

## Istraživanje svojstva propusnosti zraka netkanog tekstila učvršćenog iglanjem

Prof.dr.sc. **Burcak Karaguzel Kayaoglu**, dipl.ing.  
Tehničko sveučilište u Istanbulu  
Fakultet tekstilnih tehnologija i dizajna  
Istanbul, Turska  
e-mail: [bkayaoglu@itu.edu.tr](mailto:bkayaoglu@itu.edu.tr)  
Prispjelo 29.12.2011.

UDK 677.017.622:677.076.4  
Izvorni znanstveni rad

*U radu se opisuju izmjerena i teoretska propusnost zraka na iglanom netkanom tekstilu te svojstva propusnosti i prekidne čvrstoće proizvedenog netkanog tekstila za filtraciju zraka. Propusnost zraka se istražuje u ovisnosti o duljinskoj masi vlakana, masi netkanog tekstila po jedinici površine i debljini netkanog tekstila. Uzorci netkanog tekstila proizvedeni su od odrezanih poliesetrskih vlakana duljinske mase (finoće) 3, 6 i 12 den, odabrani na temelju stvarne industrijske primjene. Iglani tekstil je dalje obrađen kalandriranjem pri temperaturama od 180 i 210 °C. Izmjerene vrijednosti propusnosti zraka na uzorcima povećavale su se s povećanjem linearne gustoće vlakana. Povećanje mase netkanog tekstila po jedinici površine uzrokovalo je smanjenje propusnosti zraka kod jednake finoće vlakana i temperature kalandriranja. Vrijednosti eksperimentalne brzine protoka koreliraju s vrijednostima izračunate teoretske propusnosti kao koeficijent propusnosti,  $K_{fp}$ . Teoretska propusnost je funkcija propusnosti netkanog tekstila i kalandriranja na poroznost netkanog tekstila. Prema tome, postupak kalandriranja utjecao je na točnost predloženog modela. Statističko vrednovanje dokazalo je da se teoretska propusnost izračunata kao funkcija srednjeg promjera vlakna, poroznosti i viskoznosti tekućine može koristiti za predviđanje stvarne propusnosti filtarskog medija od netkanog tekstila. Budući da je teoretska propusnost funkcija poroznosti netkanog tekstila, promjene poroznosti netkanog tekstila zbog kalandriranja utječu na razliku između izmjerenih i teoretskih vrijednosti propusnosti.*

**Ključne riječi:** netkani tekstil učvršćen iglanjem, propusnost zraka, kalandriranje, poroznost

### 1. Uvod

Otpornost materijala na zrak je važan faktor kod filtriranja i stavlja se u odnos prema parametrima materijala kao masa po jedinici površine, debljina, poroznost i duljinska masa vlakana [1]. Iglani netkani tekstil često se upotrebljava za potrebe filtriranja jer je proizvodnja jeftina i laka, ali i zbog veće propusnosti medija i dostupnosti

[2, 3]. Parametri netkanog tekstila kao što su gustoća materijala, poroznost netkanog tekstila, vrsta vlakna, čvrstoća netkanog tekstila i finoća igala, dubina prodiranja igle, gustoća iglanja određuju njegovu primjenu kao filtarskog medija [2]. Postoje radovi o promjenama propusnosti zraka netkanog tekstila s obzirom na gustoću materijala i razdiobu veličina

pora [2, 4]. Parametri iglanja kao što su učestalost udara i dubina prodiranja igle utječu na razdiobu veličine pora iglanog netkanog tekstila [5]. Budući da mediji za filtraciju srednjeg protoka od netkanog tekstila imaju veličine pora od 1 do 500  $\mu\text{m}$ , za dobivanje finije veličine pora, manjih od 10 do 15  $\mu\text{m}$  netkani tekstil se treba kalandrirati [3]. U radovima

R.D. Anandjiwala i L. Boguslavsky [2] te C.A. Lawrence i P. Liu [6] kalandrirani i iglani netkani tekstil imao je manje vrijednosti propusnosti nego netkani tekstil bez kalandriranja/toplinske obrade jer čini se da su površinske obrade dale veće gustoće pakiranja (kompaktnost) što uzrokuje manje srednje vrijednosti veličina pora i onemogućuje prolaz većih čestica. Ustanovljeno je da je koncentracija čestica u zračnoj struji iza filtra bila značajno manja kod kalandriranih proizvoda nego kod neobrađenih jer se povećala zbijenost vlakana u strukturi netkanog tekstila nakon kalandriranja [2, 6]. R.D. Anandjiwala i L. Boguslavsky [2] utvrdili su da je kalandriranje iglanog tekstila povećalo glatkoću površine materijala, što rezultira u većoj sposobnosti odstranjivanja prašine i povećanom učinku filtracije materijala zbog regulacije gustoće i propusnosti materijala. S.Y. Yeo i sur. [7] su ispitivali utjecaj strukturnih svojstava kao što su duljinska masa, odnosno finoća vlakana, poroznost i debljina na svojstva propusnosti zraka netkanog tekstila učvršćenog iglanjem i toplinski za filtre te uspoređivali svojstva propusnosti s nanoveličinama runa. Filtrarski materijali od nanotekstila su konstruirani tako da odstranjuju čestice iz zraka, pri čemu svojstva vlakana, postupak učvršćivanja vlakana te poroznost imaju značajan utjecaj na svojstva filtracije [8]. Tekstilni filtrarski mediji, tkani i netkani, najučinkovitiji su od filtrarskih medija za odvajanje finih čestica [9, 10]. Promjeri vlakana trebali bi biti gotovo jednaki ili barem ne tri puta veći od srednjeg promjera čestica koje je potrebno odvojiti da bi filtracija bila učinkovita [6]. A. Das i sur. [10] ispitivali su učinkovitost filtracije toplinski i iglanjem učvršćenih netkanih materijala na odvajanje čestica prašine različitih veličina; grubih čestica koje su veće od 5  $\mu\text{m}$  i finih čestica od 0,3 do 0,5  $\mu\text{m}$ . Prema njihovom ispitivanju slijedi da se učinkovitost filtracije i pad tlaka povećavaju s povećanjem površinske

