački 7.1.

Tabela 7.20 t-test uparenih uzoraka (sposobnost zadržavanja vode) - PAN (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
P	0,062	0,494	0,603	0,430	1	0,666	0,596

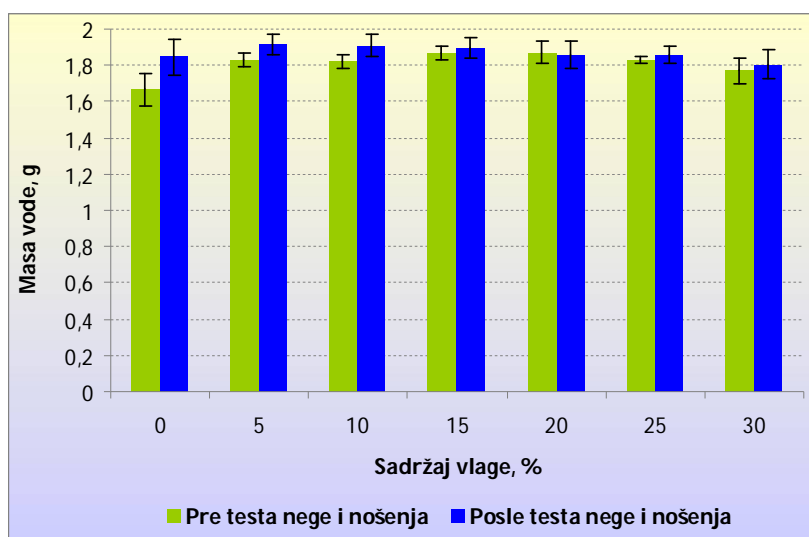
U tabeli 7.21 prikazane su vrednosti mase zadržane vode u konoplja/PAN pletenini pri različitom sadržaju vlage u uzorku, pre i posle testa nege i nošenja. Imajući u vidu činjenicu da je statistička analiza (Studentov t-test) samo kod polaznog uzorka konoplja/PAN pletenine sa 5%-vlažnošću pokazala postojanje razlike u masi zadržane vode zavisno od strane pletenine koja je u kontaktu sa vodom, pristupilo se izračunavanju srednje vrednosti mase zadržane vode polazeći od eksperimentalno dobijenih vrednosti za obe strane (lice i naličje) pletenine. Na osnovu ovako dobijenih vrednosti konstruisan je dijagram na slici 7.20.

Tabela 7.21. Sposobnost zadržavanja vode konoplja/PAN pletenine (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	Voda zadržana u pletenini, W (g)					
	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja		
	Lice	Naličje	P	Lice	Naličje	P
0	1,6146	1,7184	0,575	1,8611	1,8344	0,816
5	1,7548	1,9046	0,008*	1,9210	1,9030	0,791
10	1,7472	1,8898	0,138	1,8875	1,9280	0,509
15	1,8404	1,8938	0,274	1,8814	1,9094	0,580
20	1,8502	1,8900	0,558	1,8427	1,8720	0,697
25	1,8319	1,8330	0,961	1,8450	1,8677	0,611
30	1,7394	1,7999	0,516	1,7815	1,8237	0,597



Rezultati prikazani dijagramom na slici 7.20 ukazuju na činjenicu da se, sa promenom sadržaja vlage u uzorku, sposobnost zadržavanja vode konoplje/PAN pletenine ne menja, kako pre, tako i posle testa nege i nošenja. To je potvrđeno statističkom analizom (ANOVA) za pleteninu pre [ $F(1,41) < F_{crit}(2,37)$  za  $P(0,25) > \alpha(0,05)$ ] i posle perioda nege i nošenja [ $F(1,37) < F_{crit}(2,37)$  za  $P(0,25) > \alpha(0,05)$ ]. Slično kao kod pletenine od konoplje, razlog je konstantan broj funkcionalnih (hidroksilnih) grupa u vlaknima konoplje koje mogu da vežu molekule vode (Dent, 2001). Sa povećanjem površinske mase i gustine konoplja/PAN pletenine posle sprovedenog testa nege i nošenja (tabela 7.2) može se očekivati i povećanje broja funkcionalnih grupa dostupnih za molekule vode. Međutim, čini se da to nije značajno uticalo na povećanje sposobnosti zadržavanja vode konoplja/PAN pletenine posle testa nege i nošenja, kako je potvrđeno statističkom analizom uparenih uzoraka (tabela 7.22), posebno pri većem sadržaju vlage (15% i više). Očigledno se ovde radi o kompleksnom uticaju dve komponente (konopljina i PAN pređa) sa različitim hidrofilnim svojstvima, što nameće potrebu za daljim ispitivanjima.



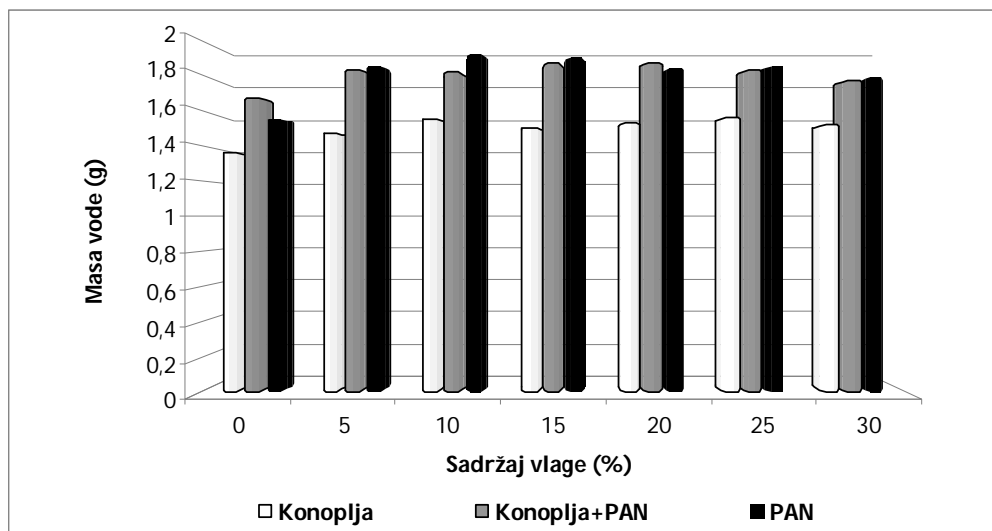
Slika 7.20. Sposobnost zadržavanja vode konoplja/PAN pletenine pre i posle testa nege i nošenja

Tabela 7.22 t-test uparenih uzoraka (sposobnost zadržavanja vode) – konoplja/PAN (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
P	0,027*	0,181	0,021*	0,175	0,650	0,378	0,358

Poređenje sposobnosti zadržavanja vode konopljine, PAN i konoplja/PAN pletenine pre testa nege i nošenja predstavljeno je na slici 7.21. Može se uočiti da je konopljina pletenina okarakterisana najmanjom sposobnošću zadržavanja vode. To se, sa jedne strane, može objasniti dimenzijama makropora u konopljinoj pletenini (kvantifikovano kroz površinski i zapreminski modul petlje, tabela 7.4). Naime, već je dokazano da se makropore relativno velikih dimenzija pune tečnošću značajno sporije (Birrfelder, 2013). Sa druge strane, PAN pređa je zbog svoje veće poroznosti u poređenju sa konopljinom pređom, što je kvantifikovano kroz manju gustinu i faktor pakovanja PAN pređe (tabela 7.3), sposobna da primi veću količinu vode u svojim mikroporama. Budući da konoplja/PAN pleteninu čine

jedna PAN i jedna pređa od konoplje, ukupna zapremina mikropora u pletenini bi trebalo da bude između vrednosti ukupne zapremine mikropora odgovarajućih homogenih pletenina. Ova činjenica, uz manje dimenzije makropora konoplja/PAN pletenine u odnosu na konopljinu pleteninu (tabela 7.4), objašnjavaju približne vrednosti sposobnosti zadržavanja vode PAN i konoplja/PAN pletenine. Rezultati statističke analize dati su u tabeli 7.23. ANOVA analiza je potvrdila statističku značajnost razlika u sposobnosti zadržavanja vode ispitivanih pletenina, dok je Studentovim t-testom utvrđeno da razlike u sposobnosti zadržavanja vode potiču upravo od pletenine od konoplje.

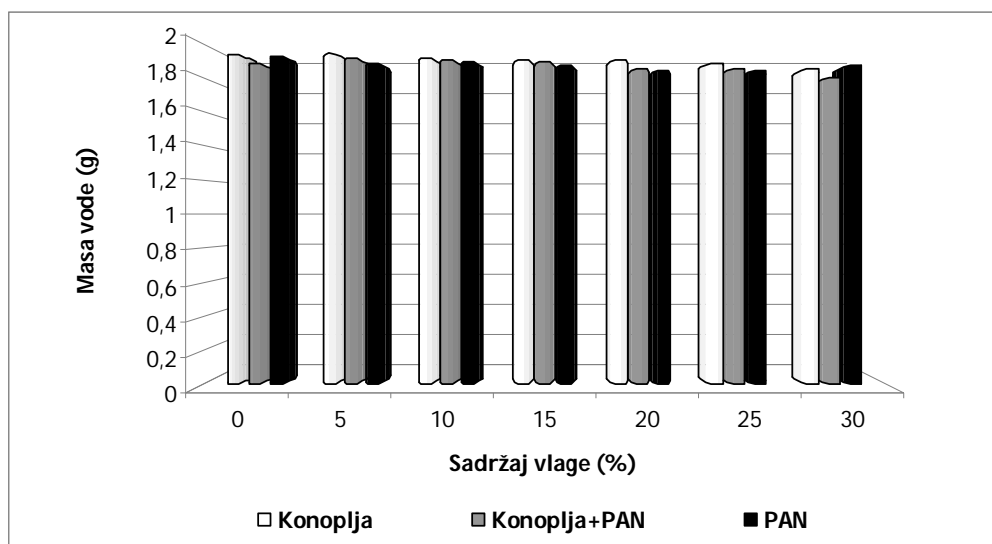


Slika 7.21. Sposobnosti zadržavanja vode DL pletenina pre testa nege i nošenja (Novaković et al., 2020b)

Tabela 7.23. Statistička analiza rezultata sposobnosti zadržavanja vode za sve ispitivane pletenine (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage u uzorku (%)	Pre testa nege i nošenja			Posle testa nege i nošenja
	ANOVA $p(\alpha=0,05)$	Studentov t-test, $p(\alpha=0,05)$		
		Konoplja	Konoplja/PAN	
0	0,034*	0,01*	0,715	0,424
5	$6,67 \cdot 10^{-4}$ *	0,047*	0,525	0,341
10	$9,67 \cdot 10^{-4}$ *	0,018*	0,514	0,707
15	$1,78 \cdot 10^{-4}$ *	0,011*	0,272	0,499
20	$2,94 \cdot 10^{-3}$ *	0,017*	0,083	0,197
25	$7,74 \cdot 10^{-3}$ *	0,000*	0,108	0,098
30	$2,09 \cdot 10^{-3}$ *	0,031*	0,472	0,269

Posle sprovedenog testa nege i nošenja, sve tri pletenine su ispoljile približno istu sposobnost zadržavanja tečnosti za ispitivani interval sadržaja vlage u materijalu, kako je prikazano na slici 7.22, i statistički potvrđeno analizom varijanse (ANOVA, tabela 7.23). Razlog tome je činjenica da je kod pletenine od konoplje, koja se odlikovala nižom sposobnošću zadržavanja vode pre perioda nege i nošenja, došlo do značajnog povećanja vrednosti ovog parametra posle testa, što je prethodno analizirano i statistički potvrđeno (tabela 7.18). Sa druge strane, sposobnost zadržavanja tečnosti PAN i konoplja/PAN pletenine nije se značajno promenila posle testa nege i nošenja.



Slika 7.22. Sposobnost zadržavanja vode DL pletenina posle testa nege i nošenja (Novaković et al., 2020b)

### 7.3.2. Sposobnost jednosmernog upravljanja tečnošću

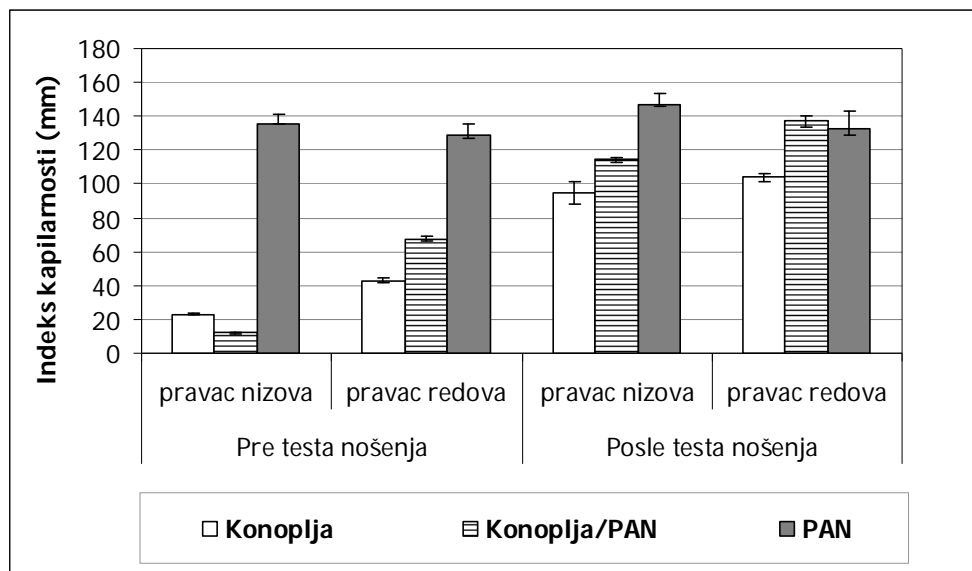
Test kapilarnog kvašenja, koji je primenjen u ovom istraživanju, omogućio je ocenu sposobnosti DL pletenina da upravljaju tečnošću u vertikalnom pravcu pomoću dva parametra – standardni indeks kapilarnosti,  $H_{60}$  (mm) i maksimalna visina kvašenja pletenine  $H_{max}$  (mm). Standardni indeks kapilarnosti predstavlja visinu napredovanja tečnosti u toku 60 min. Maksimalna visina kvašenja je visina maksimalnog napredovanja tečnosti do uspostavljanja ravnoteže sa suprotstavljenom gravitacionom silom. Iako je vreme potrebno za realizaciju testa distribucije vode od svega nekoliko minuta omogućilo ispitivanje sposobnosti pletenina da propuštaju tečnost pri različitom sadržaju vlage, vertikalni test kapilarnog kvašenja pletenina pružio je mogućnost analize fenomena prenosa tečnosti kroz ispitivane pletenine u pravcu nizova i u pravcu redova. S obzirom da strukturu kuliranih pletenina, u koje se ubrajaju pletenine u okviru ovog istraživanja, čini usmereno (horizontalno) orijentisana pređa koja gradi pleteninu formirajući redove petlji, postavlja se pitanje efekta orijentacije pređe na sposobnost pletenine da prenosi tečnost.

Na slici 7.23 prikazane su vrednosti indeksa kapilarnosti DL pletenina ( $H_{60}$ ) u pravcu nizova i u pravcu redova, pre i posle testa nege i nošenja. Jasno se uočava značajna razlika u pogledu ovog parametra između ispitivanih pletenina pre testa nege i nošenja. ANOVA statistikom su ove razlike potvrđene, kako u pravcu nizova [ $F(502,38) > F_{crit}(5,14)$  za  $P(2,09 \times 10^{-7}) < \alpha(0,05)$ ], tako i u pravcu redova [ $F(130,98) > F_{crit}(5,14)$  za  $P(1,12 \times 10^{-5}) < \alpha(0,05)$ ]. PAN pletenina je okarakterisana najvećim indeksom kapilarnosti, kako u pravcu

nizova, tako i u pravcu redova. Najmanjom vrednošću indeksa kapilarnosti odlikuje se konoplja/PAN pletenina u pravcu nizova i konopljina pletenina u pravcu redova. Najveći indeks kapilarnosti PAN pletenine ( $H_{60}$ ) podrazumeva najbrže kapilarno kvašenje ove pletenine u prvih 60 minuta, što je posledica hidrofobne prirode PAN vlakana. Sklonost vlakana konoplje da apsorbuju vodu uzrokovala je niži indeks kapilarnosti ( $H_{60}$ ) konopljine i konoplja/PAN pletenine. S obzirom da su kod konoplja/PAN pletenine kombinovane jedna hidrofilna i jedna hidrofobna pređa, moglo bi se očekivati da bi se vrednost indeksa kapilarnosti ove pletenine kretala između vrednosti indeksa kapilarnosti homogenih (po sastavu) pletenina, što je slučaj za konoplja/PAN pleteninu u pravcu redova. Međutim, pokazalo se da je u pravcu nizova indeks kapilarnosti konoplja/PAN pletenine niži u poređenju sa pleteninom od konoplje (slika 7.23). Objašnjenje je dato u narednom paragrafu.

