

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Kristi Käerner

KAPILLAARNÄHTUSED

POLÜESTERKIUDUDES

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Tarmo Tamm

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri, kuupäev

Tartu 2012

Sisukord

SISSEJUHATUS	3
KIRJANDUSE ÜLEVAADE	4
2.1 Märgumine ja kapillaarnähtused	4
2.11 Märgumine	4
2.12 Kapillaarnähtused	5
2.2 Tekstiili märgumisomadused ja veekindlaks muutmine	5
2.21 Tekstiili märgumisomadused ja vastupanu vedelikele	5
2.22 Tekstiili märgumise uurimine	6
2.23 Tekstiili veekindlaks muutmine	7
2.24 Goretex töötlus paeltel	8
2.25 Polüester materjali omadused	9
2.3 Elektronmikroskoopia	9
2.31 Polüester materjali uurimine skaneeriva elektronmikroskoobiga	10
2.32 Elektronide ja proovi vastastikune toime	10
2.33 Nõrga vaakumi mikroskoopia	11
EKSPERIMENTAALNE ÜLEVAADE	12
3.1 Uurimisobjektid	12
3.11 Struktuur ja mõõtmed	13
3.111 Töötlemata ja töödeldud must polüesterpael	13
3.112 Töödeldud musta/halli ja must/kollase niidiga polüesterpael	14
3.113 Kedratud polüesterlõngast (<i>spun</i>) pael	15
3.2 Meetodi väljatöötamine	16
3.21 Meetodi kirjeldus	16
3.22 Piirjuhud	19
3.23 Juhuslikud efektid	19
3.231 Lisaosakesed paeltel	19
3.232 Juhuslikud lahuselaigud keset paela	20
3.233 Lõikamiskohtade juures lahust rohkem	20
3.3 Meetodi rakendamine	21
3.31 Paelte märgumine	21
3.311 Harilikud tekstureeritud polüesterlõngast paelad	21
3.312 Kedratud polüesterlõngast (<i>spun</i>) pael	23
3.32 Goretex kate	24
3.33 Kulutamine	24
3.331 <i>Spun</i> paela kulutamine	25
KOKKUVÕTE	27
CAPILLARY PROCESSES IN POLYESTER FIBERS	28
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	29

SISSEJUHATUS

Polüester on laialt kasutuses olev sünteetiline materjal. Üks polüestri tootmisvorm - polüesterkiud, on tänapäeva tekstiilitööstuse üheks kasutatavaimaks materjaliks. Tooted varieerivad alates kardinast kuni särkide ja saapapaelteni. Kuigi polüester ise on hüdrofoobne, märguvad sellest valmistatud tooted kapillaarjõudude tõttu ikkagi, seetõttu vajavad tekstiilid täiendavat töötlust veekindluse tagamiseks.

Tekstiilmaterjalide veekindlaks muutmise tehnoloogiaid pärinevad ajast, mil tunti ja kasutati vaid naturaalseid kiude (puuvill, vill, lina jt) ning on ajapikku järjest edasi arendatud. Tuntumaks materjali veekindlust tagavaks kaubamärgiks on Gore-tex. Lisaks erinevatele rõivastele valmistatakse ka veekindlaid jalatseid. Sealjuures on tekkinud tootjatel uus eesmärk - takistada nt matka- ja spordijalatsite paelte vettimist niisketes tingimustes. Arendustööd selliste paelade väljatöötamiseks on teiste hulgas teinud ka Tartus tegutsev OÜ Haine Paelavabrik.

Paelad erinevad oma valmistamistehnoloogia, struktuuri ja väljanägemise poolest ülejäänud tekstiiltoodetest, see mõjutab oluliselt nende märgumisprotsesside olemust. Seetõttu ei saa üks-üheselt kasutada tekstiilide jaoks välja töötatud tehnoloogiad paelte peal. Samas on tegemist mitmes mõttes nišitootega, seetõttu on suurtootjate huvi mahukaks arendustegevuseks piiratud - spetsiaalselt paelte veekindlustamist käsitlevat patente pole välja antud.

Käesoleva töö esmaseks eesmärgiks on välja töötada efektiivne meetod polüesterkiudude ehk antud juhul paelte märgumisprotsesside uurimiseks. Seejärel rakendada meetodit, et analüüsida vedeliku liikumist ning paelte märgumise sõltuvust paeltes järgnevatest teguritest: kiudude mõõtmed, struktuur ja paela punumisstiil. Lisaks uurida kas ja kuidas Haine Paelavabrikus kasutatav *goretex* töötlus omab efekti paela veekindlaks muutmisel ning milline on töötluse vastupanu kulutamisele.

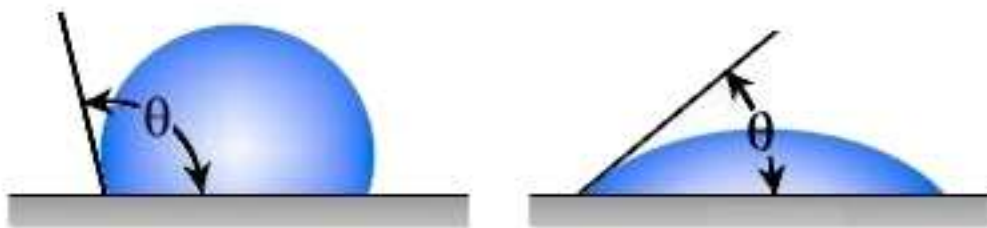
KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1 Märgumine ja kapillaarnähtused

2.11 Märgumine

Märgumiseks nimetatakse protsesse, mis kulgevad kolme faasi (tahke, vedelik ja gaas) kokkupuute piirpinnal ning vähendavad vabaenergiat. Tahke aine ja gaasifaasi piirpinnale asetatud vedeliku tilk võtab pinnal väikseima ruumalaga kera kuju või valgub laiali.