mase materijala i gustoće iglanja [10]. V.K. Kothari i sur. [9] ispitivali su prekidnu čvrstoću filtera za zrak od iglanog netkanog tekstila da bi procijenili mogućnosti opterećenja materijala u smjeru stroja (MD) i u smjeru križnog polaganja (CD). Provedena su ispitivanja modeliranjem propusnosti netkanog tekstila [11, 12, 14, 15]. A. Rawal u radu [11] modifikacijom Hagen-Poiseuilleove jednadžbe predviđa svojstva propusnosti vode za netkani tekstil. S. Zobel i sur. [12] simulirali su strukturne promjene netkanog tekstila učvršćenog kod ispredanja uz kalandriranje i modelirali su propusnost kalandriranog netkanog tekstila. S. Sundaramoorthy i sur. [13] razvili su model za predviđanje propusnosti zraka višeslojne tkanine. M. Mohammadi i P. Banks-Lee [14] predviđali su teoretsku propusnost zraka višeslojnih, stakleno-keramičkih iglanih uzoraka netkanog tekstila na temelju modificirane Kozeny jednadžbe pomoću strukturnih svojstava netkanog tekstila. Prema Darcyevom zakonu izračunat je protok kroz anizotropni netkani tekstil (1):

$$q = K_{fp} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

gdje je  $q$  linearna brzina strujanja zraka ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ ),  $L$  debljina uzorka (mm),  $\Delta P$  razlika tlaka u ( $\text{g}/(\text{cm}^2 \text{s}^2)$ ), a  $K_{fp}$  koeficijent propusnosti protoka ( $\text{m/s}$ ) [14, 16, 17].

Postoji velik broj ispitivanja o propusnosti zraka kroz iglani netkani tekstil, ali mali je broj o karakterizaciji i modeliranju ponašanja propusnosti kroz iglane strukture koje su konsolidirane najprije iglanjem i tada površinskom obradom, npr. kalandriranjem. Poliesterska vlasasta vlakna različitih finoća i dužina odabrana su za razvoj iglanih netkanih tekstilija s obzirom na svojstva vlakana koja se koriste za filtraciju zraka u automobilu. Referentni industrijski uzorci imaju vrijednosti propusnosti zraka od oko 10 do 150  $\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$  kod 25 Pa i masu po jedinici površine od oko 100 do 600  $\text{g}/\text{m}^2$ . Ovaj rad ima za

svrhu karakterizirati različita svojstva iglanih netkanih tekstilija s obzirom na svojstva povezana s filtracijom kao što su prekidna svojstva i propusnost zraka. Stvarne propusnosti se dovode u korelaciju s teoretskim propusnostima koje su izračunate kao funkcija srednje vrijednosti promjera vlakana, poroznosti i viskoznosti zraka. Ovo istraživanje daje uvid u karakterizaciju i predviđanje stvarne propusnosti zraka kod iglanih struktura s izborom odgovarajuće duljinske mase vlakana, mase tkanine po jedinici površine, koji mogu biti od koristi za industrijske namjene.

## 2. Materijali i ispitivanja

Sva ispitivanja provedena su u standardnim atmosferskim uvjetima, 65 % relativne vlažnosti i 21 °C nakon što su uzorci kondicionirani 24 h.

### 2.1. Vlakna

Poliestersko vlasasto vlakno (Dacron®) tvrtke Advansa SASA odabrano je kao sirovina za iglani netkani tekstil uzimajući u obzir materijale koji se koriste za filtraciju zraka u automobilima. Različite duljinske mase vlakana od 3, 6 i 12 den duljine rezanja od 51 odn. 60 mm su odabrane kao sirovina. Vlasasta vlakna su nakovršana s učestalošću kovrči od 3 do 4 kovrči/cm. Mjerenja promjera vlakna različitog deniera provedena su pomoću softvera za analizu slika Motic Image Plus, 2.OML, pri čemu su slike vlakana snimane pomoću optičkog mikroskopa. Vlakna su rezana na male dijelove i stavljana na stakalce koje je tada promatrano mikroskopom. Provedeno je po 10 mjerenja na svakom uzorku vlakana. Ukupno je provedeno 30 mjerenja za sve tri ispitivane finoće vlakana iz kojih su izračunate srednje vrijednosti, a u tab.1 prikazane su vrijednosti izmjerenih promjera vlakana.

### 2.2. Izrada uzoraka netkanog tekstila

Pripremljeni su različiti uzorci netkanog tekstila od poliesterskih vlakana

Tab.1 Vrijednosti promjera vlakana različite finoće

Finoća vlakana (den)	3	6	12
Prosječni promjer vlakana ( $\mu\text{m}$ )	11.51	18.21	26.76
STDV ( $\mu\text{m}$ )	0.95	1.35	0.78

na pilot postrojenju za izradu netkanog tekstila koje je spojeno sa strojevima za iglanje Cormatex, S.R.L., Italija. Nakon otvaranja, vlakna su prerađena grebenanjem i križnim polaganjem. Brzina elemenata za grebenanje, CFS1 linije, bila je 2 m/min. Učvršćenje netkanog tekstila iglanjem provedeno je standardnim postupkom. Broj hodova kod iglanja, MAG 4000 linije, bio je 400 hodova/min. Dubina prodora igle bila je 50 mm i 60 mm od gornjeg do donjeg hoda. Uzorci različite mase proizvedeni su podešavanjem parametara kao što su uvođenje u grebenaljku, brzina pramena, brzina nosača kod križnog polaganja i dovođenje na iglanje. Konačna širina netkanih uzoraka bila je oko 500 mm. Primijenjena su tri različita uvjeta kalandriranja: kalandrier 1 (C1), gdje je temperatura bila 180 °C, kalandrier 2 (C2), gdje je temperatura bila 210 °C i bez kalandriranja (C0), gdje nije provedeno kalandriranje. Kalandriranje je provedeno uz brzinu od oko 2,6 m/min, a razmak između valjaka za kalandriranje je podešen kako bi se postigla debljina netkanih uzoraka od 0,7 mm do 6 mm. U tab.2 prikazana je kategorizacija uzoraka proizvedenih za ovo ispitivanje. U tab.2 prikazano je 27 parametara konstrukcije, pri čemu su korištene promjenljive veličine duljinske mase vlakana i uvjeta kalandriranja, a s povećanjem temperatura kalandriranja, vrijednosti debljine uzoraka su smanjene.