Rezultati indeksa kapilarnosti,  $H_{60}$  (mm), koji su prikazani na slici 7.23, ukazali su na pojavu različite brzine kapilarnog kvašenja pletenina u pravcu nizova i u pravcu redova pletenine. Objašnjenje ove pojave zasniva se na fundamentalnom saznanju da je kapilarno kvašenje uslovljeno geometrijom, veličinom i distribucijom kapilara (mikropora) koje se formiraju između vlakana u pređi (Kissa, 1996). Prilikom kapilarnog kvašenja u pravcu redova pletenine, tečnost putuje duž pređe (koja je formirala red) čime je obezbeđen kontinuitet toka tečnosti (usled povezanosti kapilara). To je preduslov za brže napredovanje tečnosti (Ozturuk, 2011). Sa druge strane, u slučaju kapilarnog kvašenja pletenine u pravcu nizova, položaj pređe narušava kontinuitet toka tečnosti (kapilare nisu povezane). Prilikom kvašenja u pravcu nizova, tečnost neminovno prelazi sa jednog na susedne slojeve vlakana, čime se usporava kapilarno kvašenje.

Upotreba dve različite pređe dodatno je povećala heterogenost „putanje“ tečnosti konoplja/PAN pletenine, čime bi se mogao objasniti manji indeks kapilarnosti ( $H_{60}$ ) ove pletenine u odnosu na vrednost indeksa konopljine pletenine (slika 7.23).



Slika 7.23. Indeks kapilarnosti,  $H_{60}$  (mm), DL pletenina

Statistička analiza (Studentov t-test) je potvrdila različitu sposobnost kvašenja u pravcu nizova i u pravcu redova za konoplja i konoplja/PAN pletenine, dok je PAN pletenina okarakterisana približnim vrednostima indeksa kapilarnosti u oba pravca (tabela 7.24). Kao što je već rečeno, prilikom kapilarnog kvašenja u pravcu nizova tečnost prelazi iz segmenata jedne petlje u susedne segmente pređe koji formiraju petlju iznad. Pomoću SEM mikrofotografija pletenina, koje su prikazane na slici 7.2 (deo 7.1), može se zaključiti da je

dodirna površina između susednih petlji u nizu najveća kod PAN pletenine, pa je tako olakšano prelaženje tečnosti u susedne slojeve vlakana. Kao rezultat, tečnost putuje kroz PAN pleteninu približno istom brzinom u oba pravca.

Tabela 7.24. Studentov t-test – smer kapilarnog kvašenja (nizovi i redovi), (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Parametar (jedinica)		Konoplja	Konoplja/PAN	PAN
$H_{60}^a$ (mm)	Pre nošenja (mokro relaksirano)	0,000*	0,000*	0,462
	Posle nošenja	0,245	0,003*	0,309
$H_{max}^b$ (mm)	Pre nošenja (mokro relaksirano)	0,043*	0,306	0,215
	Posle nošenja	0,357	0,000*	0,082

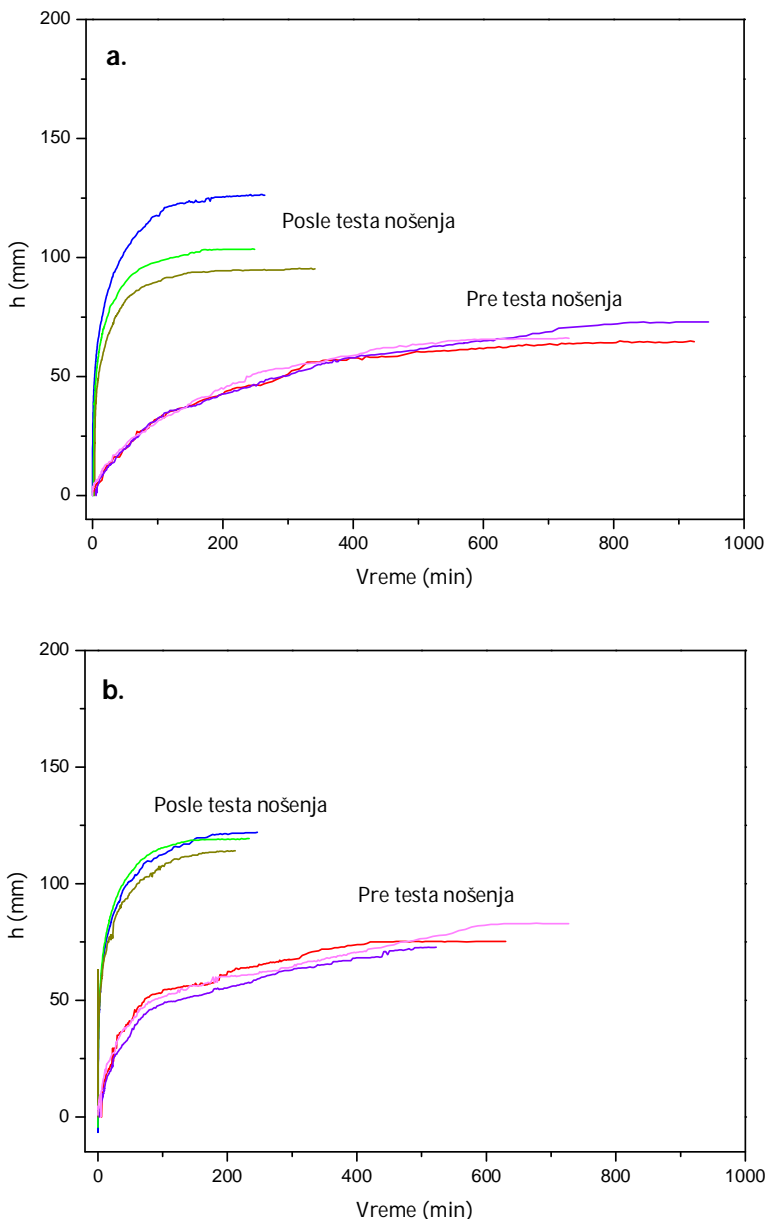
a) indeks kapilarnosti; b) maksimalna visina kvašenja

Posle sprovedenog testa nege i nošenja, povećane su vrednosti indeksa kapilaranosti ( $H_{60}$ ) konoplja i konoplja/PAN pletenina, kao što je prikazano na slici 7.23. Brže „upijanje“ tečnosti je rezultat strukturnih promena u ovim pleteninama do kojih je došlo tokom testa nege i nošenja. Veličina makropora u ovim pleteninama se smanjila posle testa nege i nošenja (tabela 7.4), a to je uzrokovalo njihovo brže punjenje tečnošću, odnosno brže kvašenje pletenine, naročito u prvoj fazi (prvih 10 minuta). Pored toga, čini se da je povećanje veličine kapilara (mikropora) u konopljinjnoj pređi, usled smanjenja gustine pakovanja vlakana (tabela 7.3) doprinelo bržem napredovanju tečnosti kroz pređu. Prema Kissa-i (Kissa, 1996), to znači da se veličina kapilara približila optimalnoj vrednosti koja omogućava brzo napredovanje tečnosti kroz pređu. Promene u pogledu kapilaranosti pređe od konoplje, kao i strukturne promene konoplja/PAN pletenine (tabela 7.5) dovele su do kompenzovanja efekta heterogenosti geometrije sistema mikropora posle testa nege i nošenja, pa je vrednost indeksa kapilaranosti ( $H_{60}$ ) konoplja/PAN pletenine veća u poređenju sa konopljom u pravcu nizova, i približna vrednosti PAN pletenine u pravcu redova (slika 7.23). Statistička analiza je potvrdila značajnost razlika između pletenina u pogledu brzine kvašenja u pravcu nizova [ $F(26,0) > F_{crit}(5,14)$  za  $P(0,001) < \alpha(0,05)$ ], kao i približne vrednosti indeksa kapilaranosti ( $H_{60}$ ) konoplja/PAN i PAN pletenina u pravcu redova [ $P(0,70) > \alpha(0,05)$ ].

Rezultati prikazani na slici 7.23, a kako je potvrđeno i statističkom analizom (tabela 7.24), pokazali su da se razlika u vrednosti indeksa kapilaranosti u pravcu nizova i u pravcu redova zadržala kod konoplja/PAN pletenine posle perioda nege i nošenja, dok je kod konopljine pletenine došlo do anuliranja razlike u brzini napredovanja tečnosti zavisno od pravca kvašenja. To se objašnjava značajnim povećanjem gustine petlji konopljine pletenine, posle testa nege i nošenja (tabela 7.2). Veći broj petlji na jedinici površine pletenine doveo je do povećanja dodirne površine između segmenata pređe susednih petlji, a time je olakšano kretanje vode između slojeva vlakana u susednim petljama. Budući da je PAN pletenina pretrpela samo diskretne strukturne promene tokom perioda nege i nošenja, još uvek su prisutne približne vrednosti indeksa kapilarnog kvašenja ove pletenine u oba pravca.

Krive kapilarnog kvašenja DL pletenina prikazane su na slikama 7.24 do 7.26. Tipičan oblik kriva kapilarnog kvašenja uočen je kod sve tri pletenine. Ovakav uobičajeni oblik krive podrazumeva veći nagib krive u početnoj fazi kvašenja kada se tečnost upija makroporama materijala, a zatim se nagib krive značajno menja formirajući plato. Ovaj plato predstavlja maksimalnu visinu kvašenja ( $H_{max}$ ) kada se nivo tečnosti u materijalu uravnotežava sa gravitacionom silom. Sa aspekta komfora, važno je ne samo da tekstilni materijal ima što veću maksimalnu visinu kvašenja, već i da tu visinu dostigne što brže (Trojnikov, 2011). U tom smislu, krive kapilarnog kvašenja omogućuju praćenje dinamike napredovanja tečnosti kroz pleteninu, odnosno ocenu brzine dostizanja maksimalnog nivoa kvašenja pletenine. Poređenjem kriva kapilarnog kvašenja konopljine pletenine pre i posle testa nege i nošenja

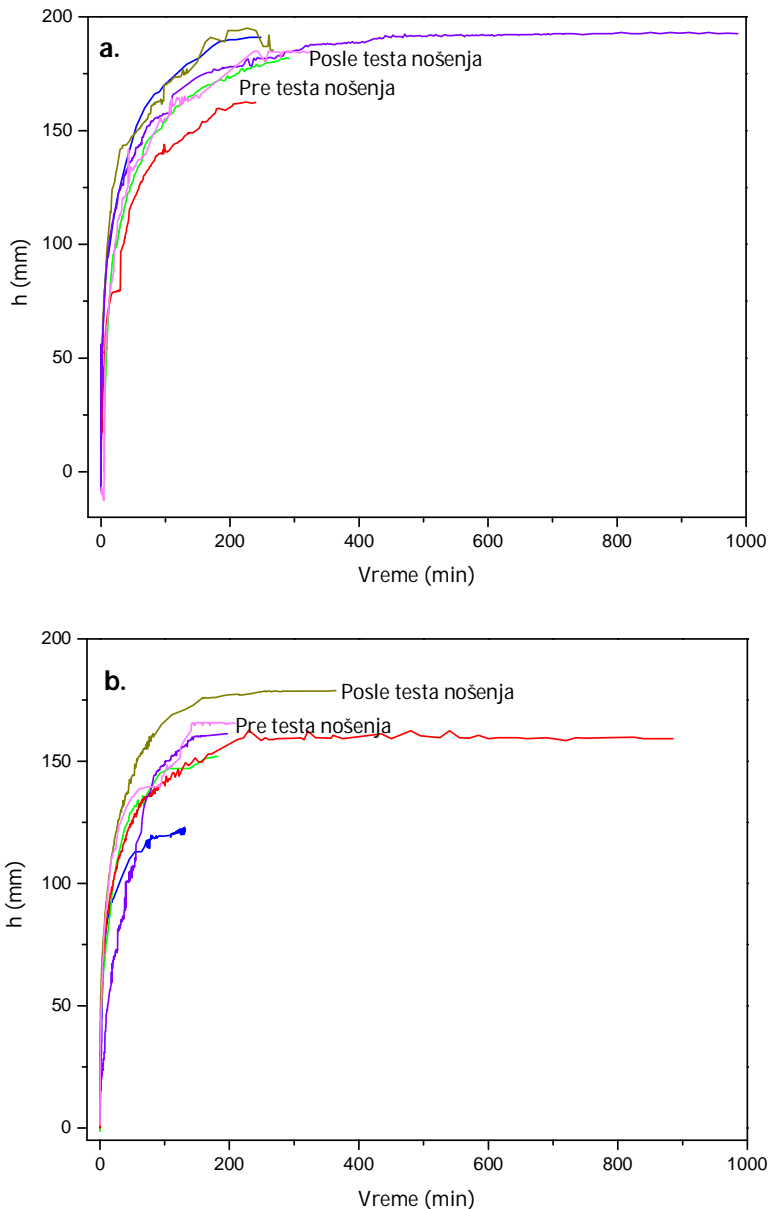
uočava se da je, posle sprovedenog testa, značajno povećan nivo maksimalnog kvašenja pletenine ( $H_{max}$ ) uz značajno brže dostizanje tog nivoa, i to kako u pravcu nizova, tako i u pravcu redova (slika 7.24a i b). Promena veličine i distribucije pora u konopljinjnoj pletenini posle perioda nege i nošenja (smanjenje veličine makropora i povećanje prečnika mikropora) imalo je pozitivan efekat na svojstva kapilarnog kvašenja ove pletenine.



Slika 7.24. Krive kapilarnog kvašenja pletenine od konoplje: (a) u pravcu nizova, (b) u pravcu redova

Oblik kriva kapilarnog kvašenja PAN pletenine (slika 7.25 a i b) ilustruje izuzetno brzo dostizanje maksimalnog nivoa tečnosti ( $H_{max}$ ) u pletenini, i to u oba pravca (nizovi i redovi). To je pre svega, omogućeno hidrofobnošću PAN vlakana, a zatim i, kako se čini, optimalnom distribucijom pora u pletenini. Izgleda da izvesno smanjenje veličine makropora nakon testa nege i nošenja PAN pletenine (tabela 7.5) nije značajnije uticalo na brzinu napredovanja tečnosti u početnoj fazi kvašenja, pa se u tom delu krive kapilarnog kvašenja pletenine pre i

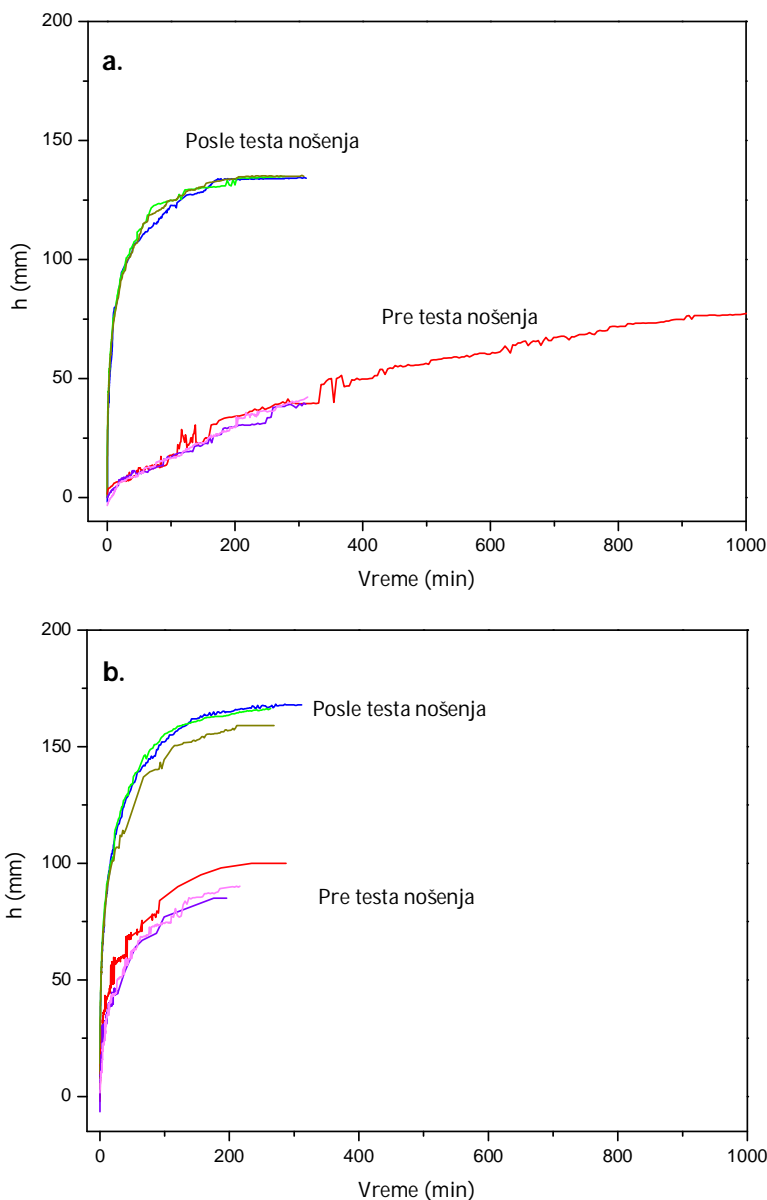
posle testa nege i nošenja gotovo preklapaju (slika 7.25a i b). Blago rasipanje kriva kvašenja PAN pletenine pre i posle testa nošenja u drugoj fazi toka kvašenja posledica je neujednačene distribucije kapilara u PAN pređi. Ipak, položaj ovih kriva ukazuje da određene promene u PAN pređi, do kojih je došlo posle perioda nege i nošenja, nisu imale efekta na maksimalni nivo kvašenja ( $H_{max}$ ), ali ni na brzinu dostizanja tog nivoa.