Süsteemis tahke-vedelik-gaas on kolm piirpinda: tahke aine – gaas, gaas – vedelik ja vedelik – tahke aine, mida iseloomustavad vastavad pindpinevused. Nurka, mis tekib kolme faasi kokkupuutepunktist vedeliku ja gaasi vahelisele piirpinnale tõmmatud puutuja ja tahke faasi pinna vahel, loetuna vedeliku sees, nimetatakse äärenurgaks θ (joonis 1).



Joonis 1: tahke aine- vedelik-gaas äärenurk [1].

Pindpinevus tahke aine-gaas piirpinnal püüab tilka kokku tõmmata, sest siis on vastav pind kõige väiksem ja ka vastava pinna energia kõige väiksem. Tahke aine-vedelik pinnaenergia püüab isevooluliselt tilka laiali tõmmata. Pindpinevus vedelik- gaas piirpinnal on määratud kohesioonijõududega, s.t. molekulidevaheliste tõmbejõududega faasi sees. Summaarsest efektist sõltub tilga kuju [2].

Kohene märgumine on vee liikumine üle tahke aine pinna saavutamaks termodünaamilist tasakaalu. Sunnitud märgumine korral viiakse tahke aine- vedeliku piirpind tasakaalust välja väliste hüdrodünaamiliste- või mehaaniliste jõududega [3].

2.12 Kapillaarnähtused

Kapillaarnähtused esinevad kapillaarides ja poorsetes kehaosades, milles pooride läbimõõt on võrreldav vedelikupinna kõverusraadiusega. Kapillaarnähtus on defineeritav kui vedeliku liikumine või voolamine sõltuvalt piirpinna jõududest vedeliku pinna ja ümbritsevate kapillaaride, pragude ja tühimike vahel. Pindpinevus faaside piirpinnal on määratud molekulidevaheliste jõududega : kohesiooni ja adhesiooniga. Vedeliku liikumine mööda kapillaari tekib kui adhesioonijõud vedeliku ja kapillaari seina vahel on suuremad kohesioonijõududest vedeliku molekulide vahel. Voolamine suureneb, kui rõhkude vahe muutub võrdseks nulliga [4,5].

2.2 Tekstiili märgumisomadused ja veekindlaks muutmine

2.21 Tekstiili märgumisomadused ja vastupanu vedelikele

Teooria vedelike liikumise kohta nii kitsastes, suletud ning katkematutes kapillaarides on hästi välja arendatud [6,7]. Vedelike liikumise teooria töötasid teineteisest sõltumatult välja Lucas 1918. aastal ja Washburn 1921. aastal. Sellest ajast alates on aktiivselt uuritud ka selle teooria paikapidavust tekstiilides. Kapillaarset tõusu kiulistest struktuurides kirjeldab paralleelsete kapillaaride arv materjalis [8]. Vedelik liigub mööda kiulise materjali lineaarseid poore, mis on kirjeldatav kui kapillaarnähtus. Kuigi pael on samuti kiuline struktuur, erineb ta siiski oluliselt teistest tekstiilitoodetest. Esiteks valmistamistehnoloogia - paelu mitte ei koota nagu kangaid, vaid punutakse või keerutatakse kokku niitide kogumikest, mille arv sõltuvalt paelast varieerub. Seetõttu on kiudude paiknemine paeltes oluliselt kaootilisem. Lisaks võib pael olla ümara struktuuriga ning võib sisaldada punutud või punumata sisu. Sõltuvalt neist omadustest erinevad paela märgumisprotsessid teiste tekstiilitoodete omadest.

Vastupanu veele sõltub kiu struktuurist, pooride suurusest ja kokkupuutava vee dünaamilistest jõududest. Tekstiile saab sõltuvalt vastupanust veele jaotada kolme liiki: märguvad, mittemärguvad ning veekindlad.

Märguvad tekstiilid imavad veega kokkupuutel vedelikku endasse. Mittemärgumise korral rulluvad veetilgad pärast materjali vette kastmist sellelt maha. Mittemärguvad kangad lasevad läbi õhku ja veeauru ning väga kõrge hüdrostaatilise rõhu korral ka vett. Veekindlad materjalid on vastupidavamad vee läbitungimisele olulisemalt suuremate hüdrostaatiliste rõhkude korral kui mittemärguvad [9].

Lisaks veele uuritakse tekstiilide vastupanu määrdumisele teiste vedelike poolt. Materjalide määrdumise põhimõte on sarnane märgumisele. Selleks, et pidada tekstiili määrdumiskindlaks, ei tohi vedelikud selles imbuda. Põhilisteks tekstiilide määrdumist põhjustavateks vedelikeks on erinevad õli-baasil ained [9].

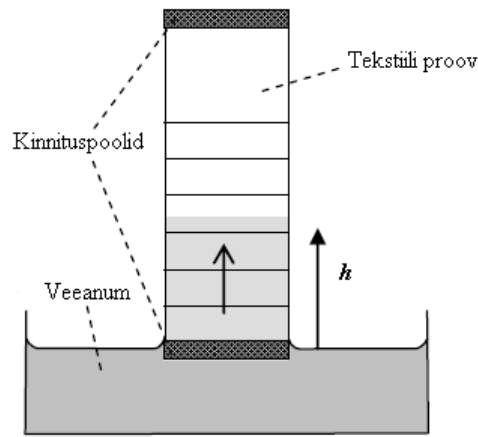
2.22 Tekstiili märgumise uurimine

Vedeliku liikumist tekstiilides on uuritud erinevate meetodite abil. Meetodid põhinevad kolmel erineval märgumise viisil:

- (a) Substraadi täielik lahusesse sukeldamine- mõõdetakse aeg, mis kulub terve proovi märgumiseks.
- (b) Vedeliku imendumine piiramatu veehulgaga anumast - tekstiilitüki üks osa kastetakse lahusesse ning mõõdetakse kapillaarse tõusu kõrgust või imendunud vedeliku massi.
- (c) Piiratud vedeliku koguse (näiteks vedelikutilk) imendumine - tilgutatakse kindel hulk vedelikku materjalile ning võetakse aeg, mis kulub sellel tekstiili imbumiseks või mõõdetakse ala, mis on kaetud laialivalgunud tilga poolt.