### 2.3. Mjerenje debljine netkanog tekstila

Debljina netkanog tekstila u mm mjerena je aparatom za mjerenje debljine James Hill Cloth Thickness Tester

R&B, pri čemu je provedeno 5 slučajnih mjerenja svakog uzorka i određena je srednja vrijednost za svaki uzorak. Mjerenja debljine netkanog tekstila provedena su prema normi EN ISO 5084 pri čemu je primijenjen pritisak na uzorke od  $1 \pm 0,01$  kPa.

### 2.4. Mjerenje propusnosti zraka

Mjerenja propusnosti zraka na uzorcima iglanog tekstila provedena su prema normi EN ISO 9237 pomoću aparata za ispitivanje propusnosti zraka SDL M021S uz tlak od 25 Pa i površine uzoraka od 5 cm<sup>2</sup>. Dobivene su vrijednosti linearne brzine protoka  $q$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>s) za svaki uzorak. Provedeno je 5 različitih mjerenja svakog uzorka i određene su srednje vrijednosti.

### 2.5. Mjerenje prekidne sile

Mjerenje prekidne sile uzoraka netkanog tekstila u smjeru stroja i smjeru križnog polaganja provedeno je prema normi ISO 13934-1 na aparatu za ispitivanje James Heal Titan 2. Uzorcima duljine 200 mm mjerena je prekidna sila (N) uz brzine istežanja 100 mm/min. Provedena su po tri mjerenja po svakom uzorku u smjeru stroja i u smjeru križnog polaganja koristeći isto načelo ispitivanja.

### 2.6. Teoretska propusnost zraka

Teoretska propusnost protoka se definira Darcyjevim zakonom [4-6]. Koeficijent propusnosti protoka,  $K_{fp}$ , na vlaknastim strukturama koje imaju poroznost od 0,7 do 0,994 definira se empirijski izvedenom jednačbom (2):

$$K_{fp} = \frac{d^4}{64 \eta (1-\varepsilon)^{1,5} [1+56 (1-\varepsilon)^3]} \quad (2)$$

gdje je  $K_{fp}$  koeficijent propusnosti protoka (m/s),  $d$  je srednji promjer vlakna ( $\mu\text{m}$ ),  $\eta$  je viskoznost fluida u 0,01 g/(cm s) i  $\varepsilon$  je poroznost uzorka [4]. Poroznost uzoraka  $\varepsilon$  netkanog tekstila, izračunata je prema jednačbi (3):

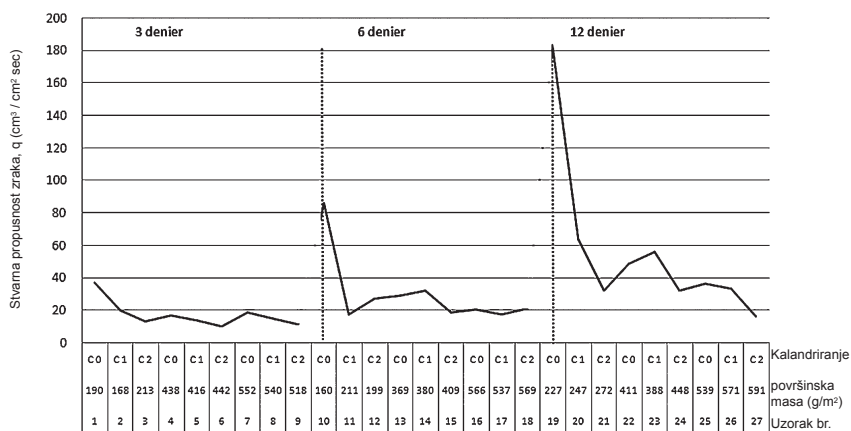
$$\varepsilon = 1 - \frac{m_t}{A L \rho} \quad (3)$$

gdje je  $m_t$  ukupna masa heterogenog netkanog tekstila,  $A$  je površina poprečnog presjeka uzorka,  $L$  je debljina uzorka i  $\rho$  je prosječna gustoća heterogenog netkanog tekstila [4]. Izračunata poroznost, srednje vrijednosti promjera vlakana netkanih uzoraka i viskoznost tekućine za zrak od  $1,8 \times 10^{-4}$  g/(cm s) korišteni su za izračun koeficijenta propusnosti,  $K_{fp}$ , pomoću jednačbe (2). U ovom istraživanju koeficijent propusnosti  $K_{fp}$  (m/s), kao funkcija srednjeg promjera vlakana, poroznosti i viskoznosti tekućine upotrijebljen je kao teoretska propusnost povezana s eksperimentalnom linearnom brzinom protoka,  $\rho$  (cm/s ili cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>s), vrijednostima dobivenima tijekom mjerenja propusnosti zraka.