Slika 7.25. Krive kapilarnog kvašenja PAN pletenine: (a) u pravcu nizova, (b) u pravcu redova

Krive kapilarnog kvašenja konoplja/PAN pletenine u pravcu nizova, pre testa nege i nošenja (slika 7.26a) pokazuju da, nakon prilično usporenog kapilarnog kvašenja pletenine u prvoj fazi (usled heterogenosti putanje kretanja tečnosti), kasnije ipak dolazi do nešto bržeg kretanja tečnosti, pa se maksimalni nivo kvašenja ( $H_{max}$ ) konoplja/PAN pletenine u pravcu nizova približava vrednosti maksimalnog nivoa tečnosti za pleteninu u pravcu nizova. To je potvrđeno Studentovim t-testom (tabela 7.24). Kada je reč o toku kvašenja konoplja/PAN pletenine (pre testa nošenja) u pravcu redova (slika 7.26b), krive kvašenja pokazuju da je

prisustvo PAN pređe doprinelo, ne samo povećanju maksimalnog nivoa kvašenja ( $H_{max}$ ), već i ubrzanju napredovanja tečnosti. Strukturne promene konoplja/PAN pletenine do kojih je došlo tokom nege i nošenja (tabele 7.2 i 7.4), znatno su ubrzale kapilarno kvašenje ove pletenine u oba pravca, a to je dovelo i do znatnog povećanja maksimalnog nivoa kvašenja pletenine.

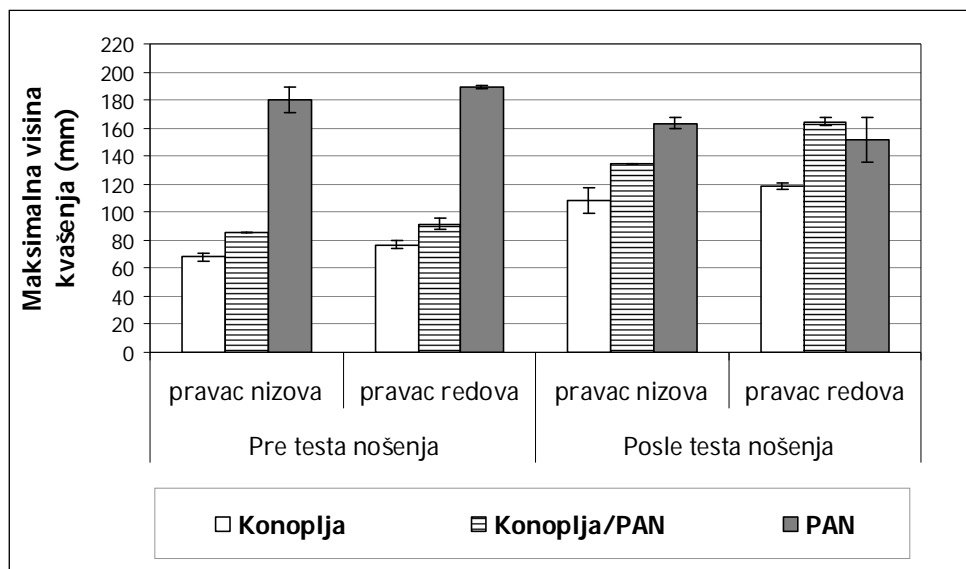


Slika 7.26. Krive kapilarnog kvašenja konoplja/PAN pletenine: (a) u pravcu nizova, (b) u pravcu redova

Radi poređenja, na slici 7.27 date su vrednosti maksimalnog nivoa (visine) kvašenja ( $H_{max}$ ) ispitivanih DL pletenina. Pre testa nege i nošenja, najvećom maksimalnom visinom kvašenja odlikuje se PAN pletenina, zatim konoplja/PAN i konopljina pletenina. ANOVA statistikom je to potvrđeno, kako u pravcu nizova [ $F(121,47) > F_{crit}(5,14)$  za  $P(1,4 \times 10^{-5}) < \alpha(0,05)$ ], tako i u pravcu redova [ $F(207,7) > F_{crit}(5,14)$  za  $P(2,9 \times 10^{-6}) < \alpha(0,05)$ ]. Posle testa nege i nošenja, redosled pletenina prema maksimalnoj visini kvašenja ( $H_{max}$ ) ostaje isti – PAN, konoplja/PAN, konoplja, kada je kvašenje u pravcu nizova [ $F(50,36) > F_{crit}(5,14)$  za



$P(0,000) < \alpha(0,05)$ ]. Međutim, slično kao u slučaju indeksa kapilarnosti ( $H_{60}$ ), u pravcu redova su dobijene približne vrednosti maksimalne visine kvašenja konoplja/PAN i PAN pletenine [ $P(0,50) > \alpha(0,05)$ ].



Slika 7.27. Maksimalna visina kvašenja,  $H_{max}$  (mm), DL pletenina

Generalno, promene konstrukcionih karakteristika DL pletenina koje su nastale tokom perioda nege i nošenja, i koje su dovele do promene geometrijskih parametara, odnosno do preraspodele pora u pleteninama (tabela 7.2 i 7.4), imale su pozitivan efekat na sposobnost jednosmernog upravljanja tečnošću konopljne i konoplja/PAN pletenina, ubrzavajući proces kapilarnog kvašenja, uz povećanje maksimalnog nivoa kvašenja pletenine ( $H_{max}$ ), i u pravcu nizova i u pravcu redova. Iako je PAN pletenina pretrpela određene promene svoje geometrije, pre svega, smanjenje otvorene poroznosti posle testa nege i nošenja (tabela 7.5), to nije uticalo na sposobnost upravljanja tečnošću ove pletenine. Statističkom analizom (t-test uparenih uzoraka) je to i potvrđeno (tabela 7.25).

Tabela 7.25. t-test uparenih uzoraka – uticaj perioda nege i nošenja (\*statistički značajno za  $P < \alpha, \alpha=0,05$ )

P ( $\alpha=0,05$ )		Konoplja	Konoplja/PAN	PAN
$H_{60}$	Pravac nizova	0,009*	0,000*	0,404
	Pravac redova	0,004*	0,002*	0,789
$H_{max}$	Pravac nizova	0,031*	0,000*	0,484
	Pravac redova	0,015*	0,003*	0,514

#### 7.4. Propustljivost vazduha pri različitom sadržaju vlage u pleteninama

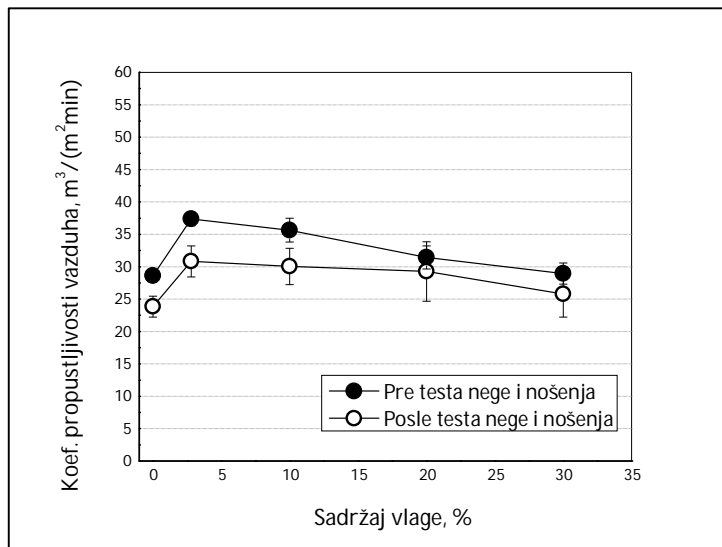
Sposobnost tekstilnih materijala da propuštaju vazduh predstavlja jedno od osnovnih higijenskih svojstava odevnih tekstilnih materijala budući da omogućuje stalnu izmenu gasova od tela ka okruženju i obrnuto, od okruženja ka telu. Pored toga, sposobnost tekstilnog materijala da propušta vazduh predstavlja značajan parametar termofiziološkog komfora jer obezbeđuje ventilaciju mikroklimе, odnosno slojeva vazduha „zarobljenih“ u slojevima

odevnih predmeta, ili sloja vazduha između čovekove kože i tekstilnog materijala koji je u kontaktu sa njim. U poređenju sa drugim svojstvima komfora tekstilnih materijala (toplotna svojstva, propuštanje pare i tečnosti), sposobnost propuštanja vazduha je u najvećoj meri određena strukturnim parametrima samog materijala, kao što su poroznost i debljina (Stanković, 2012). Sa druge strane, rezultati dosadašnjih istraživanja pokazali su da vrsta i morfologija vlakana ne utiču na sposobnost materijala da propušta vazduh što je posledica činjenice da su sva tekstilna vlakna, bez obzira na hemijski sastav i morfologiju, nepropustljiva za vazduh (Goodings, 1964; Yoon, Buckley, 1984). Ipak, druga istraživanja su pokazala da geometrija vlakana, na primer finoća (Lamb, Moris, 1990) i oblik poprečnog preseka (Tyagi et al., 2008; Majumdar et al., 2010), kao i fizička svojstva vlakana, na primer elastičnost, uslovljavaju propustljivost vazduha tekstilnih materijala tako što utiču na gustinu pakovanja vlakana u pređe (Stanković, 2008). Povećanje gustine pakovanja vlakana vodi ka smanjenju specifične površine tekstilnog materijala, čime se smanjuje otpor strujanju vazduha, odnosno povećava se propustljivost vazduha (Das et al., 2006). S obzirom na činjenicu da su tekstilna vlakna nepropustljiva za vazduh, generalno je prihvaćeno da se propuštanje vazduha kroz tekstilni materijal dešava gotovo u potpunosti kroz makropore koje formiraju segmenti pređa u strukturi tkanine ili pletenine.

Na osnovu uopštenih vrednosti poroznosti tekstilnih materijala, koje se kreću u rasponu od 50% do 90%, generalno se smatra da je, kada fluid (tečnost ili gas) struji kroz materijal, pad pritiska uslovljen viskoznom i inercijalnim silama (Kulichenko, 2005). Istraživanja su pokazala da se, kada su u pitanju tekstilni materijali, inercijalne sile mogu zanemariti za razliku od viskoznih sila (Wehner et al., 1987). Zbog toga, parametri strukture i geometrije tekstilnog materijala koji uslovljavaju otpor kretanju vazdušnog toka definišu njegovu sposobnost da propušta vazduh. U tom smislu, pored ukupne poroznosti tekstilnog materijala, propustljivost vazduha je direktno uslovljena brojem, oblikom i veličinom - površinom poprečnog preseka i dužinom, makropora (Goodings, 1964; Brasquet, Le Cloriec, 2000; Zhu et al., 2015). Sa smanjenjem veličine makropora u materijalu raste otpor strujanju vazduha čime se smanjuje njegova propustljivost vazduha. Pored toga, istraživanja su ukazala na ukupnu površinu koja ograničava pore, kao i stepen njihove distorzije tj. odstupanja od pravolinijske projekcije čime se produžava tok strujanja vazduha kroz materijal (Polipowski et al., 2017a; Polipowski et al., 2017b).

U uslovima pojačane fizičke aktivnosti čoveka, ili promene klimatskih uslova njegovog okruženja, kada je u mikroklimi prisutan i tečan znoj koji se apsorbuje i prenosi kroz tekstilni materijal, neminovno dolazi do promene geometrije tekstilnog materijala. U tom smislu postavlja se pitanje kako se menja propustljivost vazduha sa promenom sadržaja vlage u tekstilnim materijalima. Sposobnost ispitivanih DL pletenina da propuštaju vazduh u dinamičkim uslovima kada se sadržaj vlage u njima menja, ispitivana je u rasponu sadržaja vlage od 0, preko ravnotežnog sadržaja vlage (% vlažnosti u kondicioniranim uslovima) do 30% vlažnosti u koracima od 10%. Na slici 7.28 prikazane su vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) pletenine od konoplje, pre i posle testa nege i nošenja. Prilikom određivanja koeficijenta propustljivosti vazduha pletenine od konoplje u kondicioniranim uslovima, gravimetrijski je utvrđeno da je ravnotežni sadržaj vlage u ovoj pletenini iznosio 4,9%. Dobijene vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) mokro relaksirane pletenine od konoplje (pre testa nege i nošenja) ukazuju na činjenicu da je sadržaj vlage u pletenini uticao na ovaj parametar, što je i statistički potvrđeno [ $F(14,06) > F_{crit}(3,48)$  za  $P(4,12E-04) < \alpha(0,05)$ ]. Ono što se na grafikonu (slika 7.28) može uočiti je smanjena sposobnost propuštanja vazduha apsolutno suvog uzorka (0% vlage) konopljine pletenine u odnosu na uzorak pletenine sa ravnotežnim sadržajem vlage. Razlog tome je pojava jačanja elektrostatičkih sila između vlakana u odsustvu ravnotežnog sadržaja vlage. Naime, u normalnim atmosferskim uslovima kada tekstilni materijal sadrži određenu ravnotežnu količinu vlage, elektrostatičke sile između polimernih vlakana su male. Međutim, u uslovima

kada sadržaj vlage u materijalu pada ispod ravnotežnog sadržaja (npr. u prelaznom periodu tj. pre dostizanja stacionarne razmene energije i mase u sistemu čovek-tekstilni materijal-atmosfera), otpornost vlakana raste. Usled generisanog naelektrisanja na površini vlakana jačaju elektrostatičke sile (najčešće odbijajuće) između vlakana koje se suprotstavljaju kohezionim silama kao što su elastična i gravitaciona sila (Skelton, 1975). Verujemo da ovaj efekat slabljenja kohezionih sila između vlakana, neminovno dovodi do razmicanja (snižavanja gustine pakovanja) vlakana u pređi i to posebno kod hidrofilnih vlakana, kao što je konoplja, čime se smanjuje veličina (površina i zapremina) makropora u pletenini. Posledica toga je smanjena propustljivost vazduha apsolutno suve pletenine od konoplje.



Slika 7.28. Koeficijent propustljivosti vazduha,  $A_P$  ( $m^3/(m^2min)$ ), kod pletenine od konoplje

Sa porastom vlažnosti (iznad ravnotežnog sadržaja od 4,9%) konopljine pletenine, vrednost koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) opada do sadržaja vlage od 10%, a zatim se povećava sa daljim porastom sadržaja vlage u pletenini (slika 7.28). Smanjenje propustljivosti vazduha u uzorku sa 10% vlage objašnjava se povećanjem prečnika pređe usled bubrenja konopljinih vlakana, što ima za posledicu smanjenje veličine makropora u pletenini. Ovo smanjenje veličine makropora je veoma teško kvantifikovati, ali je u skladu sa rezultatima ranijih istraživanja koja su potvrdila relativno velike promene propustljivosti vazduha sa veoma malim promenama poroznosti tekstilnih materijala (Wehner et al., 1987). Činjenica da se sa daljim porastom sadržaja vlage u konopljinoj pletenini povećava koeficijent propustljivost vazduha ( $A_P$ ), iako se u prvom momentu može učiniti neobičnom, nalazi svoje objašnjenje u statici fluida i frikcionim silama kod čvrstih materija. Kao što je već prethodno navedeno, specifična površina pora uslovljava brzinu toka vazduha kroz tekstilni materijal regulišući sile trenja na granici faza vlakno-vazduh. Dokazano je da u prisustvu vlage dolazi do monoslojne hemisorpcije, ali i do višeslojne fizisorpcije, molekula vode na površini hidrofilnih vlakana (Min et al., 2007). Veruje se da ovo „oblaganje“ hidrofilnih vlakana molekulima vode smanjuje otpor kretanju vazduha kroz pore u pletenini. Pored toga, dobijeni trend povećanja koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) sa povećanjem sadržaja vlage u pletenini od konoplje (iznad 10%) može se pripisati kapilarnom efektu između vlakana u pređi. Naime, ako se pretpostavi da je voda u konopljinoj pletenini (pri sadržaju vlage u intervalu 20% - 30%) kapilarno vezana između vlakana, dolazi do jačanja kohezionih sila između vlakana (Skelton, 1975). Ovo povećanje kohezionih sila između konopljinih vlakana dovelo je do smanjenja prečnika pređe, čime se otvorio prostor za strujanje vazduha kroz konopljinu pleteninu,

odnosno povećana je propustljivost vazduha. Sa isparavanjem vlage iz uzorka (ispod 20% vlažnosti), prvo isparava kapilarno vezana voda čime opisani efekat slabi, slabe i sile trenja između vlakana, povećava se prostor koji segmenti konopljinje pređe zauzimaju u pletenini, i smanjuje se njena sposobnost propuštanja vazduha.

Kao što se može videti na slici 7.28, zavisnost koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) i sadržaja vlage u konopljinoj pletenini posle sprovedenog testa nege i nošenja prati trend mokro relaksirane pletenine (pre testa nege i nošenja). Statistička analiza (ANOVA) je potvrdila uticaj sadržaja vlage na koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konopljinje pletenine i nakon perioda nege i nošenja [ $F(23,78) > F_{crit}(3,48)$  za  $P(4,3E-05) < \alpha(0,05)$ ]. Uočeno ponašanje konopljinje pletenine u pogledu sposobnosti propuštanja vazduha posle perioda nege i nošenja može se pripisati prethodno datim objašnjenjima. Međutim, promene strukturnih i geometrijskih parametara ove pletenine nakon perioda nege i nošenja dovele su do snižavanja koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) za gotovo sve vrednosti sadržaja vlage u pletenini. Povećanje gustine petlji i debljine pletenine od konoplje posle testa nege i nošenja (tabela 7.2) predstavlja ozbiljnu pretpostavku za smanjenje koeficijenta propustljivosti vazduha. Nakon sprovedenog testa nege i nošenja, poroznost konopljinje pletenine se u određenoj manjoj meri smanjila (2,3%, tabela 7.5). Međutim, ukupna makroporoznost (otvorena poroznost) konopljinje pletenine se značajno smanjila, kao i vrednosti površinskog i zapreminskog modula petlje (tabela 7.5). To sve ukazuje na smanjenu veličinu (površinu i dubinu) makropora u pletenini posle testa nege i nošenja, a time i na smanjenje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ). T-test uparenih uzoraka statistički je potvrdio smanjenje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) za apsolutno suvi uzorak konopljinje pletenine, za uzorak sa ravnotežnom vlažnošću, kao i pri 30% vlažnosti pletenine (tabela 7.26).