Esimene meetod on küll lihtne ja kiire, kuid teaduslikes uuringutes harva kasutatav, sest ei anna piisavat teavet pooride struktuuri ega märgumisprotsessi kineetika kohta. Teised kaks meetodi on teadlaste poolt laialt kasutuses, sest annavad olulist infot ning jälgendavad mitmeid järjest enam levivaid tööstuslikke protsesse [10].

Rakendusnäitena võib täpsemalt kirjeldada ühte laialt kasutuses olevat meetodit. Tekstiili märgumisprotsesside uurimiseks lõigatakse materjalist välja 2 cm laiused ja 10 cm pikkused tükid. Olulise on jälgida, et proovitükkide lõikamine toimuks kindlas suunas (lõimes või koes), sest anisotroopses materjalis toimub vedeliku liikumine erinevalt. Katsetes kasutatakse erinevate materjalide tükke ning viiakse läbi tingimustes, kus suhteline õhuniiskus on 65 ± 6 % ning temperatuur 20 ± 2 °C. Märgumise uurimiseks mõõdetakse kapillaarsest tõusu, selleks asetatakse proovid destilleeritud veega anumasse, kuhu on lisatud paremaks visualiseerimiseks värvainet. Värvaine ise tekstiili ei mõjuta. Eksperimendi põhimõtteskeem on toodud joonisel 2 [3].



Joonis 2: Vertikaalse märgumise seade

Materjalile joonistatakse sentimeetriste vahedega 6 fondi joont, igakord kui vedelik ületab mõnda joont, märgitakse aeg. Proovi alumisse ning ülemisse otsa kinnitatakse poolid, mis hoiavad materjali pinges katse ajal. Oluline on jälgida alumise pooli massi, et see ei mõjutaks kapillaarset geomeetriat. Märgumist erinevate materjalide lõime ja koe suunas hinnatakse, võrreldes märgumispiiri kõrgust (h) aja (t) jooksul [3].

2.23 Tekstiili veekindlaks muutmine

Tekstiilmaterjalide veekindlaks muutmise tehnoloogiaid (ingl.k. water-proofing) pärinevad ajast, mil tunti ja kasutati vaid naturaalseid kiude (puuvill, vill, lina jt) ning on ajapikku järjest edasi arendatud. Ühe lahendusena kantakse hüdrofoobset ainet (nt vaha) tekstiili pinnale ning lisaks täidetakse ka poorid, tänu sellele ei lase need materjalid läbi ka õhku ja veeauru. Vaha suurimaks miinuseks on vähene kestvus ning lahustumine puhastusvahenditena kasutatavates ainetes. Pesemisele ja puhastamisele peavad paremini vastu silikoonil põhinevad katted. Kõige kauem kestavad aga fluoreeritud süsivesinike sisaldavad katted. Lisaks veepidavusele on võimalik polüsiloksaanidel ja fluoreeritud süsivesinikel põhinevate katete spetsiaalsete pealekandmise tehnikate või neist ainedest valmistavate lisakihtide (laminaat) abil tagada ka tekstiilile hingavuse säilitamise, mistõttu ongi sellised katted viimasel paarikümnel aastal enim kasutust leidnud [9].

Tuntumaks materjali veekindlust ning samaaegselt hingavust lubavaks kaubamärgiks on Gore-tex (W. L. Gore and Associates), mille toime põhineb poorse polütetrafluoroetüleenil [11] ning mille algne versioon patenteeriti juba 1976 a. Gore-tex mõistet kasutatakse tänapäeval sageli (ebakorrektselt) ka teiste analoogiliste materjalide ja töötluste kohta.

3M on olnud üks juhtivaid veekindlaks töötlemise kemikaalide tootjaid. Teisteks analoogsete kemikaalide toojateks on näiteks Bayer AG ja Tanatex Chemicals Paraku ei ole nende pakutavate kemikaalide täpne koostis, aktiivse toimeaine keemiline olemus ega sageli ka täpne sisaldus avalikustatud. Üldjoones koosnevad niisuguste kemikaalide toimeained suhteliselt lühikesest fluoriga küllastatud (perfluoreeritud) süsinikahelast ning polaarsest rühmitusest selle otsas, mis võimaldab toimeaine molekuli (vesi)lahusesse viia ning siduda selle (keemiliselt või füüsiliselt) aluspinnaga.

On teada, et keskkonnakaitseliste probleemide tõttu on paljud tootjad üle läinud perfluorooktüülsulfonaadi, perfluorooktüülsulfoonamiidide ning perfluorooktaanhappe kasutamisel lühemate süsinikahelatega analoogidele, nagu nt perfluorobutüülsulfonaat või mõni analoogiline sulfoonamiin, mille bioakumuleeruvus on väiksem [12].

Veekindlate töötluste viise on uuritud ka veidi teistsugustes suundades, näiteks polüester materjali pinna töötlus madala temperatuuriga plasma (ingl. k Low Temperature Plasma (LTP)) abil ning avastatud, et sellisel viisil materjali lamineerimine nt alumiiniumi või vasega takistab märgumist, muutmata sealjuures tekstiili visuaalset välimust, füüsilisi omadusi ja tugevust [13].