## 3. Rezultati i rasprava

### 3.1. Propusnost zraka

Na sl.1 prikazane su ukupne stvarne vrijednosti propusnosti zraka  $q$  za 27 uzoraka netkanog tekstila u odnosu na duljinsku masu vlakana za različite površinske mase netkanog tekstila i uvjete kalandriranja. Povećanje duljinske mase vlakana sa 3 na 12 den rezultiralo je ukupnom povećanju stvarnih vrijednosti propusnosti zraka. To se može pripisati manjoj gustoći pakiranja vlakana većeg promjera, što rezultira većim veličinama pora i većoj propusnosti zraka [2]. Ukupno gledajući, kod jednake duljinske mase vlakana i temperature kalandriranja propusnost zraka netkanog tekstila smanjila se povećanjem površinske mase uzoraka netkanog tekstila. Povećanje mase uzoraka znači veći broj vlakana po jedinici površine, koja djeluju protiv protoka zraka što rezultira u smanjenju vrijednosti propusnosti zraka. Na sl.1 prikazana je promjena vrijednosti propusnosti zraka kod povećanja površinske mase uz različite uvjete kalandriranja; C0, C1 i C2 za uzorke netkanog tekstila koji su izrađeni od vlakana različite finoće. Kod svih uvjeta kalandriranja povećanjem površinske mase iglanog netkanog



Sl.1 Vrijednosti stvarne propusnosti zraka kod 27 uzoraka netkanog tekstila u ovisnosti o duljinskoj masi vlakana, površinskoj masi uzoraka i kalandriranja (C1 - 180 °C, C2 - 210 °C i C0 - bez kalandriranja)

Tab.2 Kategorizacija netkanih uzoraka proizvedenih za ovo istraživanje

Uzorak br.	Finoća vlakna (den)	Površinska masa (g/m <sup>2</sup> )	Uvjet kalandriranja	Debljina materijala (mm)
1	3	190	C0	3
2	3	168	C1	1,6
3	3	213	C2	0,7
4	3	438	C0	4,8
5	3	416	C1	3,5
6	3	442	C2	2,0
7	3	552	C0	5,8
8	3	540	C1	5,6
9	3	518	C2	4,2
10	6	160	C0	2,5
11	6	211	C1	1,1
12	6	199	C2	0,7
13	6	369	C0	4,4
14	6	380	C1	2,9
15	6	409	C2	2,2
16	6	566	C0	6,0
17	6	537	C1	3,9
18	6	569	C2	4,9
19	12	227	C0	4,5
20	12	247	C1	1,2
21	12	272	C2	1,1
22	12	411	C0	5,9
23	12	388	C1	3,7
24	12	448	C2	2,8
25	12	539	C0	6,7
26	12	571	C1	5,1
27	12	591	C2	3,5

tekstila došlo je do smanjenja propusnosti zraka uzoraka. A kod svih površinskih masa uzoraka oni uzorci proizvedeni bez kalandriranja pokazivali su najveće vrijednosti propusnosti zraka. S povećanjem tempera-

ture kalandriranja (od C1 do C2) uočeno je smanjenje vrijednosti stvarnih propusnosti zraka, što se može pripisati povećanju gustoće pakiranja filteraških medija procesom kalandriranja što rezultira u manje

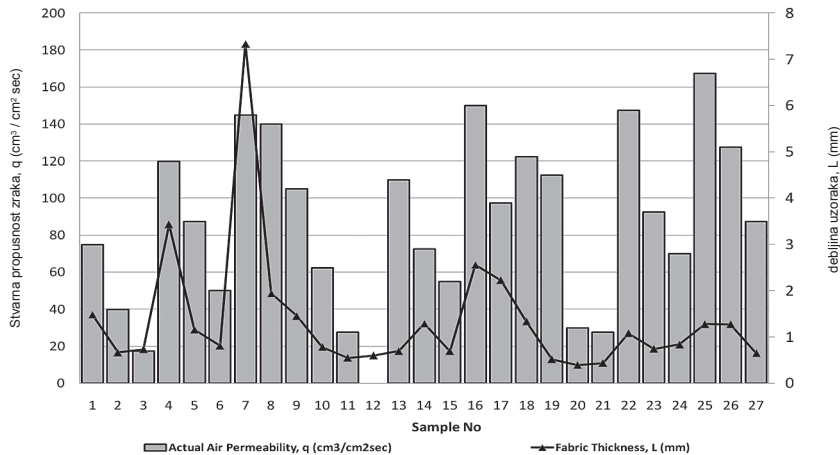
otvorenom prostoru i većoj otpornosti na protok zraka. Usporedo s tim rezultatima utjecaja površinske obrade kao što je kalandriranje, za povećanje učinka filtracije za industrijske filtre za zrak upotrebljava se i učvršćivanje netkanog tekstila smolama i toplinom.

Na sl.2 prikazan je odnos vrijednosti debljine netkanih uzoraka s njihovim vrijednostima propusnosti zraka. Povećanje vrijednosti propusnosti zraka dobiveno je kod uzoraka većih debljina, što se može povezati s većom pozornošću uzoraka.

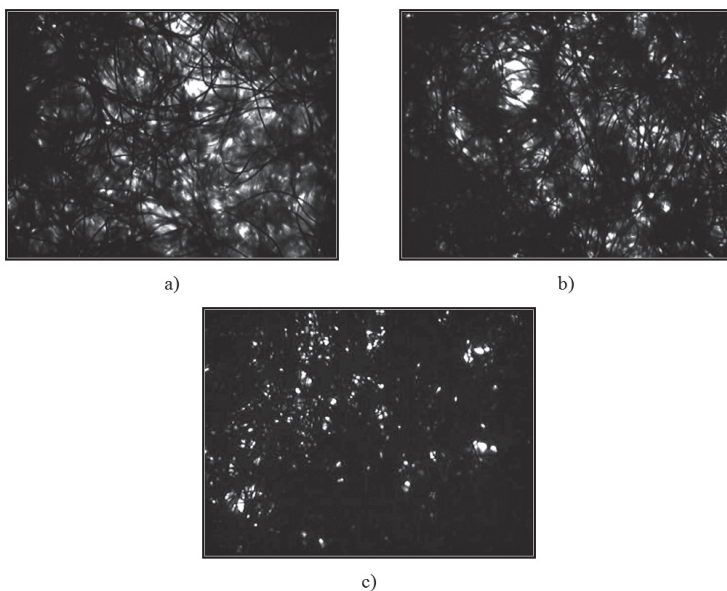
Na sl.3 prikazuju se slike uzoraka netkanog tekstila od 200 g/m<sup>2</sup> koji su proizvedeni u različitim uvjetima kalandriranja načinjene pod optičkim mikroskopom, a iz kojih se uočava smanjenje otvorenog prostora ili poroznosti unutar kalandriranih runa. Također su vidljive i neke nepravilnosti u proizvedenim netkanim strukturama.