Tabela 7.26. t-test uparenih uzoraka - konoplja (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)				
	0	4,9	10	20	30
P	0,016*	0,029*	0,25	0,67	0,038*

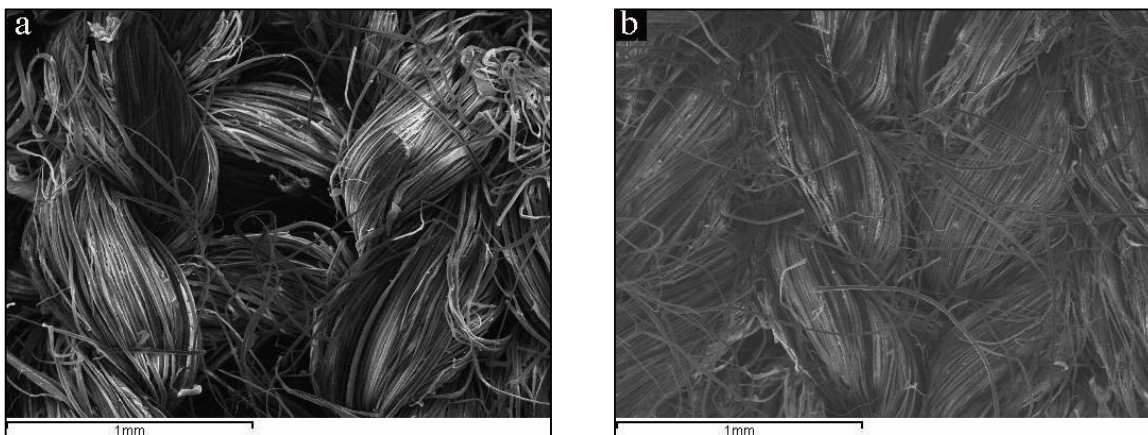
Činjenica da se koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konopljinje pletenine sa 10% i 20% -tnim sadržajem vazduha nije značajnije smanjio posle testa nege i nošenja može se pripisati značajnijem skupljanju pletenine, odnosno značajnom povećanju površinske gustine petlji (tabela 7.2). Naime, sa povećanjem broja petlji na jedinici površine pletenine ne smanjuje se samo veličina makropora, već i dužina slobodnih segmenata pređe između tačaka preplitanja (međusobnog ukrštanja segmenata pređe prilikom formiranja pletenine) u petlji. To je ilustrovano SEM mikrofotografijama konopljinje pletenine pre i posle testa nege i nošenja, koje su prikazane na slici 7.29. Jasno se može videti da su slobodni segmenti pređe u petlji konopljinje pletenine pre testa nege i nošenja značajno duži (slika 7.29a). U tim segmentima je olakšano bubrenje vlakana, koje onda dovodi i do lakšeg razmicanja vlakana (povećanje prečnika segmenta pređe u petlji). Nasuprot tome, na slici 7.29b može se videti da je dužina segmenata konopljinje pređe koji se ne nalaze u tačkama ukrštanja pređe u petlji značajno redukovana, čime je otežano reorganizovanje položaja vlakana u ovim segmentima usled njihovog bubrenja. Zbog toga, iako se posle testa nege i nošenja nije promenila količina apsorbovane vode vlaknima konoplje, verovatno pre dolazi do distorzije petlji u vertikalnom pravcu (u pravcu debljine pletenine). Time se može objasniti isti stepen odstupanja koeficijenta propustljivosti vazduha  $A_p$  (u odnosu na vrednosti pri ravnotežnom sadržaju vlage) konopljinje pletenine sa 10% -tnom vlažnošću pre i posle testa nege i nošenja (tabela 7.27), i približavanje vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konopljinje pletenine pre i posle testa. Sa povećanjem vlažnosti pletenine (20%), u slobodnijim segmentima pređe u konopljinoj pletenini pre testa se verovatno, osim tečnosti, nalaze i „vazdušni džepovi“ koji,

nasuprot „vodenim mostovima“, snižavaju kohezione sile između vlakana konoplje. Zbog toga se koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konopljine pletenine pre testa nošenja povećao za samo 4,2%, dok je to povećanje iznosilo 11,8% za pleteninu posle perioda nege i nošenja (tabela 7.27). Otuda približne vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konopljine pletenine sa 20%-tnom vlažnošću pre i posle testa nege i nošenja. Pri vlažnosti pletenine od 30%, nema više „vazdušnih džepova“, kapilare su potpuno napunjene vodom i vrše pribijanje vlakana u slobodnim segmentima pređe u pletenini. Ovaj efekat je slabije izražen kod konopljine pletenine posle testa nege i nošenja usled veće gustine petlji, pa je u ovom slučaju došlo do manjeg procentulanog povećanja koeficijenta propustljivosti vazduha (tabela 7.27).

Kod apsolutno suvih uzoraka pletenine, kada dolazi do maksimalnog razmicanja vlakana u pređi, izgleda da su, iako kraći, segmenti pređe između tačaka preplitanja u konopljinoj pletenini posle testa nege i nošenja više doprineli smanjenju propustljivosti vazduha dodatnim zatvaranjem makropora, čija je veličina već manja u odnosu na makropore u pletenini pre testa nege i nošenja. Kao što se može videti u tabeli 7.27, koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) apsolutno suve konopljine pletenine posle testa nege i nošenja smanjen je za nepunih 50 % u odnosu na vrednost koeficijenta propustljivosti vazduha pri ravnotežnom sadržaju vazduha u pletenini.

Tabela 7.27. Procentualno odstupanje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konopljine pletenine u odnosu na vrednosti koeficijenta pri ravnotežnom sadržaju vlage u pletenini

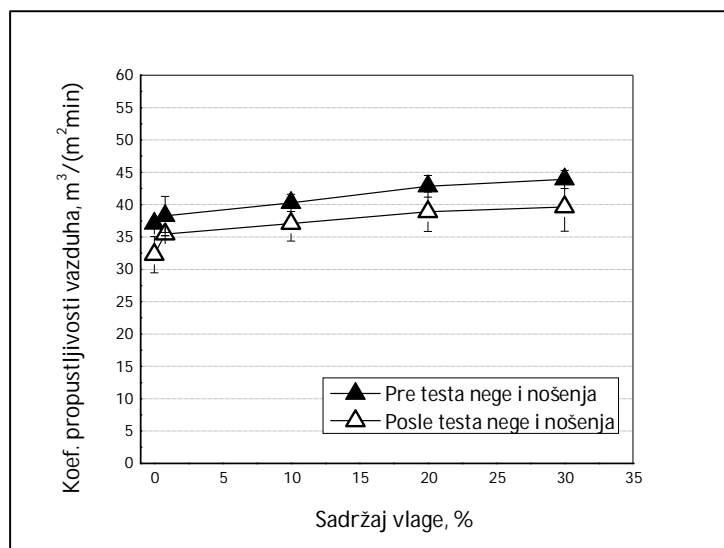
Konoplja	Sadržaj vlage (%)			
	0	10	20	30
	Procentualno odstupanje (%)			
Pre testa nege i nošenja	-27,1	-28,2	+4,2	+33,4
Posle testa nege i nošenja	-48,5	-28,4	+11,8	+22,4



Slika 7.29. SEM mikrofotografije segmenta konopljine pletenine pre (a) i posle (b) testa nege i nošenja

Rezultati koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) PAN pletenine pre i posle testa nege i nošenja, pri različitom sadržaju vlage prikazani su na slici 7.30. Eksperimentalno (gravimetrijski, na osnovu mase apsolutno suvog uzorka) je utvrđeno da je ravnotežni sadržaj vlage u PAN pletenini iznosio 0,8%. Sa porastom sadržaja vlage u PAN pletenini iznad ravnotežnog sadržaja, uočen je trend diskretnog porasta koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ). Međutim, kako ANOVA statistika nije potvrdila taj trend [ $F(2,57) < F_{crit}(3,48)$ ] za

$P(0,10) > \alpha(0,05)$ ], neizbežan je zaključak da sadržaj vode u PAN pletenini ne utiče na njenu sposobnost propuštanja vazduha. Uprkos hidrofobnoj prirodi poliakrilonitrilnih vlakana, i malom ravnotežnom sadržaju vlage PAN pletenine, kod apsolutno suvog uzorka pletenine došlo je do jačanja elektrostatičkih odbijajućih sila između vlakana (Cox, 2005). To je izazvalo „širenje“ PAN pređe, zatvaranje makropora u pletenini, i snižavanje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ). Imajući u vidu nizak afinitet akrilnih vlakana ka apsorpciji vlage (Fuzek, 1985), može se reći da se višak tečnosti (iznad 0,8%) u PAN pletenini nalazi u kapilarama PAN pređe (mikropore) ili kao slobodna tečnost u makroporama pletenine. Tečnost koja se nalazi u makroporama pletenine delimično ih zatvara, i time sužava prostor za tok vazduha. Sa druge strane, voda koja se nalazi između poliakrilonitrilnih vlakana u pređi, deluje na način opisan u slučaju konopljinine pletenine, pojačavajući kohezione sile između vlakana međusobno ih primićući. Pored toga, verujemo da deo makropora koji nije popunjen tečnošću biva obložen slojem ili slojevima molekula vode (fizisorpcija), čime se smanjuje otpor kretanju vazduha. Kao što se može videti, ovde se radi o pojavama koje deluju saglasno (jačanje kohezionih sila između vlakana, smanjenje otpora kretanju vazduha), ili ne (punjenje makropora vodom), što za rezultat daje statistički potvrđenu nezavisnost koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) od sadržaja vlage u PAN pletenini.



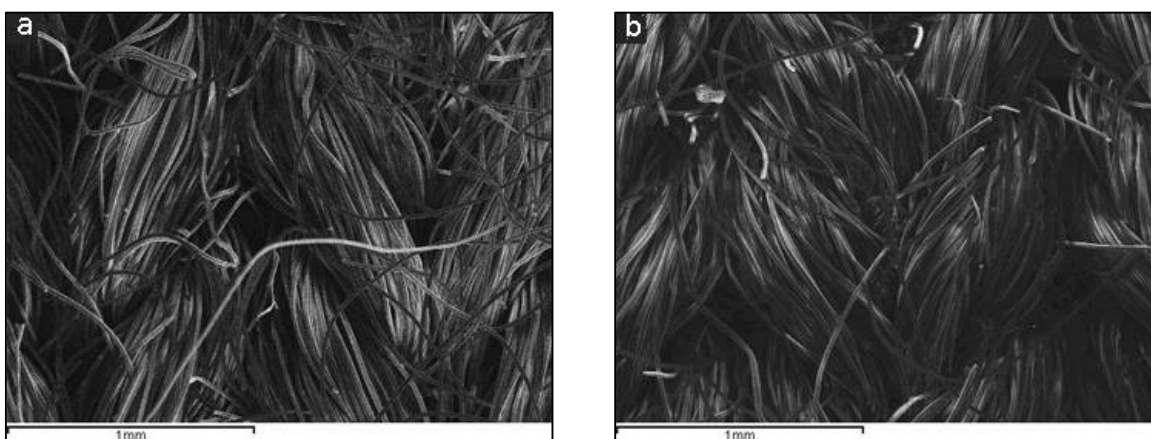
Slika 7.30. Koeficijent propustljivosti vazduha,  $A_P$  ( $m^3/(m^2min)$ ), kod PAN pletenine

Potpuno isti trend u pogledu relacije između sadržaja vlage u pletenini i koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) zapažen je kod PAN pletenine i posle testa nege i nošenja (slika 7.30). I u ovom slučaju, ANOVA statistikom je utvrđeno da sa promenom sadržaja vlage u pletenini ne dolazi do značajnih promena sposobnosti propuštanja vazduha [ $F(1,43) < F_{crit}(3,48)$  za  $P(0,29) > \alpha(0,05)$ ]. Kao što je analizirano u delu 7.1, strukturni parametri PAN pletenine gotovo da su ostali nepromenjeni tokom perioda nege i nošenja (tabela 7.2), ali su promene u geometriji PAN pređe (tabela 7.3) dovele do određenih promena geometrijskih parametara pletenine. Naime, došlo je u izvesnoj meri do smanjenja površinskog i zapreminskog modula petlje za 7,7% i 5,9%, redosledno (tabela 7.4), ili drugim rečima, došlo je do smanjenja veličine poprečnog preseka i zapremine makropora u PAN pletenini. Posledica toga su niže vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) PAN pletenine posle testa nege i nošenja (slika 7.30). Ipak, t-test uparenih uzoraka je pokazao da stepen povećanja vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha nije bio takav da bude statistički značajan (tabela 7.28). Izračunate vrednosti procentulanog odstupanja koeficijenta

propustljivosti vazduha PAN pletenine u odnosu na vrednosti koeficijenta ( $A_P$ ) pri ravnotežnom sadržaju vlage u pletenini pokazali su da vrednost koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) raste u nešto većoj meri sa porastom sadržaja vlage u PAN pletenini pre testa nege i nošenja (tabela 7.29). Međutim, to ipak nije dovelo do značajnog smanjenja sposobnosti propuštanja vazduha PAN pletenine posle perioda nege i nošenja. Slično kao i kod konopljine pletenine, smanjenje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) apsolutno suve PAN pletenine u odnosu na ravnotežni sadržaj vlage bilo je više izraženo kod pletenine posle perioda nege i nošenja, ali je to bilo u meri koja nije značajno smanjila vrednost koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) u poređenju sa PAN pleteninom pre testa nege i nošenja (tabela 7.29). Zbog toga, može se reći da intenzitet promene geometrije PAN pletenine tokom perioda nege i nošenja nije bio takav da izazove statistički značajno sniženje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ). Na SEM mikrofotografiji PAN pletenine posle testa nege i nošenja (slika 7.31b) može se uočiti izvesno zatvaranje makropora pletenine krajevima vlakana koja su se, prvobitno strčeli na površini pletenine (slika 7.31a), prilikom nege (pranja i peglanja) utisnula između segmenata pređe u petljama. Iako su ovi krajevi vlakana maskirali otvorene pore u određnoj meri, verovatno su se lako povijali pod dejstvom struje vazduha, zahvaljujući svojoj mekoći i elastičnosti, ne utičući značajno na otpor strujanju vazduha.

Tabela 7.28. t-test uparenih uzoraka - PAN (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)				
	0	0,8	10	20	30
P	0,118	0,456	0,348	0,324	0,351

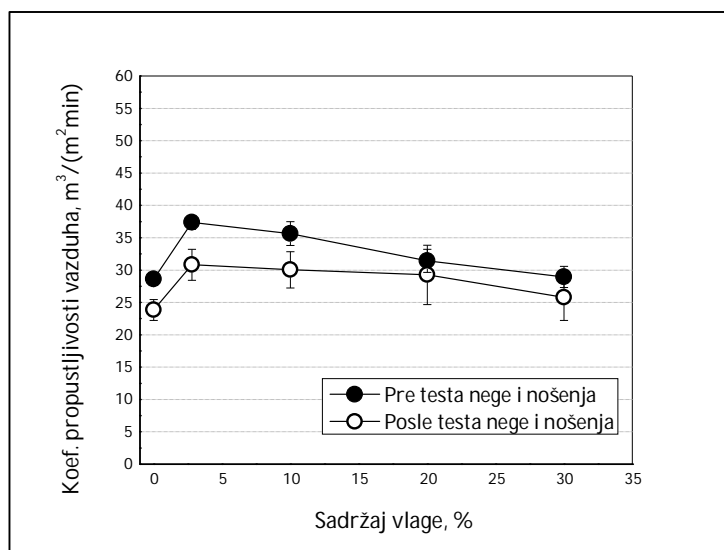


Slika 7.31. SEM mikrofotografije segmenta PAN pletenine pre (a) i posle (b) testa nege i nošenja (Novaković et al., 2020b)

Tabela 7.29. Procentualno odstupanje koeficijenta propustljivosti vazduha PAN pletenine u odnosu na vrednosti koeficijenta pri ravnotežnom sadržaju vlage u pletenini

PAN	Sadržaj vlage (%)			
	0	10	20	30
	Procentualno odstupanje (%)			
Pre testa nege i nošenja	-3,1	+5,3	+11,9	+14,7
Posle testa nege i nošenja	-11,8	+4,6	+9,7	+11,8

Na slici 7.32 prikazane su vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) konoplja/PAN pletenine pri različitim vrednostima sadržaja vlage u pletenini. Ravnotežna vlažnost ove pletenine iznosila je 2,8%. Kao i kod prethodne dve pletenine, došlo je do smanjenja koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) sa 0% vlažnosti. Međutim, za razliku od konopljne i PAN pletenine, kod konoplja/PAN pletenine uočen je trend snižavanja koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ), što je potvrđeno ANOVA statističkom analizom [ $F(6,91) > F_{crit}(3,48)$  za  $P(6,2E-03) < \alpha(0,05)$ ]. Ipak, Studentovim t-testom je utvrđeno da se u okviru ispitivanog intervala vlažnosti pletenine izdvajaju dva sektora sa sličnim vrednostima koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ). Prvi sektor je počev od ravnotežne vlažnosti (2,8%) do 10% vlažnosti materijala [ $P(0,46) > \alpha(0,05)$ ], i drugi deo ispitivanog intervala vlažnosti pletenine (20% do 30%) u okviru koga se koeficijent propustljivosti vazduha smanjio [ $P(0,36) > \alpha(0,05)$ ].