Tekstiilmaterjalide veekindluse parandamiseks tehakse tänapäevalgi pidevat arendustööd millest annavad tunnistust rohked patenditaotlused selles valdkonnas. Patenditaotlusi on tehtud küll erinevate kangaste veekindlaks muutmise valdkonnas, kuid puudub info sarnasest tegevusest paelte osas.

2.24 Goretex töötlus paeltel

Goretex töötlus ning materjalid on edukalt taganud tekstiilide veekindluse, mistõttu on neid veekindlaks muutmise tehnoloogiad hakatud kasutama erinevates valdkondades, sealhulgas spordi- ja matkajalatsite valmistamisel. Tänu sellele on tekkinud tootjatel ning tarbijatel soov, et ka jalatsitel kasutatavad paelad vastaksid veekindlus nõuetele. Sealjuures on tingimus, et töödeldud pael ei erineks väliselt töötlemata paelast. Arendustööd selliste paelade väljatöötamiseks on teiste hulgas teinud Tartus tegutsev OÜ Haine Paelavabrik. Kuivõrd spetsiaalseid paeltele mõeldud kemikaale turul ei leidu, siis rakendatakse muude materjalide (kootud tekstiilid, aga isegi ka puit ja kivi) veekindlustamiseks mõeldud kemikaale.

OÜ Haine Paelavabrikus teostatav polüesterpaela *goretex* töötlus koosneb järgmistest etappidest:

- Paelad pannakse immutatakse kemikaalide lahuses 40 °C juures 30 min .
- Paelad tsentrifugeeritakse üleliigse vedeliku eemaldamiseks (600 p/min)
- Paelad kuivatatakse õhu käes.
- Katte kinnitamiseks hoitakse paelu kuivatuskapis 150 °C juures ligikaudu 20 min.

Goretex paela kvaliteeti iseloomustatakse veekindlusega, mida testitakse üldjoones järgmisel meetodil:

Paela otsa riputatakse 1,5 kg raskus(võib varieeruda sõltuvalt kulutamisnurgast ning metallrõnga diameetrist) seejärel kulutatakse paela läbi metallist rõnga edasi-tagasi tõmmetega 50x ühelt poolt ja 50x teiselt poolt, ümmargust paela lihtsalt 100x. Pärast kulutamistsükleid asetatakse paela ots 2,5cm sügavusele vee alla ning kontrollitakse 2h möödudes, et märgumise piir ei asuks kõrgemal kui 1cm veepiirist [14].

2.25 Polüestermaterjali omadused

Polüesterkiud on suhteliselt vastupidavad erinevatele ainetele, vaid tugevate hapete või alustega töötlemisel materjali keskmine ahelapikkus muutub lühemaks, tuues kaasa ka polüesterkiu diameetri vähenemise [15].

Polüesterkiud on hüdrofoobne. Tavatingimustes on polüesterkiu niiskuseimavus ligikaudu 0,4 %. Märja ja kuiva kiu venivusomadused on sarnased, kuid vähese niiskuse sisalduse korral tekivad materjalis staatilised pinged, mis mõjutavad töödeldavust [16].

Polüestertekstiilides esinevad kiudude vahele kapillaarid, mis muudavad materjali hüdrofiilsemaks [3].

2.3 Elektronmikroskoopia

Optiliste mikroskoopide lahutusvõime piir on umbes valguse lainepikkusega samas suurusjärgus ehk ligikaudu 300 nm. Olulisemalt suuremat lahutusvõimet on võimalik saada, kui kasutada nähtava valguse asemel elektrone .

Elektronmikroskoopia suur eelis teiste mikroskoopia liikide ees on konkurentsilt parim sügavusteravus, mis võimaldab saada ruumilist kujutist. Samuti võimaldab näiteks skaneeriv elektronmikroskoop väga laias vahemikus suurendust – alates 10x kuni enam kui 500 000x, mis ületab mitmeid sadu kordi parimate valgusmikroskoopide suurenduse.

Elektronmikroskoopides on vajalik kasutada vaakumit, sest elektronid hajuvad õhus tugevalt. Samuti peavad elektronmikroskoobi ülesvõttel näidised juhtima elektrit, vähemalt pinnalt ning lisaks olema maandatud, vältimaks staatilise elektri kogunemist [17].

2.31 Polüestermaterjali uurimine skaneeriva elektronmikroskoobiga

Polüestermaterjalid ei ole elektrit juhtivad, tänu sellele kipuvad nad skaneeriva elektronmikroskoobiga uurimisel laaduma. Sellise olukorra vältimiseks tuleks proovid katta elektrit juhtiva kihiga, mis on aga aeganõudev tegevus ning ei anna igakord soovitud tulemust. Mõnedes SEM-ides kasutatakse lihtsama võimalusena nõrka vaakumit proovikambris.

Materjali uurimisel kasutatakse peamiselt kahte režiimi: sekundaarelektronide režiimi topograafia vaatlemiseks ning tagasipeegeldunud elektronide režiimi aatomkontrastiga koostise informatsiooni saamiseks [17].

2.32 Elektronide ja proovi vastastikune toime

Skaneerivas elektronmikroskoobis kiirendatakse elektrone kuni 50 kV-ses elektriväljas. Elektronkimp fokuseeritakse proovi pinnal väiksesse täppi, diameeteriga ligikaudu 0,4–10 nm. Primaarelektronid interakteeruvad objekti pinnakihtidega erinevatel viisidel. Ala, kus toimub vastastikune toime ning kust saadakse erinevaid signaale, nimetatakse interaktsioonikihi. Interaktsioonikihi paksus sõltub elektronide energiast ning uuritava proovi aatomnumbrist ja materjali tihedusest.

Proovi pinna ja elektronide vastastikmõju tõttu peegelduvad materjalist kõrge energiaga elektronid (peegeldunud e hajunud elektronid) välja lüüakse ka madala energiaga sekundaarelektrone ja Augeri elektrone. Lisaks tekib elektronide pidurdumisel aatomites röntgenkiirus, aatomite madalamate tasemete elektronide ergastamisel ka karakteristiklik röntgenkiirus [18].