### 3.2. Vlačna svojstva

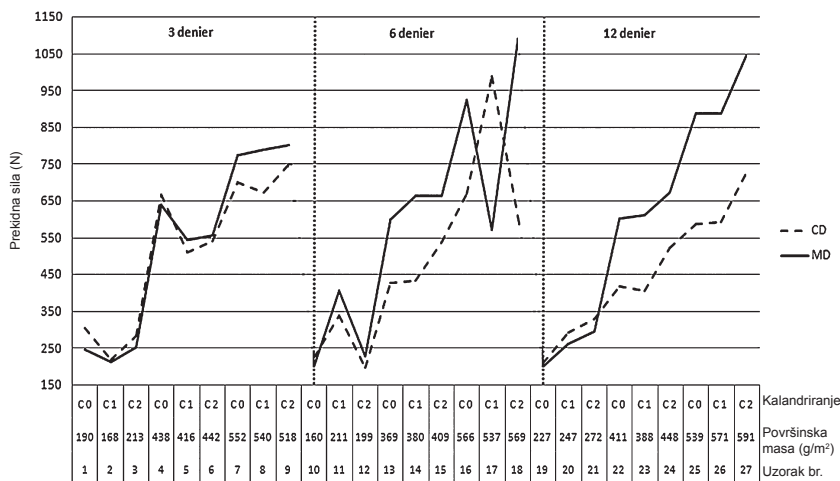
Ukupno uzevši, vrijednosti prekidne sile varirale su u smjeru stroja i smjeru križnog polaganja zbog strukturne anizotropije koja rezultira iz procesa oblikovanja netkanog tekstila, sl.4. Kako se povećavala masa netkanog tekstila po jedinici površine, povećavane su vrijednosti prekidne sile i u smjeru stroja i u smjeru križnog polaganja kod vlakana jednake finoće [2]. Prosječne vrijednosti prekidne sile u smjeru stroja bile su najveće za uzorke izrađene od vlakana 12 den, a najmanje za uzorke izrađene od vlakana finoće 3 den. U smjeru križnog polaganja prosječne vrijednosti prekidne sile bile su najveće za uzorke izrađene od vlakana finoće 6 den, čemu uzrok može biti bolje preplitanje tih vlakana u smjeru križnog polaganja. Na vlačna svojstva iglanog netkanog tekstila utjecali su duljinska masa vlakana i masa netkanog tekstila po jedinici površine. Kod netkanih uzoraka u smjeru križnog polaganja kod kojih su se povećavale vrijednosti prekidne sile uočeno je povećanje ukupnih vrijed-



SI.2 Usporedba vrijednosti debljine netkanih uzoraka s vrijednostima propusnosti zraka



SI.3 Mikroskopske slike poroznosti uzoraka runa za netkani tekstil od 200 g/m<sup>2</sup> izrađen od PET vlakana finoće 3 den: a) bez kalandriranja, b) kalandriranih na 180 °C i c) kalandriranih na 210 °C



SI.4 Prekidna sila (N) uzoraka netkanog tekstila u odnosu na duljinsku masu vlakana, površinsku masu i kalandriranje

nosti propusnosti zraka, sl.5. To se može objasniti povećanjem prekidne čvrstoće od vlakana većeg promjera a time i povećanjem vrijednosti propusnosti zraka. Takav očit odnos nije uočen između vrijednosti propusnosti zraka i prekidnih sila netkanih uzoraka u smjeru stroja.

Zato su izrađeni uzorci imali odgovarajuće svojstvo prekidne čvrstoće što je važan parametar učinka za današnje filtre za zrak. Industrijske filteri za zrak zahtijevaju duže vrijeme upotrebe, veliku čvrstoću zbog smanjenja gubitaka tijekom obrade i otpornost na kidanje tijekom rada.

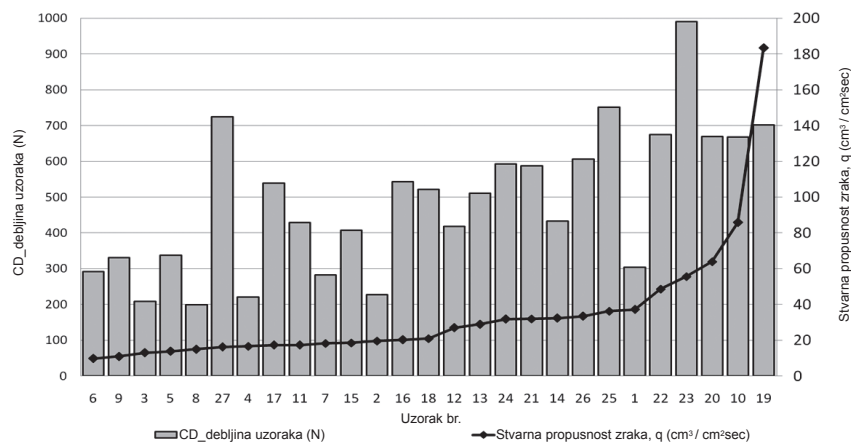
### 3.3. Statistička analiza

Pomoću Minitab softvera vrijednosti stvarne propusnosti zraka su dovedene u korelaciju s izračunatim teoretskim vrijednostima brzine protoka. Pomoću regresijske analize određen je odnos između teoretske vrijednosti brzine protoka,  $K_{fp}$ , i eksperimentalne vrijednosti brzine protoka,  $q$ , i to  $q = 8.10 + 1.46 K_{fp}$ .