Slika 7.32. Koeficijent propustljivosti vazduha,  $A_P$  ( $m^3/(m^2min)$ ), konoplja/PAN pletenine

Ovakvo ponašanje konoplja/PAN pletenine u pogledu sposobnosti propuštanja vazduha može se objasniti činjenicom da se pletenina sastoji od dve pređe različitog afiniteta prema vodi. Imajući u vidu procenu da se oko 10% vode apsorbovalo vlaknima konoplje kod homogene konopljne pletenine, može se očekivati da konopljna komponenta u konoplja/PAN pletenini može da apsorbuje ne više od 5% vode. Zbog toga se pretpostavlja da se preostali deo tečnosti (od 10% vlage) zadržava u kapilarama konopljne i PAN pređe. Imajući u vidu manju gustinu pakovanja PAN vlakana u pređi u poređenju sa konopljinom pređom (tabela 7.3), kao i bubrenje konopljinih vlakana, može se očekivati da će se više vode naći u kapilarama PAN pređe. Jačanje kohezivnih sila između vlakana u PAN pređi verovatno nadomešta širenje konopljne pređe, i kao rezultat se dobija vrednost koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) bliska vrednosti koeficijenta pri ravnotežnom sadržaju vlage u pletenini. Sa daljim porastom sadržaja vlage, smanjuje se koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_P$ ), što upućuje na zaključak da tečnost delom okupira makropore u konoplja/PAN pletenini.

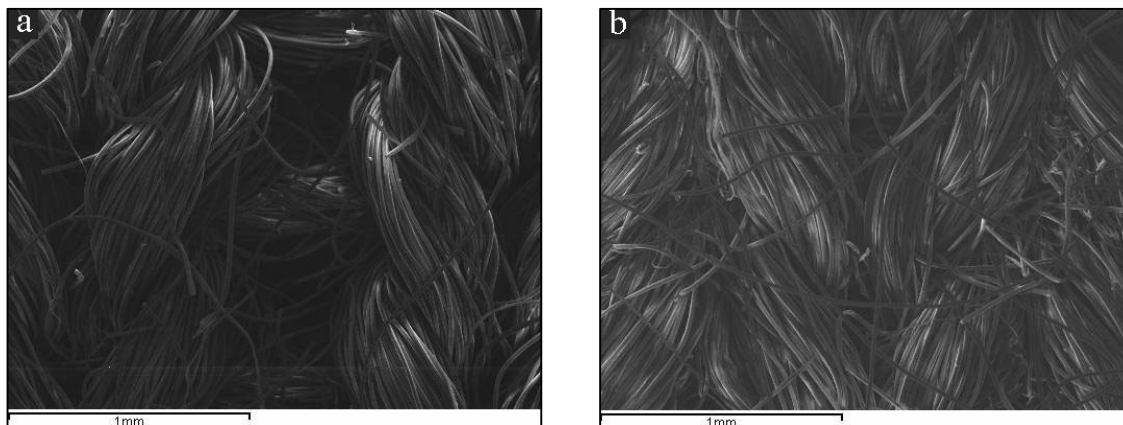
Dobijeni rezultati koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) konoplja/PAN pletenine posle perioda nege i nošenja ukazali su na neosetljivost ovog parametra na sadržaj vlage u pletenini. To je potvrđeno i ANOVA statistikom [ $F(0,79) < F_{crit}(3,48)$  za  $P(0,56) > \alpha(0,05)$ ]. Činjenica da se tokom nege i nošenja pletenine nije promenila sposobnost apsorbovanja vode vlaknima konoplje (nije se promenio broj grupa dostupnih za formiranje vodoničnih veza sa molekulima vode), ali se povećao broj tačaka preplitanja pređe u pletenini (povećala se



gustina petlji, tabela 7.2), navodi na zaključak da su makropore konoplja/PAN pletenine počele da se pune ranije, tj. pri manjem sadržaju vlage u odnosu na pleteninu pre testa nege i nošenja. t-testom uparenih uzoraka utvrđeno je da je do smanjenja koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) posle perioda nege i nošenja konoplja/PAN pletenine došlo samo pri ravnotežnom sadržaju vlage, dok se u okviru ispitivanog intervala povećanog sadržaja vlage, kao i bez prisustva vlage, koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) nije značajno promenio (tabela 7.30). To se može objasniti dužim segmentima pređa između dodirnih tačaka u pletenini pre testa nege i nošenja, kao što je ilustrovano SEM mikrofotografijom na slici 7.33a. Time je olakšano bubrenje konopljine komponente u ovim segmentima, čime se više doprinosi zatvaranju makropora u pletenini. SEM mikrofotografija konoplja/PAN pletenine (slika 7.33b) ilustruje dodatno maskiranje makropora krajevima vlaknima koji su tokom perioda nege (pranje i peglanje) i nošenja preorijentisani između segmenata pređe u petljama. Međutim, očigledno da ti zamršeni krajevi vlakana ne utiču značajno na tok vazduha savijajući se pod dejstvom pritiska (100 Pa). Ovo je potvrđeno i izračunatim vrednostima procentulnog odstupanja koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konoplja/PAN pletenine u odnosu na vrednosti koeficijenta pri ravnotežnom sadržaju vlage u pletenini. Veće procentualno odstupanje vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) uočeno je kod konoplja/PAN pletenine pre testa nege i nošenja (tabela 7.31).

Tabela 7.30. t-test uparenih uzoraka – konoplja/PAN (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

$\alpha = 0,05$	Sadržaj vlage (%)				
	0	0,28	10	20	30
P	0,206	0,034*	0,170	0,682	0,472

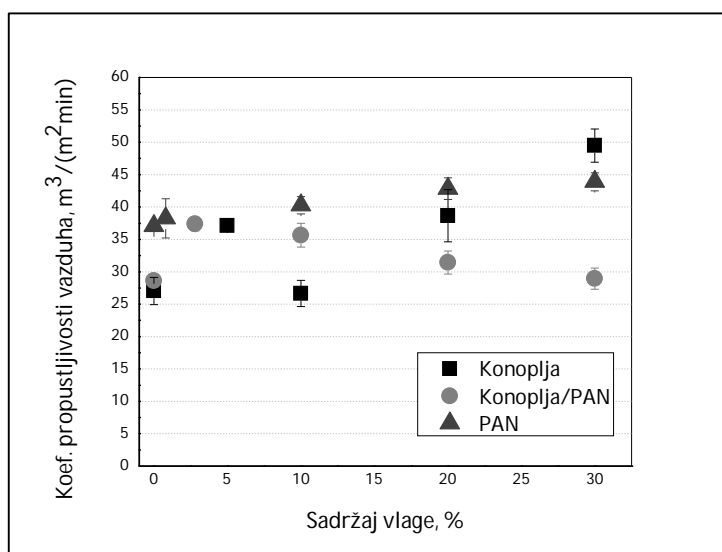


Slika 7.33. SEM mikrofotografije segmenta konoplja/PAN pletenine pre (a) i posle (b) testa nege i nošenja

Tabela 7.31. Procentualno odstupanje koeficijenta propustljivosti vazduha konoplja/PAN pletenine u odnosu na vrednosti koeficijenta pri ravnotežnom sadržaju vlage u pletenini

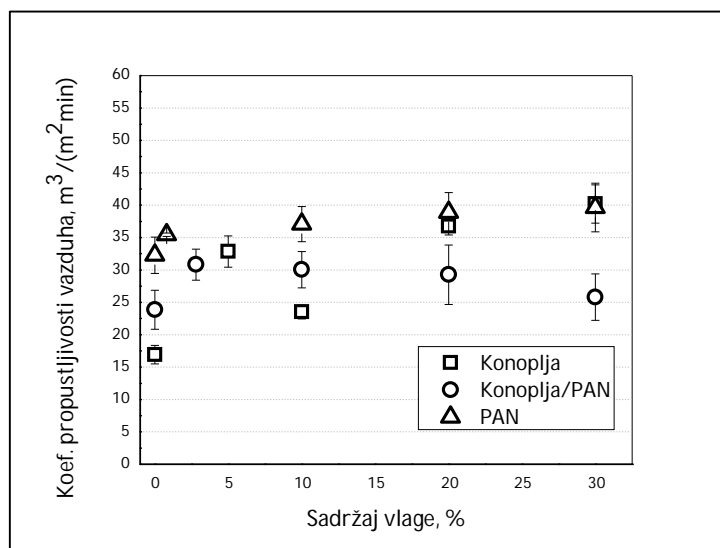
Konoplja/PAN	Sadržaj vlage (%)			
	0	10	20	30
	Procentualno odstupanje (%)			
Pre testa nege i nošenja	-23,4	-4,6	-15,9	-22,5
Posle testa nege i nošenja	-22,6	-2,5	-5,1	-16,3

Na slici 7.34 sumirani su rezultati koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) ispitivanih DL pletenina pre testa nege i nošenja. Polazeći od ovih rezultata, kao i od rezultata statističke analize datih u tabeli 7.32, može se konstatovati da se u slučaju ravnotežnog sadržaja vlage u pleteninama (4,9%, 2,8%, 0,8%, za konopljinu, konoplja/PAN i PAN pleteninu, redosledno), one odlikuju sličnom sposobnošću propuštanja vazduha (Novaković i sar., 2018). U odsustvu vlage u pleteninama slične vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) ispoljile su konopljina i konoplja/PAN pletenina, dok je PAN pletenina okarakterisana većom propustljivošću vazduha. Pri 10% -tnom sadržaju vlage u pleteninama, konopljina pletenina se odlikuje nižom propustljivošću vazduha u odnosu na druge dve pletenine sa približnim vrednostima koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ). Sa daljim porastom sadržaja vlage u pleteninama, taj odnos se menja tako da konopljina i PAN pletenine postaju propustljivije za vazduh, sa međusobno sličnim vrednostima koeficijenta propustljivosti ( $A_p$ ). Ovo sve upućuje na zaključak da je sposobnost propuštanja vazduha ispitivanih pletenina u dinamičkim uslovima bila uslovljena ne samo geometrijskim faktorima pletenine, već i sirovinskim sastavom koji sa svoje strane, uslovljava afinitet ka vodi.



Slika 7.34. Poređenje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) DL pletenina pre testa nege i nošenja

Posle perioda nege i nošenja, ispitivane DL pletenine su, pri ravnotežnom sadržaju vlage, ispoljile slične vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_p$ ), što je ilustrovano na slici 7.35, i potvrđeno statističkom analizom datom u tabeli 7.33. U odsustvu vlažnosti, koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konoplja/PAN pletenine predstavlja prosečnu vrednost koeficijenta propustljivosti vazduha homogenih pletenina (100% konopljine i 100% PAN). ANOVA statističkom analizom identifikovana je statistička značajnost uticaja vrste vlakana na sposobnost pletenina da propuštaju vazduh pri povećanju sadržaja vlage (10%). Pri tome, koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konopljine pletenine niža je u poređenju sa druge dve pletenine. Sa daljim porastom vlažnosti pletenina, taj odnos se menja tako da pri 20%-tnom sadržaju vlage u pleteninama, nema razlike u sposobnosti propuštanja vazduha. Međutim, u uslovima 30%-tnog sadržaja vlage, smanjuje se koeficijent propustljivosti vazduha ( $A_p$ ) konoplja/PAN pletenine, dok konopljina i PAN pletenina zadržavaju slične vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha (slika 7.35 i tabela 7.33).



Slika 7.35. Poređenje koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ) DL pletenina posle testa nege i nošenja

Tabela 7.32. Statistička analiza rezultata sposobnosti propuštanja vazduha za DL pletenine pre testa nege i nošenja (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	ANOVA, P	Studentov t-test, P			
		Konoplja	Konoplja /PAN	PAN	Konoplja
0	0,005*	0,53			
			0,002*		
				0,01*	
Ravnotežni	0,906	0,85			
			0,79		
				0,73	
10	0,004*	0,03*			
			0,11		
				0,005*	
20	0,065	0,18			
			0,01*		
				0,39	
30	0,001*	0,002*			
			0,001*		
				0,13	

Poređenjem rezultata prikazanih dijagramima na slikama 7.34 i 7.35, i njihove statističke analize (tabele 7.32 i 7.33), može se uočiti da se međusobni odnos ispitivanih pletenina u pogledu promene sposobnosti propuštanja vazduha sa promenom sadržaja vlage ne menja posle perioda nege i nošenja. Generalno, pri 10%-tnoj vlažnosti pletenina, konopljina pletenina nudi nižu propustljivost vazduha. Pri sadržaju vlage od 20%, nema razlike (ili gotovo da nema razlike) između pletenina u pogledu koeficijenta propustljivosti vazduha ( $A_P$ ), dok je u uslovima 30%-tne vlažnosti, prednost na strani homogenih pletenina (100% konoplja i 100% PAN). Dobijeni rezultati upućuju na zaključak da je ponašanje DL pletenina u pogledu sposobnosti propuštanja vazduha pri različitom sadržaju vlage u većoj meri

uslovljeno prirodom (hidrofilnost ili hidrofobnost) vlakana od kojih je izrađena, nego strukturnim i geometrijskim parametrima pletenine.

Tabela 7.33. Statistička analiza rezultata sposobnosti propuštanja vazduha za DL pletenine posle testa nege i nošenja (\*statistički značajno za  $P < \alpha$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Sadržaj vlage (%)	ANOVA, P	Studentov t-test, P			
		Konoplja	Konoplja/PAN	PAN	Konoplja
0	0,02*	0,11			
			0,15		
				0,005*	
Ravnotežni	0,32	0,58			
			0,19		
				0,39	
10	0,02*	0,04*			
			0,19		
				0,009*	
20	0,17	0,19			
			0,15		
				0,55	
30	0,04*	0,04*			
			0,03*		
				0,92	

## 8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Konstruktivni parametri DL pletenina ispitivanih u okviru ovog istraživanja bili su u određenoj meri uslovljeni deformacionim svojstvima konopljinih i poliakrilnih (PAN) vlakana, koja su se odrazila na geometriju konopljine i PAN pređe uprkos istim nominalnim karakteristikama (finoća, upredenost). Naime, ove pređe su se međusobno razlikovale po gustini pakovanja vlakana, ali i u pogledu geometrije površine. Otuda su kod DL pletenina izrađenih od ovih pređa uočene izvesne razlike konstrukcionih parametara, koje su se zadržale i posle mokre relaksacije pletenina. Dalje promene strukturnih i geometrijskih parametara DL pletenina uočene su i posle sprovedenog testa nege i nošenja, koji je podrazumevao 10 ciklusa nege (pranje i peglanje) i nošenja odevnog predmeta oblikovanog od ovih pletenina. Modifikovanje ovih parametara pletenina bilo je izraženo u meri koju su definisali međusobno suprotstavljeni procesi kojima su pletenine bile izložene tokom perioda nege i nošenja. Sa jedne strane, to je konsolidacija strukture pletenine koja je uslovljena afinitetom vlakana ka upijanju vode i pokretljivošću strukturnih elemenata pletenine tokom pranja, a nasuprot tome je biaksijalno istežanje izazvano deformacionim silama tokom nošenja. Kada se radi o osnovnim konstrukcionim karakteristikama DL pletenina, značajne promene posle testa nege i nošenja petrole su pletenine na bazi konoplje, što je direktna posledica hidrofilitnosti ovog vlakna, odnosno njegove sklonosti ka bubrenju usled apsorpcije vode. Tako je kod konopljine i konoplja/PAN pletenine došlo do znatnog povećanja gustine petlji, i kao posledica toga, do povećanja površinske mase ovih pletenina. Interakcija pomenutih procesa tokom perioda nege i nošenja pletenina rezultovala je promenom geometrijskih pokazatelja u većoj ili manjoj meri kod svih pletenina. Kao rezultat promene konstrukcionih i geometrijskih pokazatelja DL pletenina tokom perioda nege i nošenja neminovno je došlo do preraspodele pora (makro- i mikropora) u pleteninama. Imajući u vidu činjenicu da upravo prisustvo sistema pora u tekstilnom materijalu bitno određuje njegovu sposobnost da prenosi energiju i masu, u okviru ovog istraživanja pristupilo se ispitivanju svojstava toplotnog komfora DL pletenina u dinamičkim uslovima pre, ali i posle perioda nege i nošenja.