Sekundaarsete elektronide arv sõltub proovi pinna topograafiast, koostisest ja kristallstruktuurist. Hajunud elektronide hulk sõltub materjalist – mida suurem on materjali aatommass, seda rohkem elektrone tagasi peegeldatakse [19].

2.33 Nõrga vaakumi mikroskoopia

Kasutades SEM-is nõrga vaakumi režiimi (põhimõtteskeem toodud joonisel 3), tekitatakse proovikambris rohkem gaasimolekule. Gaasimolekulid (M) põrkuvad elektronkiirega, luues positiivseid ioone (+) ja elektrone (e). Seejärel neutraliseeritakse positiivsed ioonid (+) proovipinnal olevate lisaelektronide poolt (-). Sellise meetodi abil on võimalik uurida elektrit mittejuhtivaid proove, sest pinnal olevad lisaelektronid eemaldatakse, vähendades laadumise efekti oluliselt [20].

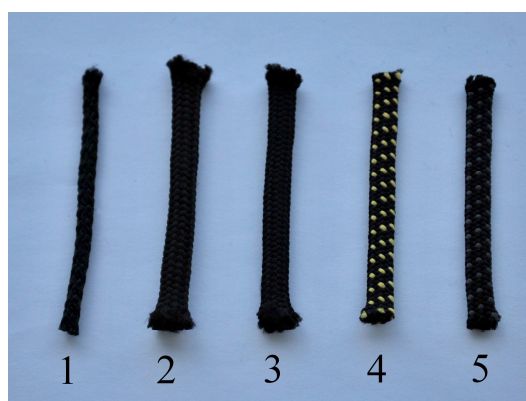


Joonis 3: Nõrga vaakumi mikroskoopia põhimõtteskeem

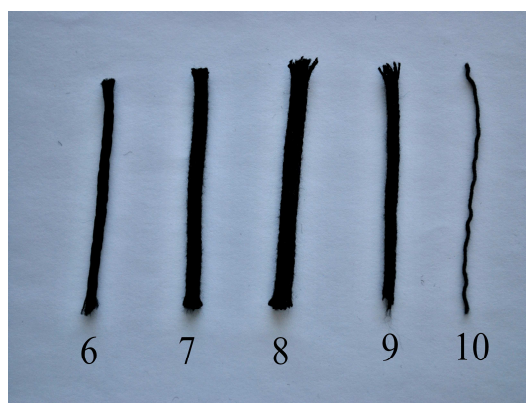
EKSPERIMENTAALNE ÜLEVAADE

3.1 Uurimisobjektid

Uurimisobjektideks olid OÜ Haine Paelavabriku kahte liiki polüesterpaelad: harilikud tekstureeritud polüesterlõngast (PE) paelad (joonis 4) ning kedratud polüesterlõngast (*spun*) paelad (joonis 5). Lisaks jagunevad paelad: erineva niidi värvusega, sisuga ja sisuta, töötlemata ja *goretex* töötluusega paelad. Viimasel juhul on tingimuseks, et töödeldud pael ei erineks väliselt töötlemata paelast.



Joonis 4: OÜ Haine Paelavabriku harilikud tekstureeritud polüesterlõngast (PE) paelad. Üleni musta värvi töötlemata (1-2) ja *goretex*-töötluusega (3) PE paelad olid sisuga, töödeldud musta/kollasega (4) ja musta/halliga (5) paelad aga ilma sisuta.

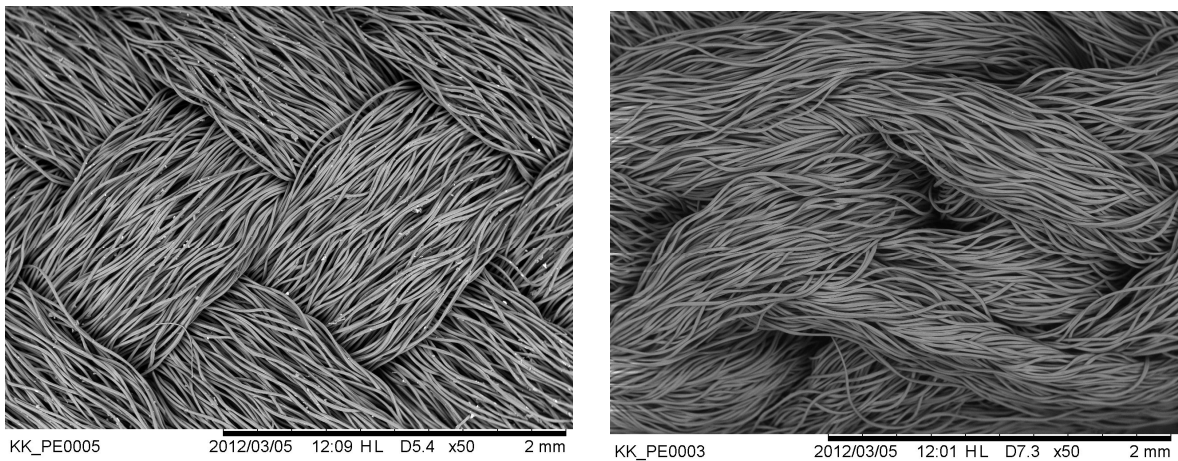


Joonis 5: OÜ Haine Paelavabriku kedratud polüesterlõngast (*spun*) paelad. Töötlemata *spun* paelad: sisuga (7) ning sisuta (8), *goretex*-töötluusega sisuga *spun* pael (9). Mõne paela paela sisu (6) võib olla punutud rohkematest niitidest kui teise paela sisu (10).