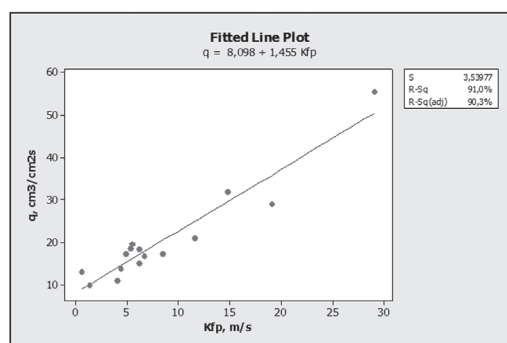
Pravac regresije prikazan je na sl.6, a prilagođen je vrijednostima propusnosti različitih uzoraka. Teoretske vrijednosti brzine protoka ( $K_{fp}$ ) bile su značajno veće od razine povjerenja od 99 % kod predviđanja stvarne propusnosti ( $q$ ). Koeficijent korelacije ( $R^2$ ) za ovaj model bio je 91,0 %. Ovaj model je pokazao da je teoretska propusnost zraka značajno veća od razine povjerenja od 99 % kod predviđanja stvarne propusnosti.

Drugi odnos ispitivao je stvarnu propusnost,  $q$ , kao funkciju teoretske brzine protoka,  $K_{fp}$  i površinske mase uzoraka,  $m$ . Model je određen sljedećim izrazom:  $q = 13.9 + 1.48 K_{fp} - 0.0145 m$ .

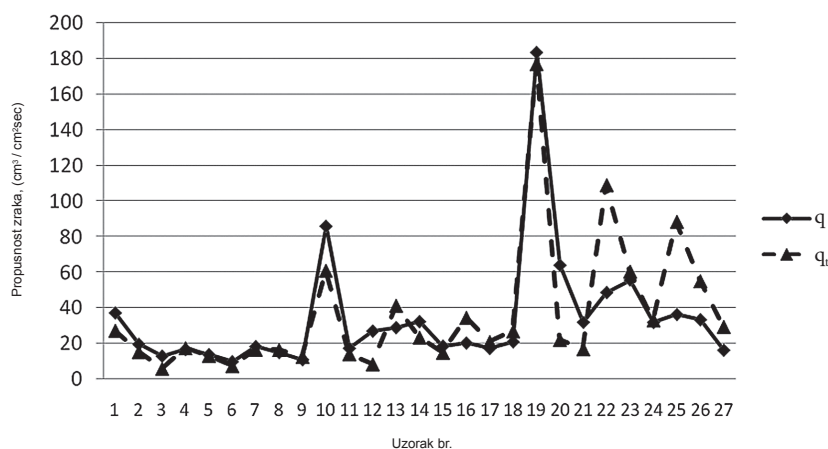
Teoretske vrijednosti brzine protoka ( $K_{fp}$ ) bile su značajno veće od razine povjerenja od 99 % kod predviđanja stvarne propusnosti. Model s neovisnim promjenljivim veličinama teoretskih vrijednosti brzine protoka ( $K_{fp}$ ) i površinskom masom uzorka,  $m$ , mogu se smatrati boljim modelom za predviđanje stvarne propusnosti. U tab.3 prikazuju se stvarne,  $q$ , i teo-



Sl.5 Odnos između propusnosti zraka i vrijednosti prekidne sile netkanih uzoraka u smjeru križnog polaganja (CD)



Sl.6 Pravac regresije ovisnosti vrijednosti teoretske brzine protoka  $K_{fp}$  i vrijednost eksperimentalne brzine protoka  $q$



Sl.7 Podešena linija regresije vrijednosti teoretske brzine protoka  $K_{fp}$  i vrijednost eksperimentalne brzine protoka  $q$

retske propusnosti,  $q_p$ , ili teoretske vrijednosti brzine protoka ( $K_{fp}$ ) izračunate pomoću statističke jednadžbe modela. Na sl.7 prikazane su stvarne i teoretske vrijednosti propusnosti iz kojih se uočava sličnost oblika dviju krivulja. Prema sl.7 vrijednosti teoretske propusnosti zraka nekih od ispitnih uzo-

raka pokazuju odstupanja od vrijednosti stvarne propusnosti zraka. Rezultati pokazuju da konsolidacija uzoraka netkanog tekstila kalandriranjem utječe na gustoću pakiranja i poroznost struktura. Budući da model predviđanja koristi poroznost kao funkciju, promjene poroznosti materijala zbog kalandriranja utječu na

Tab.3 Usporedba stvarnih i teoretskih propusnosti zraka

Uzorak br.	Propusnost, $\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$	
	Stvarna, $q$	Teoretska, $q_t$
1	37,17	27,14
2	19,67	15,48
3	13,00	6,14
4	16,67	17,67
5	13,80	13,35
6	9,87	7,63
7	18,33	16,84
8	15,00	16,70
9	11,00	12,81
10	85,83	61,04
11	17,40	14,34
12	27,00	8,63
13	29,00	41,46
14	32,33	23,60
15	18,60	15,07
16	20,33	34,72
17	17,33	21,14
18	21,00	27,04
19	18,33	176,66
20	64,00	22,34
21	32,00	17,04
22	48,67	108,90
23	55,67	60,52
24	31,88	33,31
25	36,33	88,39
26	33,43	55,16
27	16,33	29,61

razliku između vrijednosti izmjerenih i teoretskih propusnosti. Ovo istraživanje će se proširiti kako bi se povećala točnost modela predviđanja. Zato će se u sljedećoj fazi uvjeti kalandriranja kontrolirati preciznije uključujući brzinu, temperaturu i debljinu kalandriranja tijekom izrade uzoraka, a uz to će se modificirati i empirijski model kako bi se povećala preciznost modela.