Toplotno ponašanje ispitivanih DL pletenina u dinamičkim (neravnotežnim) uslovima ocenjeno je parametrima toplotna apsorptivnost i toplotna difuzivnost, koji su izračunati na osnovu toplotne provodljivosti i specifičnog toplotnog kapaciteta pletenina. Mokro relaksirana konopljina pletenina odlikovala se većim specifičnim toplotnim kapacitetom i većim zapreminskim toplotnim kapacitetom u poređenju sa PAN pleteninom. Posle testa nege i nošenja došlo je do snižavanja vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta pletenina, posebno onih na bazi konoplje. Posledica toga su približne vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta konopljine i PAN pletenine, ali je zbog svoje veće gustine konopljina pletenina i dalje okarakterisana većim zapreminskim toplotnim kapacitetom. Provođenje toplote kroz ispitivane DL pletenine u neravnotežnim uslovima definisano je parametrom toplotna apsorptivnost, koji je omogućio ocenu toplo-hladno osećaja u trenutku kontakta materijala i kože. Pre testa nošenja, najvećom toplotnom apsorptivnošću, odnosno najhladnijim opipom okarakterisana je pletenina od konoplje, što je posledica njenog najvećeg zapreminskog toplotnog kapaciteta i najmanje toplotne provodljivosti. Manje hladnim opipom odlikuje se konoplja/PAN pletenina, dok je PAN pletenina okarakterisana najmanjom toplotnom apsorptivnošću, odnosno najtoplijim opipom, kao posledica najveće toplotne provodljivosti i najmanjeg zapreminskog toplotnog kapaciteta. Redosled pletenina prema vrednosti toplotne apsorptivnosti posle perioda nege i nošenja ostaje nepromenjen, jer je kod pletenina na bazi konoplje došlo do porasta toplotne apsorptivnosti, za razliku od PAN pletenine čija je toplotna apsorptivnost smanjena.

Brzina uspostavljanja ravnotežnog prenosa toplote kroz DL pletenine ocenjena je parametrom toplotna difuzivnost. Pre testa nege i nošenja, prednost je na strani PAN pletenine koja je okarakterisana najvećom vrednošću toplotne difuzivnosti, praćena

konoplja/PAN i pleteninom od konoplje. Najveća brzina uspostavljanja toplotne ravnoteže u PAN pletenini omogućena je njenom najvećom toplotnom provodljivošću i najmanjim zapremninskim toplotnim kapacitetom. Posle perioda nege i nošenja dolazi do promene redosleda pletenina prema vrednostima toplotne difuzivnosti. Usled značajnog povećanja toplotne provodljivosti posle testa nege i nošenja, pletenina od konoplje preuzima primat od PAN pletenine. Uprkos povećanju toplotne difuzivnosti konoplja/PAN posle testa nege i nošenja, ova pletenina je ipak okarakterisana najnižom vrednošću ovog parametra u poređenju sa ostale dve pletenine. To se pripisuje njenom najvećem specifičnom toplotnom kapacitetu posle perioda nege i nošenja. Ipak, treba imati u vidu da toplotna difuzivnost konoplja/PAN pletenine nadmašuje vrednost ovog parametra konopljin pletenine pre testa nege i nošenja. Zbog toga se generalno može reći da je konoplja/PAN pletenina zadržala „konopljin karakter“ posle perioda nege i nošenja.

Sposobnost lateralnog upravljanja tečnošću DL pletenina pri različitom sadržaju vlage ocenjena je parametrima - sposobnost prenosa vode i sposobnost zadržavanja vode. Potvrđen je pozitivan uticaj sadržaja vlage u konopljinoj pletenini na sposobnost prenosa tečnosti. Kako se posle perioda nege i nošenja gubi efekat sadržaja vlage u konopljinoj pletenini na sposobnost prenosa tečnosti, sledi da je korelacija sadržaj vlage–prenos tečnosti konopljin pletenine prevashodno bila uslovljena geometrijom, odnosno makroporoznošću konopljin pletenine. Sposobnost prenosa vode konoplja/PAN i PAN pletenina nije uslovljena sadržajem vlage u njima, ni pre ni posle perioda nege i nošenja. Posle perioda nege i nošenja, došlo je do povećanja sposobnosti prenosa tečnosti pletenina izrađenih na bazi hidrofilnih vlakana (konoplja i konoplja/PAN) u određenim intervalima sadržaja vlage. Generalno, relaksacioni procesi u pleteninama tokom perioda nege i nošenja nisu uticali negativno na njihovu sposobnost da prenose tečnost.

Iako je kod mokro relaksiranih pletenina u ravnotežnim uslovima sadržaja vlage uočena niža sposobnost prenosa tečnosti konopljin pletenine u poređenju sa PAN pleteninom, zahvaljujući afinitetu konopljinih vlakana ka apsorpciji vode, u uslovima većeg sadržaja vlage u pletenini sposobnost prenosa tečnosti konopljin pletenine izjednačava se sa PAN pleteninom. Šta više, posle perioda nege i nošenja, primat u pogledu sposobnosti prenosa tečnosti u uslovima većeg sadržaja vlage preuzima pletenina od konoplje. Pored toga, poseban praktični značaj sa aspekta dinamičkog toplotnog komfora predstavlja činjenica da je u uslovima većeg sadržaja vlage konoplja/PAN pletenina ispoljila istu sposobnost prenosa tečnosti kao i konopljin pletenina.

Rezultati su pokazali da sposobnost zadržavanja vode pletenina koje sadrže hidrofilna vlakna (konoplja i konoplja/PAN) nije uslovljena količinom vlage u njima, kako pre, tako ni posle testa nege i nošenja. Sposobnost zadržavanja vode PAN pletenine (hidrofobno vlakno) opada u uslovima iznad 20% sadržaja vlage pre i posle perioda nege i nošenja. Geometrijski parametri konopljin pletenine, pre svega veličina makropora, uslovlili su manju sposobnost zadržavanja vode u poređenju sa ostale dve pletenine. Međutim, relaksacioni procesi u konopljinoj pletenini tokom perioda nege i nošenja doveli su do povećanja sposobnosti zadržavanja vode u pletenini od konoplje pa se ona izjednačava sa konoplja/PAN i PAN pleteninama čije su sposobnosti zadržavanja vode ostale nepromenjene posle testa nege i nošenja.

Ispitivanjem sposobnosti jednosmernog upravljanja tečnošću ocenjena je brzina kvašenja pletenina u pravcu nizova i u pravcu redova. Ispitivane pletenine su okarakterisane parametrima - indeks kapilarnog kvašenja i maksimalna visina kvašenja. Sa aspekta toplotnog komfora, prednost imaju pletenine sa većim vrednostima ovih parametara. Karakteristična usmerena (horizontalna) orijentisanost pređe u kuliranim pleteninama uzrokovala je veći indeks kapilarosti, odnosno veću brzinu kvašenja konoplja i konoplja/PAN pletenina u pravcu redova. Sa strukturnim promenama pletenina na bazi hidrofilnih vlakana (konoplja i konoplja/PAN), pre svega sa povećanjem gustine petlji prilikom nege i nošenja, došlo je do

povećanja dodirne površine između susednih petlji u nizovima, a to je izazvalo izjednačavanje brzine kapilarnog kvašenja u pravcu nizova i u pravcu redova konopljinje pletenine, kao i približavanje vrednosti brzine kapilarnog kvašenja u oba pravca kod konoplja/PAN pletenine. Pored očekivane veće brzine kapilarnog kvašenja i maksimalne visine kvašenja PAN pletenine u poređenju sa druge dve pletenine, ona se odlikovala sličnim vrednostima indeksa kapilarnosti i maksimalne visine kvašenja u oba pravca. Najnižom vrednošću ovih parametara okarakterisana je pletenina od konoplje u oba pravca. Iako je PAN pletenina u određenoj meri relaksirana posle testa nege i nošenja, parametri jednosmernog kvašenja nisu značajno promenjeni. Relaksacioni procesi u pleteninama izrađenim od hidrofilnih ili delom od hidrofilnih vlakana (konoplja i konoplja/PAN) tokom nege i nošenja odevnih predmeta imali su pozitivan efekat na sposobnost jednosmernog upravljanja tečnošću. Ipak, zadržan je isti redosled pletenina u pogledu brzine i maksimalne visine kvašenja i posle perioda nege i nošenja u pravcu nizova, dok se u pravcu redova brzina i maksimalna visina kvašenja konoplja/PAN pletenine približavaju vrednostima ovih parametara PAN pletenine. Ovo poboljšanje sposobnosti konoplja/PAN pletenine da upravlja tečnošću makar u jednom pravcu, uz adekvatnu sposobnost lateralnog upravljanja tečnošću (sposobnost prenosa odnosno, zadržavanje tečnosti) tokom njene eksploatacije, suštinski predstavlja unapređenje upotrebnih performansi ove pletenine.

Generalno, može se reći da je reorganizacija sistema pora u pleteninama tokom perioda nege i nošenja dovela do poboljšanja svojstava jednosmernog upravljanja tečnošću pletenina na bazi konoplje.

Pri ravnotežnom sadržaju vlage, ispitivane DL pletenine se odlikuju približnom sposobnošću propuštanja vazduha, kako pre, tako i posle perioda nege i nošenja pletenina. Međutim, u uslovima neravnotežnog sadržaja vlage u pleteninama, njihova sposobnost propuštanja vazduha uslovljena je njihovim sirovinskim sastavom, ili preciznije, afinitetom upotrebljenih vlakana prema apsorpciji vode (hidrofilnost ili hidrofobnost). Sposobnost propuštanja vazduha pletenine izrađene od hidrofobnog vlakna (PAN) nije uslovljena sadržajem vlage, kako pre, tako ni posle testa nege i nošenja. Pletenine izrađene od hidrofilnih vlakana, ili delom od hidrofilnih vlakana (konoplja i konoplja/PAN) ispoljile su osetljivost koeficijenta propustljivosti vazduha na promenu sadržaja vlage u pletenini. Pri tome, kod konopljinje pletenine je došlo do povećanja vrednosti koeficijenta propustljivosti vazduha sa porastom sadržaja vlage u njoj. Isti trend je uočen i posle perioda nege i nošenja. Povećanje sadržaja vlage u konoplja/PAN pletenini dovelo je do snižavanja sposobnosti propuštanja vazduha, ali samo kod mokro relaksiranih uzoraka (pre testa nege i nošenja). Količina vlage u pleteninama (iznad ravnotežne vlažnosti) uslovlila je i njihov međusobni položaj u pogledu sposobnosti propuštanja vazduha. Pri 10 %-tnoj vlažnosti pletenina, najmanju propustljivost vazduha ispoljila je konopljinna pletenina. Sa povećanjem vlažnosti (20%) približavaju se vrednosti koeficijenta propustljivosti svih pletenina, da bi pri 30%-tnom sadržaju vlage prednost bila na strani pletenina homogenog sirovinskog sastava (konoplja, PAN). Isti trend je uočen i posle perioda nege i nošenja oblikovanih pletenina.

Posle testa nege i nošenja, u uslovima različitog sadržaja vlage u pleteninama, došlo je do pada sposobnosti propuštanja vazduha samo kod pletenine od konoplje. S obzirom da su se geometrijski parametri konoplja/PAN pletenine promenili u većoj meri u odnosu na konopljinu pleteninu tokom perioda nege i nošenja, sledi zaključak da je kod pletenina koje sadrže hidrofilna vlakna sposobnost propuštanja vazduha u većoj meri bila uslovljena količinom vlage koju sadrže, nego intenzitetom strukturnih promena tokom perioda nege i nošenja. Ipak, praktičan značaj ima činjenica da kod konoplja/PAN pletenine posle testa nege i nošenja nije došlo do smanjenja sposobnosti propuštanja vazduha sa porastom sadržaja vlage u njoj.

Generalno se može zaključiti da efekat prirode vlakana (hidrofilnost ili hidrofobnost) dominira u regulisanju sposobnosti propuštanja vazduha ispitivanih DL pletenina sa

promenom sadržaja vlage u njima. Tokom upotrebe odevnog predmeta može da dođe do variranja sposobnosti propuštanja vazduha pletenine zavisno od sirovinskog sastava i količine vlage u njoj.



## 9. ZAKLJUČAK

Polazeći od rezultata dobijenih u okviru ovog istraživanja, i na osnovu diskusije i zaključnih razmatranja, mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Uočene promene strukturnih i geometrijskih parametara DL pletenina posle perioda nege i nošenja bile su uslovljene međusobno suprotstavljenim procesima - skupljanje pletenine usled pranja nasuprot njenom ponovnom rastezanju tokom nošenja. Rezultat ove kompleksne interakcije je rekonfiguracija petlji u pletenini, odnosno modifikacija geometrije pletenine, kao i morfološke promene u vlaknima. Hidrofilna priroda vlakana konoplje prouzrokovala je veće strukturne i geometrijske promene konopljinine i konoplja/PAN pletenine. Kod konoplja/PAN pletenine uočene su najveće promene geometrijskih parametara, što je verovatno posledica činjenice da je ova pletenina izrađena kombinovanjem dve pređe koje su se odlikovale različitim sirovinskim sastavom i specifičnim internim svojstvima. Modifikovanje geometrijskih pokazatelja 100 % konoplje i konoplja/PAN pletenine u toku perioda nege i nošenja, ili je pozitivno uticalo, ili nije imalo negativne efekte na ispitivana svojstva toplotnog komfora pletenina u dinamičkim uslovima.
2. Toplotna svojstva koja definišu ponašanje pletenina u uslovima neravnotežne razmene toplote uslovljena su vrstom vlakana, odnosno njihovim afinitetom ka upijanju vode i toplotnim kapacitetom. Međutim, pokazalo se da uticaj vlakana može biti maskiran efektima strukture i geometrije pletenina. Zbog toga, iako su morfološke promene u vlaknima dovele do snižavanja specifičnog toplotnog kapaciteta posle perioda nege i nošenja, to nije negativno uticalo na toplotnu apsorptivnost i toplotnu difuzivnost pletenina na bazi konopljinih vlakana.
3. Svojstva upravljanja tečnošću ispitivanih DL pletenina uslovljena su geometrijskom konfiguracijom kompleksne mreže pora (makro- i mikropora) u njima, u ispitivanom intervalu sadržaja vlage, bez obzira na sirovinski sastav pletenine. Međutim, modifikacija geometrije pora u pleteninama određena je kompleksnom interakcijom vlakana i vode. Sadržaj vlage u pletenini uslovio je sposobnost zadržavanja vode samo pletenine izrađene od hidrofobnih vlakana. Povećanje sposobnosti zadržavanja vode posle perioda nege i nošenja ispoljila je samo 100% konopljinina pletenina. Takođe, pletenine na bazi hidrofilnih vlakana ispoljile su povećanu sposobnost prenosa tečnosti u delu ispitivanog intervala sadržaja vlage. Relaksacioni procesi u pleteninama tokom nege i nošenja, koji su doveli do preraspodele pora u njima, imali su pozitivan efekat na sposobnost jednosmernog kvašenja pletenina na bazi hidrofilnih vlakana konoplje.
4. Iako je sposobnost propuštanja vazduha ispitivanih DL pletenina u uslovima neravnotežnog sadržaja vlage bila uslovljena geometrijskim faktorima pletenine, pokazalo se da vlakna sa svojim afinitetom prema apsorpciji vode imaju dominantan efekat na propustljivost vazduha u dinamičkim uslovima. Posledica toga je da je i posle perioda nege i nošenja, propustljivost vazduha pletenina na bazi hidrofilnih vlakana prvenstveno definisana sadržajem vlage, pa tek onda intenzitetom strukturnih promena u pleteninama.
5. Praćenjem svojstava konoplja/PAN pletenine koja definišu toplotni komfor u dinamičkim uslovima, ustanovljen je pozitivan efekat mešanja hidrofilnih i hidrofobnih vlakana na toplotna svojstva, svojstva upravljanja tečnošću i propustljivost vazduha u dinamičkim uslovima. Činjenica da je kombinovanje različitih sirovina (konoplja i poliakril) izvršeno u fazi izrade pletenina uz dubliranje homogenih pređa (konopljinine i PAN) predstavlja potvrdu ovog postupka kao efikasne metode projektovanja tekstilnih materijala sa dirigovanim svojstvima korišćenjem ne samo specifičnih svojstava

vlakana već i specifičnih internih svojstava komponentnih pređa. Pored toga, ova metoda nudi trikotažnim kompanijama mogućnost projektovanja sopstvenih „mešavina“ jednostavnim izborom pređa (odgovarajućeg sirovinskog sastava i finoće) dostupnih na tržištu.

6. Predstavljeni rezultati nude određene smernice za projektovanje DL pletenina takvih da, pored zadovoljavajućeg toplotnog komfora, mogu da obezbede „brz odgovor“ na impulse iz neposrednog čovekovog okruženja kao što su promena temperature, sadržaj vlage i sl. Imajući u vidu jeftiniju i produktivniju proizvodnju sintetičkih vlakana u poređenju sa procesom prerade prirodnih vlakana, dobijanje tekstilnog materijala, proizvedenog od mešavine konoplje i PAN vlakana, sa zadovoljavajućim parametrima toplotnog komfora u dinamičkim uslovima predstavlja još jedan praktičan značaj ovog rada. Dalja istraživanja išla bi u pravcu proširenja eksperimentalnog materijala u smislu uključivanja drugih sirovina, proširenja intervala osnovnih parametara dizajna pređa, kao i proširenja varijeteta strukturnih parametara pletenina.

## LITERATURA

Achour, N.S., Hamdaoui, M., Nasrallah, S.B., 2015, Wicking and evaporation of liquids in knitted fabrics: Analytic solution of capillary rise restrained by gravity and evaporation, *International Journal of Mechanical, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9(7), 1387-1392.

Afzal, A., Sheraz A., Abher R., Faheem A., Iftikhar, F., Nawab, Y., 2017, Influence of fabric parameters on thermal comfort performance of double layer knitted interlock fabrics, *AUTEX Research Journal*, 17(1), 20-26.