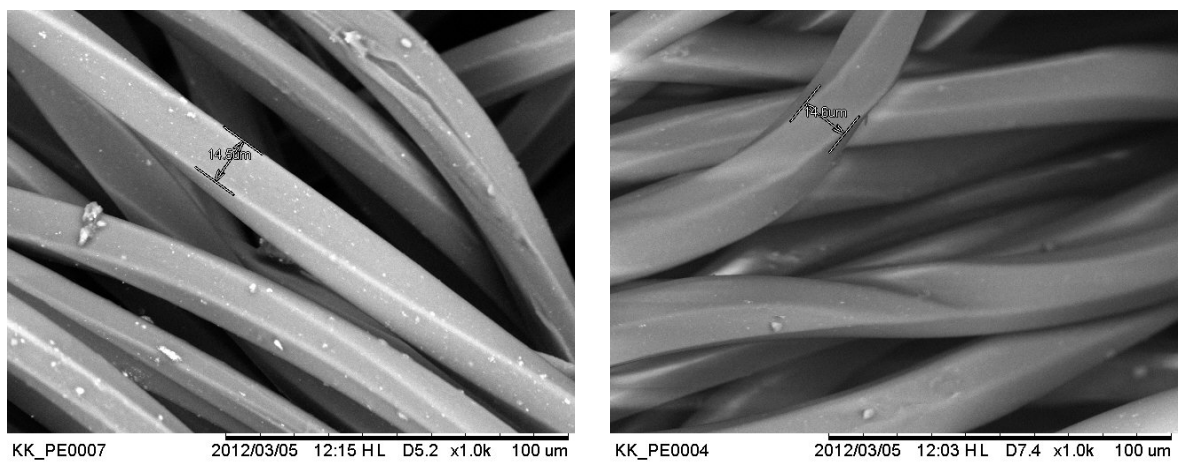
3.11 Struktuur ja mõõtmed

3.111 Töötlemata ja töödeldud must polüesterpael

Töötlemata ja töödeldud üleni musta niidiga paelte ümbrise ning sisu kiud on ristlõikelt ruudukujulised ning servapikkusega keskmiselt 15 μm (joonis 7). Paela ümbris on korrapäraselt punutud, sisu on vaid õrnalt keerdunud (joonis 6).



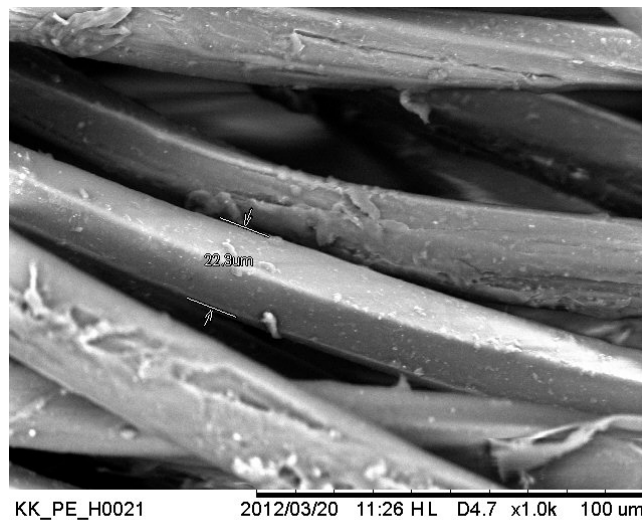
Joonis 6: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograafid musta polüesterpaela struktuurist: ümbris (vasakul) ja sisu (paremal).



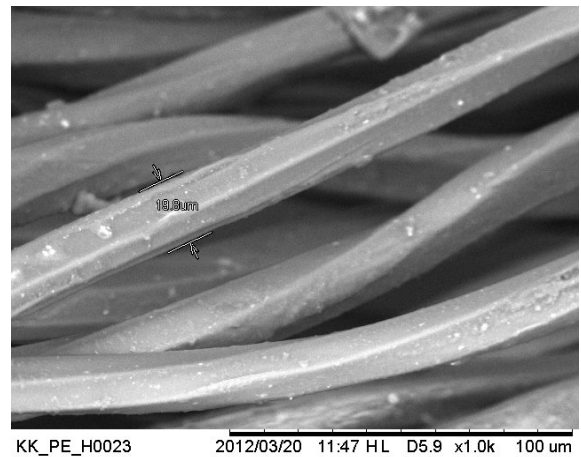
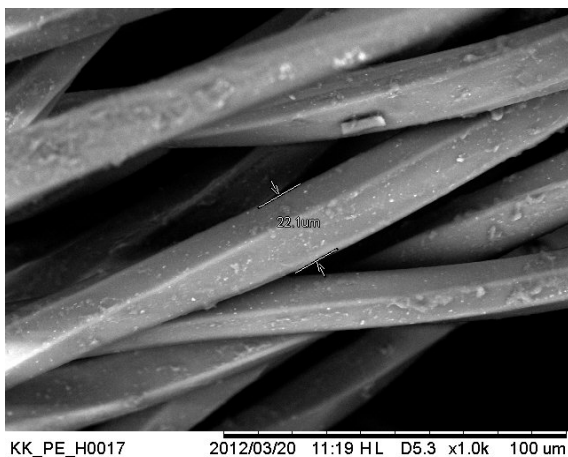
Joonis 7: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1000-kordse suurendusega mikrograafid musta polüesterpaela kiu struktuurist ja mõõtmetest: ümbris (vasakul) ja sisu (paremal).

3.112 Töödeldud musta/halli ja musta/kollase niidiga polüesterpael

Töödeldud musta/halli ja musta/kollase polüesterpaela struktuuri ja mõõtmete analüüsimiseks harutati paelast lahti erinevat värvi niitude kogumikud (must, hall ja kollane) ning uuriti neid SEM-iga eraldi. Kõik erivärvi niidid olid risküliku kujulise ristlõikega. Must ja hall niit keskmise diameetriga 23 μm , kollase niit $\sim 20\mu\text{m}$. Mikrograafidelt on ka näha (joonis 8, 9) filamentidel krobelist pinda ehk goretex katet.