#### 4. Zaključak

U ovom radu je istraženo svojstvo propusnosti zraka iglanog netkanog tekstila s obzirom na duljinsku masu vlakana, površinsku masu i proces kalandriranja. Predložen je empirijski model kao funkcija srednjeg promjera vlakna, poroznosti i viskoznosti za predviđanje propusnosti zraka iglanog netkanog tekstila za potrebe fil-

tracije zraka. Rezultati pokazuju da je propusnost netkanog tekstila ovisna o duljinskoj masi vlakana i poroznosti netkanog tekstila. Proizvodi od netkanog tekstila proizvedeni od vlakana veće duljinske mase, odnosno promjera, imali su veće propusnosti čemu je razlog manja gustoća pakiranja vlakana u netkanoj strukturi. Netkani tekstil izrađen od vlakana duljinske mase 12 den imao je najviše vrijednosti propusnosti zraka. Rezultati se podudaraju s činjenicom da se vlakna malo promjera upotrebljavaju za finu filtraciju u stvarnim uvjetima. Kako se povećavala masa po jedinici površine netkanog tekstila, smanjene su vrijednosti propusnosti zraka kod svakog uvjeta kalandriranja. Povećanje mase netkanog tekstila po jedinici površine znači veći broj vlakana po jedinici površine što djeluje na protok zraka i što rezultira u smanjenju vrijednosti propusnosti zraka. Proces kalandriranja povećao je otpornost na protok zraka što je smanjilo stvarnu propusnost čemu razlog može biti povećanje gustoće pakiranja netkanog tekstila što znači manji otvoreni prostor i veću otpornost na protok zraka. Debljina uzorka se smanjila procesom kalandriranja što je uzrokovalo manje vrijednosti propusnosti zraka. Kod svih ispitivanih površinskih masa uzoraka najveće vrijednosti propusnosti zraka imali su uzorci kod kojih nije provedeno kalandriranje. Povećanjem temperature kalandriranja sa 180 na 210 °C smanjene su vrijednosti propusnosti zraka. Rezultati se podudaraju sa stvarnom primjenom u smislu da se gustoća netkanog tekstila koja se postiže iglanjem dalje povećava postupcima kalandriranja netkanog pusta, smuđenjem površine i nanošenjem filma za finu filtraciju.

Vrijednosti prekidne sile mjerene na uzorcima u smjeru stroja bile su veće od vrijednosti mjerenih u smjeru križnog polaganja. Kod uzoraka jednake duljinske mase vlakana uočeno je povećanje prekidne sile u oba smjera povećanjem površinske mase. Vrijednosti prosječne prekidne sile u smjeru stroja bile su najveće kod uzo-

raka izrađenih od vlakana finoće 12 den, a najmanje kod onih izrađenih od finoće vlakana 3 den, dok su prosječne vrijednosti prekidne sile u smjeru križnog polaganja bile najveće kod uzoraka izrađenih od vlakana finoće 6 den. Ukupno gledajući, vrijednosti čvrstoće (prekidne sile) i propusnosti zraka koje su dobivene za izrađeni netkani tekstil bile su u skladu s potrebnim vrijednostima za primjenu u industriji.

Slijedio je i teoretski pristup temeljen na Darcyjevom zakonu pri čemu su strukturni parametri: površinska masa, debljina netkanog tekstila i promjer vlakana koristili za predviđanje stvarne propusnosti zraka netkanih medija. Statistički modeli određeni za predviđanje stvarne propusnosti zraka netkanih medija omogućili su dobru korelaciju između stvarnih i teoretskih propusnosti. Vrijednosti teoretske propusnosti nekih ispitnih uzoraka pokazale su odstupanja od vrijednosti stvarne propusnosti. Da bi se povećala preciznost, empirijski model predviđanja može se modificirati boljom kontrolom poroznosti netkanog tekstila tako da se kontroliraju procesi proizvodnje, tj. kalandriranje. Razvijeni statistički modeli su korisni za predviđanje stvarne propusnosti zraka iglanog netkanog tekstila s izborom odgovarajuće duljinske mase vlakana i površinske mase netkanog tekstila za industrijske namjene.

Autor se zahvaljuje Grupi Hassan, koja ga je za izradu ovoga rada opskrbila potrebnim sirovinama, nadalje, Centru u Istanbulu za ispitivanje i razvoj tekstila i odjeće, koji mu je omogućio izradu uzoraka od netkanog tekstila, kao i Ekoteks laboratoriju za obavljanje eksperimenata propusnosti zraka. (Preveo M. Horvatić)

*Autor se zahvaljuje Cemü Meleku i Ibrahimu Diku za njihovu pomoć u eksperimentalnom radu.*

#### Literatura:

[1] Atwal M.S.: Factors Affecting the Air Resistance of Nonwoven Needle-punched Fabrics, *Textile Re-*

*search Journal* 57 (1987) 10, 574-579

- [2] Anandjiwala R.D., L. Boguslavsky: Development of Needle-punched Nonwoven Fabrics from Flax Fibers for Air Filtration Applications, *Textile Research Journal* 78 (2008) 7, 614-624
- [3] Kothari V.K., A. Das, S. Singh: Filtration Behaviour of Woven and Nonwoven Fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research* 32 (2007) 214-220
- [4] Grzybowska-Pietras J., J. Malkiewicz: Influence of Technologic Parameters on Filtration Characteristics of Nonwoven Fabrics Obtained by Padding, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 15 (2007) 5-6, 82-85
- [5] Rawal A.: Effect of Dynamic Loading on Pore Size of Needle-punched Nonwoven Geotextiles, *Journal of the Textile Institute* 99 (2008) 1, 9-15
- [6] Lawrence C.A., P. Liu: Relation of Structure, Properties and Performance of Fibrous Media for Gas Filtration, *Chemical Engineering & Technology* 29 (2006) 8, 957-967
- [7] Yeo S.Y. et al.: Design of Filter Bag Media with High Collection Efficiency, *Journal of Materials Science* 42 (2007) 8040-8046
- [8] Patanaik A., R.D. Anandjiwala, L. Boguslavsky: Development of high efficiency particulate absorbing filter materials, *Journal of Applied Polymer Science* 114 (2009) 1, 275-280
- [9] Kothari V.K., A. Das, A. Sarkar: Effect of processing parameters on properties of layered composite needle-punched nonwoven air filters, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 32 (2007) 2, 196-201
- [10] Das A., R. Alagirusamy, K.R. Nagendra: Study on needle-punched nonwoven fabrics made from shrinkable and non-shrinkable acrylic blends, Part III: Filtration Characteristics, *Journal of the Textile Institute* 102 (2011) 2, 93-102
- [11] Rawal A.: A Cross-plane permeability model for needle-punched nonwoven structures, *Journal of the Textile Institute* 97 (2006) 6, 527-532
- [12] Zobel S. et al.: Simulating permeability of 3D calendered fibrous