Allan Heap, S., Greenwood, P.F., Leah, R.D., Eaton, J.T., Stevens, J.C., Keher, P., 1985, Prediction of finished weight and shrinkage of cotton knits – the Starfish project, Part II: Shrinkage and the reference state, *Textile Research Journal*, 55(4), 211-222.

Almoughni, H., Gong, H., 2015, Capillary flow of liquid water through yarns: a theoretical model, *Textile Research Journal*, 85(7), 722-732.

Annand, S.C., Brown, K.S.M., Higgins, L.G., Holmes, D.A., Hall, M.E., Conrad, D., 2002, Effect of laundering on the dimensional stability and distortion of knitted fabrics, *AUTEX Research Journal*, 2(2), 85-100.

Arens, E., Zhang, H., 2006, The skin's role in human thermoregulation and comfort, in: Pan, N., Gibson, P. (Ed.), *Thermal and moisture transport in fibrous materials*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 560-597.

Atmaca, I., Yigit, A., 2006, Predicting the effect of relative humidity on skin temperature and skin wettedness, *Journal of Thermal Biology*, 31(5), 442-452.

Babu, B.S., Pandurangan S., Mani S., 2015, Effect of yarn linear density on moisture management characteristics of cotton/polypropylene double layer knitted fabrics, *Industria Textila*, 66(3), 123-168.

Bajzik, V., Hes, L., Dolezal, I., 2016, Changes in thermal comfort properties of sports wear and underwear due to their wetting, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 41(2), 161-166.

Baltazar-y-Jimenez, A., Bismarck A., 2007, Wetting behaviour, moisture up-take and electrokinetic properties of lignocellulosic fibres, *Cellulose*, 14(2), 115-127.

Bedek, G., Salaun, F., Martinkovska, Z., Devaux, E., Dupont, D., 2011, Evaluation of thermal and moisture management properties on knitted fabrics and comparison with a physiological model in warm conditions, *Applied Ergonomics*, 1-9.

Benltoufa, S., Fayala, F., Cheikhrouhou, M., Nasrallah, S.B., 2007, Porosity determination of jersey structure, *AUTEX Research Journal*, 7(1), 63-69.

Benltoufa, S., Fayala, F., Nasrallah, S.B., 2008, Capillary rise in macro and micro pores of jersey knitting structure, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 3(3), 47-54.

Birrfelder, P., Dorrestijn, M., Roth, C., Rossi, R.M., 2013, Effect of fiber count and knit structure on intra- and inter-yarn transport of liquid water, *Textile Research Journal*, 83(14), 1477-1488.

Boguslawska, B.M., Hes, L., 2013, Effective water vapour permeability of wet wool fabric and blended fabrics, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 21, 1(97), 67-71.

Booth, J.E., 1968, *Principles of Textile Testing*, Butterworths and Co, Publishers Ltd, London.

Brasquet, C., Le Cloriec, P., 2000, Pressure drop through textile fabrics-experimental data modelling using classical models and neural networks, *Chemical Engineering Science*, 55(15), 2767-2778.

Burton, S.C., 2004, *Critical evaluation of wicking in performance fabrics*, Diss., Georgia Institute of Technology.

Cao, H., Branson, D.H., Peksoz, S., Nam, J., Farr, C.A., 2006, Fabric selection for a liquid cooling garment, *Textile Research Journal*, 76, 587-595.

Chatterjee, A., Singh P., 2014, Studies on wicking behaviour of polyester fabric, *Journal of Textiles*, 1-11.

Chen, Q., Fan, J., Sun, C., 2015, The comfort evaluation of weft knitted plant structured fabrics and garment, I: Objective evaluation of weft knitted plant structured fabrics, *Fibers and Polymers*, 16(8), 1788-1795.

Chen, X., Kornev, K.G., Kamath, Y.K., Neimark, A.V., 2001, The wicking kinetics of liquid droplets into yarns, *Textile Research Journal*, 71(10), 862-869.

Chen, X., Vroman, P., Lewandowski, M., Penvuelz, A., Zhang, Y., 2009, Study of the influence of fiber diameter and fiber blending on liquid absorption inside nonwoven structures, *Textile Research Journal*, 79(15), 1364-1370.

Chunhong, Z., Masayuki, T., 2015, Effects of hydrophobic yarns on liquid migration in woven fabrics, *Textile Research Journal*, 85(5), 479-486.

Cimilli, S., Nergis, B.U., Candan, C., Ozdemir, M., 2010, A comparative study of some comfort-related properties of socks of different fiber types, *Textile Research Journal*, 80 (10), 948-957.

Cox, R., 2005. Acrylic fibres, in: Mc Intyre, J.E. (Ed.), *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp.167-234.

Craig, A.D., 2003, Pain mechanisms: labeled lines versus convergence in central processing, *Annual Review of Neuroscience*, 26, 1-30.

Crow, R.M., Osczevski, R.J., 1993, The effects of fibre and fabric properties on fabric drying times, (No.DREO-1182), Defence Research Establishment Ottawa (Ontario).

Das, A., Ishtiaque, S.M., 2004, Comfort characteristics of fabrics containing twist-less and hollow fibrous assemblies in weft, *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 3(4), 1-7.

Das B., Das A., Kothari, V.K., Fangueiro, R., De Araujo, M., 2006, Study of moisture transmission through fabrics for comfort optimisation: the case of work wear for use in tropical climatic conditions, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> AUTEX Conference*, June 11-12, Raleigh, NC, USA.

Das, A., Kothari, V.K., Sadachar, A., 2007a, Comfort characteristics of fabrics made of compact yarns, *Fibers and Polymers*, 8(1), 116-122.

- Das, B., Das, A., Kothari, V.K., Fanguiero, R., Araujo, M., 2007b, Moisture transmission through textiles, Part I: Processes involved in moisture transmission and the factors at play, *AUTEX Research Journal*, 7(2), 100-110.
- Das, B., Das, A., Kothari, V.K., Fanguiero, R., Araujo, M., 2007c, Moisture transmission through textiles, Part II: Evaluation Methods and Mathematical Modelling, *AUTEX Research Journal*, 7(3), 194-216.
- Das, B., Das, A., Kothari, V.K., Fanguiero, R., Araujo, M.D., 2008, Effect of fibre diameter and cross-sectional shape on moisture transmission through fabrics, *Fibers and Polymers*, 9(2), 225-231.
- Das, B., Das, A., Kothari, V., Fanguiero, R., Araujo, M.D., 2009a, Moisture flow through blended fabrics-effect of hydrophilicity, *Journal of Engineered Fabrics & Fibers, Fiber and Textile Research in India*, 4(4), 20-28.
- Das, B., Das, A., Kothari, V.K., Fanguiero, R., Araujo, M.D., 2009b, Studies on moisture transmission properties of PV-blended fabrics, *The Journal of the Textile Institute*, 100(7), 588-597.
- De Gennes, P.G., 1985, Wetting: statics and dynamics, *Reviews of Modern Physics*, 57(3), 827-863.
- Demiryurek, O., Uysalturk, D., 2013, Thermal comfort properties of Viloft/cotton and Viloft/polyester blended knitted fabrics, *Textile Research Journal*, 83(16), 1740-1753.
- Dent, R.W., 2001, Transient comfort phenomena due to sweating, *Textile Research Journal*, 71(9), 796-806.
- Doakhan, S., Hosseini, R.S., Gharah, A.A., Mortazavi, S.M., 2007, Capillary rise in core-spun yarn, *Iranian Polymer Journal*, 16 (6), 397-408.
- Đorđević, B., Valent, V., Šerbanović S., 1997, *Termodinamika sa termotehnikom*, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.
- Dubrovski, P.D., Brezočnik, M., 2012, The usage of genetic methods for prediction of fabric porosity, *Genetic Programming: New Approaches and Successful Applications*, 173-195.
- Erdumlu N., Saricam. C., 2017, Investigating the effect of some fabric parameters on the thermal comfort properties of flat knitted acrylic fabrics for winter wear, *Textile Research Journal*, 87(11), 1349-1359.
- Fan, J., 2009, Physiological comfort of fabrics and garments, in: Fan, J., Hunter, L. (Ed.) *Engineering apparel fabrics and garments*, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, pp. 201-250.
- Fanguiero, R., Fligueiras, A., Soutinho, F., Meidi, X., 2010, Wicking behavior and drying capability of functional knitted fabrics, *Textile Research Journal*, 80(15), 1522-1530.
- Fanguiero, R., Goncalves, P., Soutinho, F., Freitas, C., 2009, Moisture management performance of functional yarns based on wool fibres, *Indian Journal of Fibre, Textile Research*, 34(4), 315-320.

- Fohr, J.P., Couton, D., Treguier, G., 2002, Dynamic heat and water transfer through layered fabrics, *Textile Research Journal*, 72(1), 1-12.
- Frydrych, I., Dziworska, G., Bilska, J., 2002, Comparative analysis of the thermal insulation properties of fabrics made of natural and man-made cellulose fibres, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 10(4), 40-44.
- Fuzek, J.F., 1985, Absorption and desorption of water by some common fibers, *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 24(1), 140-144.
- Gat, A.D., Vahdani, A., Navaz, H., Nowakowski, A., Gharib, M., 2013, Asymmetric wicking and reduced evaporation time of droplets penetrating a thin double-layered porous material, *Applied Physics Letters*, 103(13), 134104.
- Ghali, K., Jones, B., Tracy, J., 1994, Experimental techniques for measuring parameters describing wetting and wicking in fabrics, *Textile Research Journal*, 64(2), 106-111.
- Goodings A.C., 1964, Air flow through textile fabrics, *Textile Research Journal*, 34(8), 713-724.
- Gore, S.E., Laing, R.M., Wilson, C.A., Niven, B.E., 2006, Standardizing a pre-treatment cleaning procedure and effects of application on apparel fabrics, *Textile Research Journal*, 76(6), 58-64.
- Gun, A.D., 2011, Dimensional, physical and thermal comfort properties of plain knitted fabrics made from modal viscose yarns having microfibers and conventional fibers, *Fibers and Polymers*, 12 (2), 258-267.
- Gunesoglu, S., MERIC, B., 2006, Heat and mass transfer properties of 2-yaran fleece knitted fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 31, 415-421.
- Hall J.E., 2011, Body Temperature Regulation, and Fever (chapter 73), in Guyton and Hall *Textbook of Medical Physiology*, Elsevier Inc.
- Hamdaoui, M., Nasrallah, S.B., 2015, Capillary rise kinetics on woven fabrics-Experimental and theoretical studies, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 40(2), 150-156.
- Huang, J., 2006, Thermal parameters for assessing thermal properties of clothing, *Journal of Thermal Biology*, 31, 461- 466.
- Hatch, K.L., 1993, *Textile Science*, West Publishing Company, New York, NY, USA.
- Havenith, G., 1999, Heat balance when wearing protective clothing, *Annals of Occupational Hygiene*, 43(5), 289-296.
- Havenith, G., Ingvar, H., Parsons, K., 2002, Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production, 34(6), 581-591.
- Hensel, H., 1981, *Thermal comfort in man, thermoreception and temperature regulation*, New York.
- Hes, L., 1999, Optimisation of shirt fabric's composition from the point of view of their appearance and thermal comfort, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 11, 105-119.

- Hsieh, Y.L., 1995, Liquid transport in fabric structures, *Textile Research Journal*, 65(5), 299-307.
- Hsieh, Y.L., Yu, B., 1992a, Liquid wetting, transport and retention properties of fibrous assemblies, Part I: Water wetting properties of woven fabrics and their constituent single fibers, *Textile Research Journal*, 62(11), 677-685.
- Hsieh, Y.L., Yu, B., Hartzell, M.M., 1992b, Liquid wetting, transport, and retention properties of fibrous assemblies, Part II: Water wetting and retention of 100% and blended woven fabrics, *Textile Research Journal*, 62(12), 697-704.
- Hu, J., Li, Y., Yeung, K.W., Wong, A. S., Xu, W., 2005, Moisture management tester: a method to characterize fabric liquid moisture management properties, *Textile Research Journal*, 75(1), 57-62.
- Ito H., Muraoka Y., 1993, Water transport along textile fibers as measured by an electrical capacitance technique, *Textile Research Journal*, 63(7), 414-420.
- Jere H. Brophy, Robert M. Rose, John Wolff, 1976, *Termodinamika strukture*, Tehnološko-metalurškog fakultet, Beograd, prevela Radonjić Lj.
- Jhanji, Y., Gupta, D., Kothari, V.K., 2015a, Moisture management properties of plated knit structures with varying fiber types, *The Journal of the Textile Institute*, 106(6), 663-673.
- Jhanji, Y., Gupta, D., Kothari, V.K., 2015b, Liquid transfer properties and drying behavior of plated knitted fabrics with varying fibre types, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 40(2), 162-169.
- Jhanji, Y., Gupta, D., Kothari, V.K., 2017, Effect of fibre, yarn and fabric variables on heat and moisture transport properties of plated knit, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 42(3), 255-263.
- Jovanović, S. R., 1989, *Celulozna prirodna i hemijska vlakna*, Građevinska knjiga, Beograd.
- Jovanović, S. R., 1990, *Sintetizovana organska vlakna*, Građevinska knjiga, Beograd.
- Kamath, Y.K., Hornby, S.B., Weigmann, H.D., 1994, Wicking of spin finishes and related liquid into continuous filament yarns, *Textile Research Journal*, 64(1), 33-40.
- Kaynak, H.K., Babaarslan O., 2016, Effects of filament linear density on the comfort related properties of polyester knitted fabrics, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 24, 1(115), 89-94.
- Kilinc-Balaci, F.S., 2011, How consumers perceive comfort in apparel, in: Song, G. (Ed.), *Improving comfort in clothing*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 97-113.
- Kissa, E., 1996, Wetting and Wicking, *Textile Research Journal*, 66(10), 660-668.
- Koblyakov, A., 1989, Determination of structural and dimensional characteristics of knitted fabrics, in: Koblyakov, A. (Ed.), *Laboratory practice in the study of textile materials*, Mir Publisher, Moscow.
- Kornev K.G., Neimark A.V., 2001, Spontaneous penetration of liquids into capillaries and porous membranes revisited, *Journal of Colloid and Interface Science*, 235, 101-113.

- Kothari, V.K., 2006, Thermo-physiological comfort characteristics and blended yarn woven fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 31(1), 177-186.
- Kulichenko, A.V., 2005, Theoretical, analysis, calculation and prediction of the air permeability of textiles, *Fibre Chemistry*, 37(5), 371-380.
- Lamb, G.E.R., Moris, K.D., 1990, Heat loss through fabric and under ventilation with and without a phase transition additive, *Textile Research Journal*, 60, 261-265.
- Li, Y., E.R., Moris, K.D., 1990, Heat loss through fabric and under ventilation with and without a phase transition 2001, *The Science of Clothing Comfort*, Textile Progress, 31 (1-2), The Textile Institute, Manchester, UK.
- Li, Y., Luo, Z., 1999, An improved mathematical simulation of the coupled diffusion of moisture and heat in wool fabric, *Textile Research Journal*, 69(10), 760-768.
- Liu, T., Choi, K., Li, Y., 2008, Wicking in twisted yarns, *Journal of Colloid and Interface Science*, 318(1), 134-139.
- Long, H.R., 1999, Water transfer properties of two-layer weft knitted fabric, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 11(4), 198-205.
- Majumdar, A., Mukhopadhyay S., Yadav, R., 2010, Thermal properties of knitted fabrics made from cotton and regenerated bamboo cellulosic fibres, *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 2042-2048.
- Mangat, A., Hes, L., Bajzik V., Buyuk, F., 2016, Impact of surface profile of polyester knitted rib structure on its thermal properties, *Industria Textila*, 67(2), 103-108.
- Mangat, A., Hes, L., Bajzik, V., Buyuk, F., Abbas, M., 2017, Model of thermal absorptivity of knitted rib in dry state and its experimental authentication, *Industria Textila*, 68(4), 263-268.
- Mangat, A., Hes, L., Bajzik, V., Mazari, A., 2018, Thermal absorptivity model of knitted rib fabric and its experimental verification, *AUTEX Research Journal*, 18(1), 20-27.
- Manshahia, M., Das, A., 2013, Comfort characteristics of knitted active sportswear: Liquid water transportation, *Research Journal of Textile and Apparel*, 17(3), 38-49.
- Marmarali, A., Kadoglu H., Oglakcioglu N., Celik, P., Blaga, M., Ursache, M., Loghin, C., 2009, Thermal comfort properties of some new yarns generation knitted fabrics, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> AUTEX Conference*, May 26-28, Izmir, Turkey.
- Marmur, A., 1992, Penetration and displacement in capillary systems, in: Schrader M.E., Loeb, G.I. (Ed), *Modern Approaches to Wettability*, Plenum Press, New York.
- Morton, W.E., Hearle, J.W.S., 1997, *Physical properties of textile fibres*, UK.
- Mattila, H.R., 2006, Intelligent textiles and clothing-a part of our intelligent ambience, in: Mattila, H.R., (Ed.), *Intelligent textiles and clothing*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 102-135.
- Matusiak, M., 2006, Investigation of the thermal insulation properties of multilayer textiles, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 14, 5(59), 98-102.



McCullough E.A., Eckels S., Harms C., 2009, Determining temperature ratings for children's cold weather clothing, *Applied Ergonomics*, 40, 870-877.