Joonis 8: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1000-kordse suurendusega mikrograafid töödeldud üleni musta polüesterniidi mõõtmetest ja struktuurist.

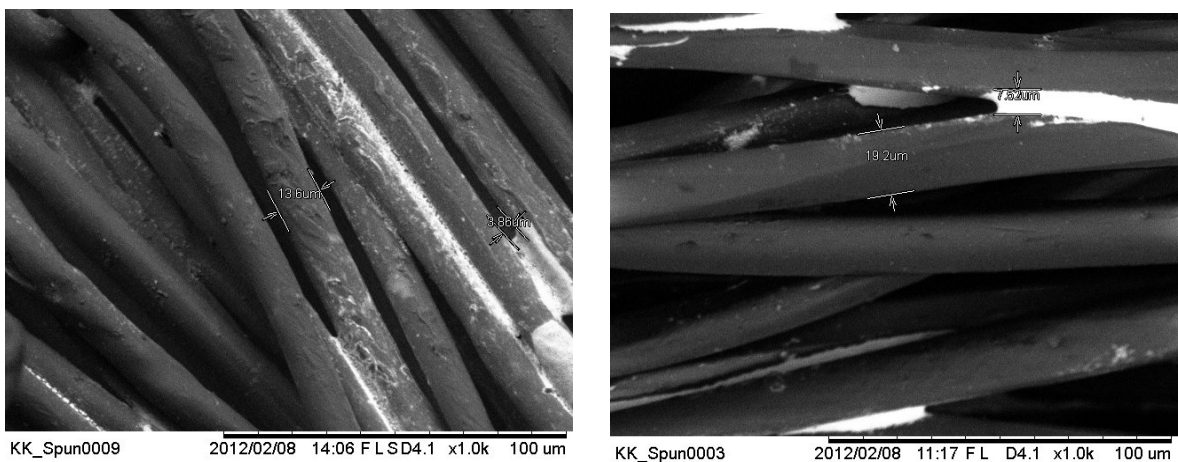


Joonis 9: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1000-kordse suurendusega mikrograafid töödeldud musta/halli ja musta/kollase niidiga polüesterpaelte mõõtmetest ja struktuurist: hall niit (vasakul) ja kollane niit (paremal).

3.113 Kedratud polüesterlõngast (*spun*) pael

Kedratud polüesterlõngast paelte eripäraks on niinimetatud „karvakesed“ paela pinnal, mille eesmärgiks on tekitada efekt nagu oleks *spuni* puhul tegemist puuvillase paelaga.

Spun paela ümbrise ja sisu kiud on erineva kuju ja mõõtmetega (joonis 10). Ümbriseks kasutatav paela kiud on ümmarguse ristlõikega ning keskmiselt 13- 15 μm diameetriga, ümbrisel olevate „karvakeste“ diameeter on ligikaudu sama suur. Kiudude vaheliste kapillaaride läbimõõt, kuhu lahus kinnituda saab, on $\sim 4 \mu\text{m}$. Sisu on aga tahulise struktuuriga ning keskmine kiudude diameeter on 18-20 μm .



Joonis 10: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1000-kordse suurendusega mikrograafid *spun* paela kiu struktuurist ja mõõtmetest: ümbris (vasakul) ja sisu (paremal).

3.2 Meetodi väljatöötamine

Kuivõrd pael pole lõngast kootud kangas vaid niitide kimpudest punutud struktuur, on ka paela märgumisomadused tekstiiliga võrreldes erinevad. Kuivõrd kirjandusest ei õnnestunud leida meetodikat polüesterpaelte märgumisprotsesside uurimise kohta, oli vajalik luua tõhus meetod vee liikumise jälgimiseks paeltes. Lähtuti põhimõttest, et paeltes kui kiulistes struktuurides on märgumine põhjustatud kapillaarjõudude poolt. Järelikult saab antud meetodi väljatöötamisel lähtuda ühest tekstiili märgumise uurimiseks enim kasutatavat meetodist - kapillaarse tõusu mehhanismist.

Esmaseks ülesandeks oli leida viis paelte struktuuri uurimiseks ning märgumise visualiseerimiseks paeltes. Mikrotasemel efektide uurimiseks tuli kasutada mikroskoopiat ning valik langes elektronmikroskoopiale sõltuvalt heale sügavusteravuse ning lahutusvõimele. Tänu heale sügavusteravusele võimaldab skaneeriv elektronmikroskoopia võimaldab üsna lihtsalt uurida paelte kiu struktuuri ning kuju, kuid märgumise analüüsimisel tekib kaks suuremat probleemi. Esiteks ei teki piisavat elektronmikroskoopilist kontrastierinevust polüesterkiudude ja veekihi vahel, teiseks (ja peamiseks probleemiks) pole alarõhu tõttu elektronmikroskoobi kambris võimalik tuvastada lenduvaid aineid, sealhulgas vett. Tuli leida uus aine (lahus), mis käituks puhta vee sarnaselt ning oleks SEM-i abil tuvastatav. Katsetamiste tulemusel leiti vee asendajaks sobib tugevasti lahjendatud (1%) CsOH vesilahus. Tseesiumi aatomid, võrreldes polüestris leiduvate süsiniku, vesiniku ja hapniku aatomitega, on piisavalt erineva aatommassiga ning kuna tagasipeegeldunud elektronide režiimis salvestatud SEM-i mikrograafidel paistavad suurema aatomnumbriga molekulid heledamalt, on sel viisil võimalik analüüsida märgumisprotsesse.