- structures, *Chemical Engineering Science* 62 (2007), 6285-6296
- [13] Sundaramoorthy S., P.K. Nallampalayam, S. Jayaraman: Air permeability of multilayer woven fabric systems, *Journal of the Textile Institute* 102 (2011) 3, 189-202
- [14] Mohammadi M., P. Banks-Lee: Air permeability of multilayered nonwoven fabrics: Comparison of experimental and theoretical results, *Textile Research Journal* 72 (2002) 7, 613- 617
- [15] Lawrence C.A., X. Shen: An investigation into the hydraulic properties for application in wet-press concrete casting, Part II: Predictive Models for the Water Permeability of Needle-punched Nonwoven Fabrics, *Journal of the Textile Institute* 91 (2000) 1, 61-77
- [16] Carman P.G.: *Flow of Gases through Porous Media*, Butterworth Scientific Publications, London, 1956
- [17] Patanaik A., R. Anandjiwala: Some studies on water permeability of nonwoven fabrics, *Textile Research Journal* 79 (2009) 2, 147-153

## SUMMARY

### Characterization of air permeability behavior of needle-punched nonwoven fabrics

*B. Karaguzel Kayaoglu*

This paper reports on the measured and theoretical air permeability of needle-punched nonwoven fabrics and the characterization of permeability and tensile properties of the produced nonwoven fabrics for air filtration applications. In the present work, air permeability is characterized in terms of fiber linear density, fabric weight per unit area and fabric thickness. Nonwoven samples were produced using staple polyester fibers having 3, 6 and 12 denier linear density which were selected based on the actual industrial applications. The needle punched structures were further consolidated by calendaring at two different temperatures of 180 °C and 210 °C. The measured air permeability values of the samples increased with the increase in fiber linear density. The increase in fabric weight per unit area led to a decrease in air permeability at the same fiber linear density and calendaring temperature. Experimental apparent rate of flow values were correlated with the values of calculated theoretical permeability as permeability coefficient,  $K_{fp}$ . Theoretical permeability is a function of fabric porosity and the calendaring affects the fabric porosity. Therefore the calendaring process had an impact on the accuracy of the proposed prediction model. The statistical evaluation showed that theoretical permeability calculated as a function of mean fiber diameter, porosity and fluid viscosity may be used to predict the actual permeability of the nonwoven filter media. Since the theoretical permeability is a function of fabric porosity, changes in fabric porosity due to calendaring have an impact on the difference between the measured and theoretical permeability values.

**Key words:** needle-punched nonwoven fabrics, air permeability, calendaring process, fabric porosity

*Istanbul Technical University, Textile Technologies and Design Faculty, Istanbul, Turkey*

*e-mail: bkayaoglu@itu.edu.tr*

*Received December 28, 2011*

### Merkmale des Verhaltens der Luftdurchlässigkeit im vernadelten Vliesstoff

Diese Arbeit berichtet über die gemessene und theoretische Luftdurchlässigkeit von vernadelten Vliesstoffen und Charakterisierung von Luftdurchlässigkeit und Zugfestigkeitseigenschaften der hergestellten Vliese zur Luftfiltration. In der vorliegenden Arbeit wird Luftdurchlässigkeit hinsichtlich Faserfeinheit, Stoffgewicht pro Flächeneinheit und Vliesstoffdicke charakterisiert. Vliesstoffmuster wurden aus Stapelpolyesterfasern von linearer Stärke 3, 6 und 12 Denier hergestellt, die basierend auf den tatsächlichen industriellen Anwendungen ausgewählt wurden. Die vernadelten Strukturen wurden durch Kalandrierung bei zwei unterschiedlichen Temperaturen von 180 °C und 210 °C weiter konsolidiert. Die gemessenen Luftdurchlässigkeitswerte der Proben wurden mit zunehmender Faserfeinheit erhöht. Die Erhöhung der Stoffdichte pro Flächeneinheit führte zu einer Verringerung der Luftdurchlässigkeit bei derselben linearen Faserdichte und Kalandriertemperatur. Unsere Proben zeigten entsprechende Durchlässigkeit und Zugeigenschaften in Bezug auf die industrielle Luftfiltrationsanwendungen. Experimentelle Werte der Strömungsgeschwindigkeit wurden mit den Werten der berechneten theoretischen Durchlässigkeit als Durchlässigkeitskoeffizient  $K_{fp}$  korreliert. Theoretische Durchlässigkeit ist eine Funktion der Stoffporosität, und das Kalandern beeinflusst Stoffporosität. Daher beeinflusste das Kalandrierverfahren die Präzision des vorgeschlagenen Vorhersagemodells. Die statistische Auswertung zeigt, dass theoretische Durchlässigkeit errechnet als Funktion des durchschnittlichen Faserdurchmessers, der Porosität und Fluidviskosität verwendet werden kann, um die tatsächliche Durchlässigkeit der Vliesstoff-Filtermedien vorherzusagen. Da das Vorhersagemodell Porosität als eine Funktion verwendete, übten Veränderungen in Stoffporosität infolge des Kalandrierens Einfluss auf die Differenz zwischen den gemessenen und den theoretischen Werten der Durchlässigkeit aus.