Milanović, J., Milanović, P., Stanković, S., Grujić, D., 2018, Uticaj procesa bojenja ekstraktima biljke *Achillea millefolium* L. na sorpciona svojstva pamučnih pletenina, *Proceedings of the XII Conference of Chemists, Technologies and Environmentalists of Republic of Srpska*, November 2 – 3, Teslić, Republic of Srpska, B&H, 539-548, ISBN: 978-99938-54-74-6

Min, K., Son, Y., Lee, Y., Hing, K., 2007, Heat and moisture transfer from skin to environment through fabrics: A mathematical model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(25-26), 5292-5304.

Mitrović, D., Mazić Radovanović, S., Petrović, M., 2009, *Osnovi fiziologije čoveka*, V izdanje, Cicero, Beograd.

Mladenović, N., 2011, *Prilog proučavanju toplotnog komfora tekstilnih materijala*, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.

Moran, D.S., Mendal L., 2002, Core temperature measurement: methods and current insights, *Sports Medicine*, 32(14), 879-885.

Munden, D.L., 1959, The geometry and dimensional properties of plain-knit fabrics, *Journal of the Textile Institute Transactions*, 50(7), T448-T471.

Neckar, B., Sayed I., 2003, Theoretical approach for determining pore characteristics between fibers, *Textile Research Journal*, 73(7), 611-619.

Novaković, M., Bizjak, M., Stanković, S., 2013, Dizajn pletenina u funkciji optimalnog toplotnog komfora, *Tekstilna industrija*, 61(1), 30-36.

Novaković, M., Milanović, J., Grujić, D., Stanković, S., 2020b, Liquid transfer properties of textile fabrics as a function of moisture content, *Hemijska industrija*, 74(2), 119-132.

Novaković, M., Popović, D., Mladenović, N., Poparić, G., Stanković S., 2020a, Development of comfortable and eco-friendly cellulose based textiles with improved sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 267, 122154.

Novaković, M., Putić, L., Bizjak, M., Stanković, S., 2015c, Moisture management properties of plain knitted fabrics made of natural and regenerated cellulose fibres, *Hemijska industrija*, 69(2), 193-200.

Novaković, M., Stanković, S., Pavlović, S., Popović, D., Poparić, G., 2015b, Dry heat transfer characteristics of hemp based knitted fabrics, *Proceedings of the 15<sup>th</sup> AUTEX Conference*, June 10-12, Bucharest, Romania, ISBN 978-606-685-276-0

Novaković, M., Stanković, S., Popović, D., Pavlović, S., Bizjak, M., Poparić, G., 2015a, Thermal contact properties of textile materials exposed to repeated wash and wear cycles, *3<sup>rd</sup> Central and Eastern Europe Conference on Thermal Analysis and Calorimetry*, August 25-28, Ljubljana, Slovenia, 198, ISBN: 978-3-940237-34-7

Novaković, M., Popović G., Stanković, S., 2018, Propustljivost vazduha tekstilnih materijala na bazi konoplje, *Zbornik radova Konferencije „Savremeni trendovi i inovacije u tekstilnoj industriji“*, 18. maj, Beograd, Srbija, ISBN 978-86-900426-0-9

- Oglakcioglu, N., Cay, A., Marmarali, A., Mert, E., 2015, Characteristics of knitted structures produced by engineered polyester yarns and their blends in terms of thermal comfort, *Journal of Engineered Fabrics & Fibers*, 10(1).
- Oglakcioglu, N., Marmarali, A., 2007, Thermal comfort properties of some knitted structures, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15(5-6), 64-65.
- Ogulata, R.T., Mavruz, S., 2010, Investigation of porosity and air permeability values of plain knitted fabrics, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 18, 5(82), 71-75.
- Ogulata, T., 2007, The effect of thermal insulation of clothing on human thermal comfort, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15, 2(61), 67-72.
- Onal, L., Yildirim, M., 2012, Comfort properties of functional three-dimensional knitted spacer fabrics for home-textile applications, *Textile Research Journal*, 82(17), 1751-1764.
- Onofrei, E., R., A.M., Catarino, A., 2011, The influence of knitted fabrics' structure on the thermal and moisture management properties, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 6(4), 10-22.
- Onofrei, E., R., A.M., Catarino, A., 2012, Investigating the effect of moisture on the thermal comfort properties of functional elastic fabrics, *Journal of Industrial Textiles*, 42(1), 34-51.
- Ozcelik, G., Cay, A., Kirtay, E., 2007, A study of the thermal properties of textured knitted fabrics, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15, 1(60), 55-58.
- Ozkan, E.T., Binnaz, M., 2015, Thermophysiological comfort properties of different knitted fabrics used in cycling clothes, *Textile Research Journal*, 85(1), 62-70.
- Ozturk, M.K., Nergis, B., Candan, C., 2011, A study of wicking properties of cotton-acrylic yarns and knitted fabrics, *Textile Research Journal*, 81(3), 324-328.
- Pac, M.J., Bueno, M.A., Renner, M., El Kasmi, S., 2001, Warm-cool feeling relative to tribological properties of fabrics, *Textile Research Journal*, 71(9), 806-812.
- Pan, N., He, J.H., Yu. J., 2007, Fibrous materials as soft matter, *Textile Research Journal*, 77(4), 205-213.
- Pan, N., Sun, Z., 2006a, Characterizing the structure and geometry of fibrous materials, in: Pan, N., Gibson, P. (Ed.), *Thermal and moisture transport in fibrous materials*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 3-38.
- Pan, N., Sun, Z., 2006b, Essentials of psychrometry and capillary hydrostatics, in: Pan, N., Gibson, P. (Ed.), *Thermal and moisture transport in fibrous materials*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 102-132.
- Park, J., Yoo, H.S., Hong, K.H., Kim, E., 2018, Knitted fabric properties influencing coolness to the touch and the relationship between subjective and objective coolness measurements, *Textile Research Journal*, 88(17), 1931-1942.
- Parsons, K., 2003, Human skin contact with hot, moderate and cold surfaces, in: Parsons, K., *Human thermal environments*, CRC press, London and New York, 355-360.

Patnaik, A., Rengasamy, R.S., Kothari, V.K., Ghosh, A., 2006, Wetting and wicking in fibrous materials, *Textile Progress*, 38(1), 1-105.

Pavlović, S. S., Stanković, S. B., Popović, D. M., Poparić, G. B., 2014, Transient thermal response of textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibers, *Polymer Testing*, 34, 97-102.

Perwuelz, A., Mondon, P., Caze, C., 2000, Experimental study of capillary flow in yarns, *Textile Research Journal*, 70(4), 333-339.

Polipowski, M., Wiecek, P., Wiecek, B., Pinar, A., 2017a, Analysis of the effect of channel parameters between filaments and single fabric parameters on air permeability, water vapor resistance and thermal resistance, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 25(5), 79-86.

Polipowski, M., Wiecek, P., Wiecek, B., Pinar, A., 2017b, Influence of selected parameters of the channels between threads on the air permeability of flat textile products with known characteristics, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 25(3), 129-138.

Quaynor, L., Nakajima, M., Takahashi, M., 1999, Dimensional changes in knitted silk and cotton fabrics with laundering, *Textile Research Journal*, 69(4), 285-291.

Rajagopalan, D., Aneja, A.P., Marchal, J.M., 2001, Modeling capillary flow in complex geometries, *Textile Research Journal*, 71(9), 813-821.

Ramachandran, T., Manonmani, G., Vigneswaran, C., 2010, Thermal behaviour of ring- and compact-spun yarn single jersey, rib and interlock knitted fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 35(3), 250-257.

Rossi, R.M., Gross, R., 2004, Water vapor transfer and condensation effects in multilayer textile combinations, *Textile Research Journal*, 74(1), 1-6.

Sampath, M.B., Mani, S., Nalankilli, G., 2011, Effect of filament fineness on comfort characteristics of moisture management finished polyester knitted fabrics, *Journal of Industrial Textiles*, 41(2), 160-173.

Sharabaty, T., Biguenet, F., Dupuis, D., Viallier, P., 2008, Investigation on moisture transport through polyester/cotton fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 33(4), 419-425.

Sherwood, S.C., Huber, M., 2010, An adaptability limit to climate change due to heat stress, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21), 9552-9555.

Singh M.K., Nigam, A., 2013, Effect of various ring yarns on fabric comfort, *Journal of Industrial Engineering*, ID 206240.

Skelton, J., 1975, Interfiber forces during wetting and drying, *Science*, 190(4209), 15-20.

Souza, J.M., Sampaio, S., Silva, W.C., de Lima, S.G., Zille, A., Fangueiro, R., 2018, Characterization of functional single jersey knitted fabrics using non-conventional yarns for sportswear, *Textile Research Journal*, 88(3), 275-292.

Sponner, J., Toth, L., Cziger, S., 2005, Hemp, in: Franck, R (Ed.), *Bast and other plant fibres*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 176-206.

SRPS F. S2.020: 1958, Fizikalna ispitivanja tekstila - Određivanje skupljanja tkanine.

Stanković, S., Asanović, K., Pejić, B., 2006, Karakteristike kvašenja pletenina na bazi konoplje namenjenih za medicinske svrhe, *Tekstilna industrija*, 54(10-12), 24-29.

Stanković, S., Popović, D., Poparić, G., 2008, Thermal properties of textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibers, *Polymer Testing*, 27(1), 41- 48.

Stanković, S., 2009, Uticaj strukture pređa na bazi agroceluloznih vlakana na njihovu dalju tekstilnu transformaciju i upotrebna svojstva, *Doktorska disertacija*, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Stanković, S., 2012, *Komfor odeće*, Zadužbina Andrejević, Beograd.

Stanković, S., Bizjak, M., 2014, Effect of yarn folding on comfort properties of hemp knitted fabrics, *Clothing and Textiles Research Journal*, 32(3), 202-214.

S. Stanković, A. Kocić, 2015, Evaluating thermophysiological comfort sensation of hemp based textiles with wear trials, *Proceedings of the 15<sup>th</sup> Autex Conference*, June 10-12, Bucharest, Romania, ISBN 978-609-685-276-0

Su, C.I., Fang, J.X., Chen, X.H., Wu, W.Y., 2007, Moisture absorption and release of profiled polyester and cotton, composite knitted fabrics, *Textile Research Journal*, 77(10), 764-769.

Suganthi, T., Senthilkumar, P., 2018, Moisture-management properties of bi-layer knitted fabrics for sportswear, *Journal of Industrial Textiles*, 47(7), 1447-1463.

Supuren, G., Oglakcioglu, N., Ozdil, N., Marmarali, A., 2011, Moisture management and thermal absorptivity properties of double-face knitted fabrics, *Textile Research Journal*, 81(13), 1320-1330.

Troynikov, O., Wardiningsih, W., 2011, Moisture management properties of wool/polyester and wool/bamboo knitted fabrics for the sportswear base layer, *Textile Research Journal*, 81(6), 621-631.

Tyagi, G.K., Bhattacharya S., Kumar, P., 2008, Hand related properties of polyester-viscose and polyester-cotton ring- and MJS yarn fabrics – effects of fibre profile and finishing treatment, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 33, 126-131.

Tyagi, G.K., Krishna, G., Bhattacharya, S., Kumar, P., 2009, Comfort aspects of finished polyester-cotton and polyester-viscose ring and MJS yarn fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 34(2), 137-143.

Url1: <https://www.dijetaizdravlje.com/zdravlje/koza/> ; pristupljeno novembar, 2017

Url2: <http://nasetijelo.blogspot.ba/arhiva/2007/08> ; pristupljeno sept. 2016

Vigo, T.L., 2013, *Textile processing and properties: preparation, dyeing, finishing and performance*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

Vivekanadan, M.V., Sheela, R., Sreenivasan, S., Nachane, R.P., 2011, Parameters affecting warm-cool feeling in cotton denim fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 36, 117-121.

Wallace, M., 2002, 100% cotton moisture management, *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 2(3), 1-11.

- Wen, J., 2007, Heat capacities of polymers, in: Mark, J.E. (Ed), Physical properties of polymers handbook, Springer, Switzerland, pp. 145-154.
- Wenzel, R.N., 1936, Resistance of solid surfaces to wetting by water, Industrial & Engineering Chemistry, 28(8), 988-994.
- Wehner, J.A., Miller, B., Rebenfeld, L., 1987, Moisture induced changes in fabric structure as evidenced by air permeability measurements, Textile Research Journal, 57, 247-256.
- Wiener, J., Dejlava, P., 2003, Wicking and wetting in textiles, AUTEX Research Journal, June 2003, 3(2), 64-71.
- Xu G., Wang F., 2005, Prediction of the permeability of woven fabrics, Journal of industrial textiles, 34(4), 243-254.
- Xu, Y., Lu Z., Tang R., 2007, Structure and thermal properties of bamboo viscose, Tencel and conventional viscose fiber, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 89(1), 197-201.
- Yanilmaz M, Kalaoglu F., 2012, Investigation of wicking, wetting and drying properties of acrylic knitted fabrics, Textile Research Journal, 82(8), 820-831.
- Yingchun, D., Li, J., 2010, Dynamic moisture absorption behavior of polyester-cotton fabric and mathematical model, Textile Research Journal, 80(17), 1793-1802.
- Yoon H.N., Buckley A., 1984, Improved comfort polyester, Part I: Transport properties and thermal comfort of polyester/cotton blend fabrics, Textile Research Journal, 54, 289-298.
- Zahra, Q., Hussain, S., Mangat, A.E., Abbas, M., Fraz, A., Mukhtar, U., 2018, Air, moisture and thermal comfort properties of woven fabrics from selected yarns, Industria Textila, 69(3), 177-182.
- Zhong, W., 2006, Surface tension, wetting and wicking, in: Pan, N., Gibson, P. (Ed.), Thermal and moisture transport in fibrous materials, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 136-152.
- Zhu, C., Takatera, M., 2014, A new thermocouple technique for the precise measurement of in-plane capillary water flow within fabrics, Textile Research Journal, 84(5), 513-526.
- Zhu, C., Takatera, M., 2015, Effects of hydrophobic yarns on liquid migration in woven fabrics, Textile Research Journal, 85(5), 479-486.
- Zhu, G., Kremenakova, D., Wang, Y., Militky, J., Mishra, R., 2015, Study on air permeability and thermal resistance of textiles under heat convection, Textile Research Journal, 85(16), 1681-1690.
- Zhu, S., Tian, M., Pan, N., 2012, Skin thermal stimulation on touching cool fabric from the transient stage to steady-state stage, International Journal of Thermal Sciences, 53, 80-88.
- Zhuang, Q., Harlock, S.C., Brook, D.B., 2002, Transfer wicking mechanism of knitted fabric used as undergarment for outdoor activities, Textile Research Journal, 72(8), 727-734.

## **-BIOGRAFIJA-**

Milada Novaković rođena 25.06.1969. godine u Zvorniku, gde je završila osnovnu i srednju školu. Godine 1990. upisala je Višu tehničku školu u Zrenjaninu, gde je 1993. godine stekla zvanje inženjer tekstilne konfekcije. Godine 1993. upisala je tekstilno-mašinski odsek na Tehničkom fakultetu „Mihajlo Pupin“ u Zrenjaninu, Univerzitet u Novom Sadu. Diplomirala je na istom fakultetu 1999. godine i stekla zvanje diplomirani inženjer tekstilnog inženjerstva. Školske 2011/12. godine upisala doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, studijski program Tekstilno inženjerstvo, pod mentorstvom Dr Snežane Stanković, vanr. prof. U periodu od 2001. do 2004. godine bila je zaposlena u kompaniji Industrija tepiha „Proleter“ u Zrenjaninu kao glavni inženjer u pogonima proizvodnje i dorade tepiha. Od 2004. do 2006. godine radila je kao predavač u Srednjoj školi „Uroš Predić“ u Zrenjaninu. U periodu od 2007. do 2010. godine radila je u Odeljenju za upravljanje kontrolom kvaliteta na poslovima završne ocene kvaliteta tekstilnih materijala namenjenih za izradu uniformi i zaštitne odeće. Od 2011. godine je radila kao stručni saradnik za praktičnu nastavu na smeru Tekstilna konfekcija i dizajn na Visokoj tehničkoj školi strukovnih studija u Zrenjaninu. Od 2014. godine radi kao asistent za užu naučnu oblast Tekstilno inženjerstvo. Od 2018. godine radi na mestu asistenta za naučnu oblast Tehnološko inženjerstvo.

Kao koautor objavila je 1 rad u vrhunskom međunarodnom časopisu, prvih 10 % impakt liste, 1 rad u vrhunskom međunarodno časopisu, 2 rada u međunarodnom časopisu, 3 rada u nacionalnim časopisima, i učestvovala sa saopštenjima na 7 međunarodnih i 8 nacionalnih skupova. Učestvovala je u 4 međunarodna projekta FP7 People. Autor je 1 stručnog izdanja.

## Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora *Milada Novaković*

Broj indeksa *4076/2011*

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom: *Toplotni komfor tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima*

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 18.06.2020.

Potpis autora



## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora        *Milada Novaković*  
Broj indeksa                 *4076/2011*  
Studijski program            *TI*  
Naslov rada    *Toplotni komfor tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima*  
Mentor                         *dr Snežana Stanković*

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjivanja u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 18.06.2020.

Potpis autora





### Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

*Toplotni komfor tekstilnih materijala u dinamičkim uslovima*

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.

Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora



U Beogradu, 18.06.2020.

1. Autorstvo. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. Autorstvo – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.