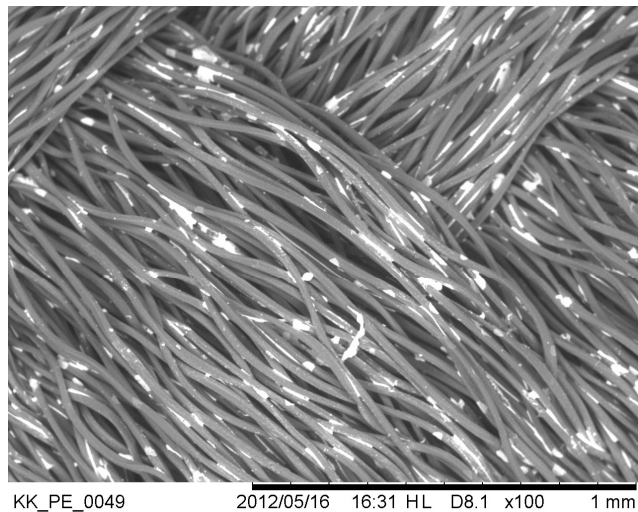
Katsete tulemusel määratleti täpsed tingimused, mis tagavad reprodutseeritavate tulemuste saamise ning vähendavad miinimumini juhuslike tegurite mõju. Lisaks kaardistati mitmesuguseid juhusliku päritoluga efekte, et tagada tulemuste korrektne interpreteerimine.

3.21 Meetodi kirjeldus

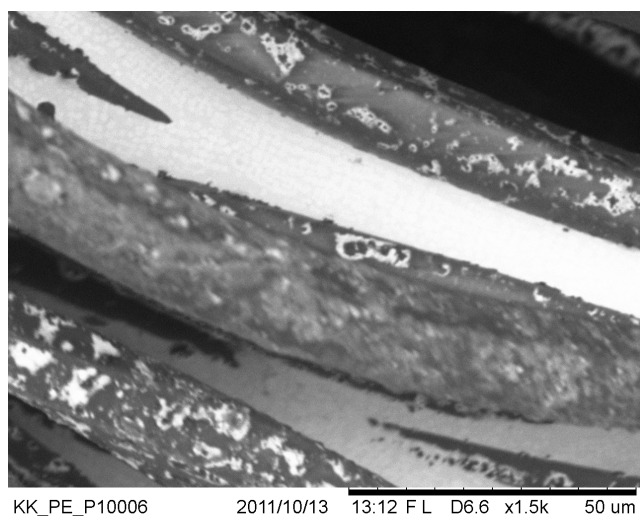
Polüesterpaelte märgumisprotsesside uurimiseks töötati välja kaks meetodit: esialgne ning täiendatud. Täiendused aitasid parandada reprodutseeritavust ning vältida esialgse meetodi süstemaatilisi vigu.

Esiialgne meetod seisnes selles: 150 ml ruumalaga keeduklaasi valati ligikaudu 1 cm kõrgune 1 % CsOH lahuse kiht, paeltest lõigati ligikaudu 5 cm jupid, seejärel võeti paelte ühest otsast kinni, teine ots asetati anumasse ning lasti vedelikul mööda paela tõusta.

Seejärel kinnitati paelad kleeplindi abil eraldi klaasplaatidele ning pandi vaakumahju kuivama 40 kraadi juures jääkrõhuni 3 mbar, misjärel analüüsiti proove IMS Labori skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) Hitachi Analytical Tabletop Microscope TM-3000 nõrga vaakumi seades. Sellisel meetodil aurustub vesi vaakumahjus ning CsOH märgib kohti, mis olid lahusega kokkupuutes. Joonistel 11 ja 12 olevatel mikrograafidel on näha CsOH-ga „ilmutatud”, märgunud pael ning kapillaarid.

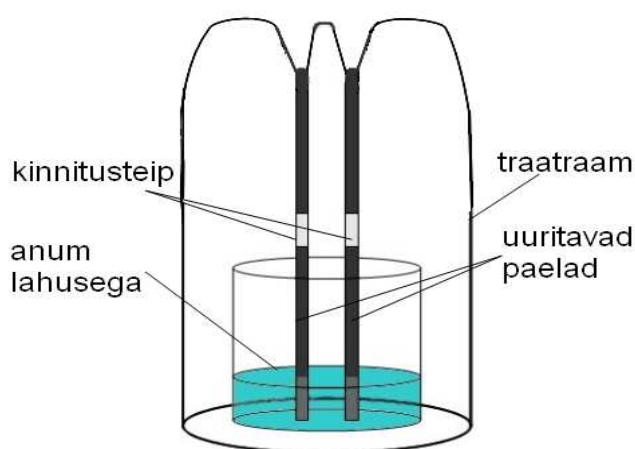


Joonis 11: Goretex töötlusega tekstureeritud polüesterlõngast paela märgumine “ilmutatuna” CsOH-ga. Skaneeriva elektronmikroskoobi 100-kordse suurendusega mikrograaf. Valgekirjud kiud on märgunud, tumedad märgumata.



Joonis 12: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1500-kordse suurendusega mikrograaf musta polüesterpaela sisu CsOH- lahusega täidetud kapillaarist.

Analüüsid esmase meetodi abil tehtud katsete tulemusena saadud mikrograafe märgati, lahuses olnud kiudude ebahühtlast CsOH katet. Selline olukord tekib arvatavasti lahusest võetud paela klaasplaadile asetamisest – klassi pinnale tekib lahusetilk, mis kandub paela algusosa ning tagumisele küljele. Leiti, et oleks mõistlik konstrueerida paelte riputussüsteem (joonis 13), mille eelisteks oleks: võimalus paelad samaaegselt lahusesse kasta ning pärast välja võtta - paelad on lahuses täpselt sama aja, liigne lahus tilgub tagasi. Lisaks on võimalik paelad vertikaalselt koos traadist alusega vaakumahju kuivama panna.



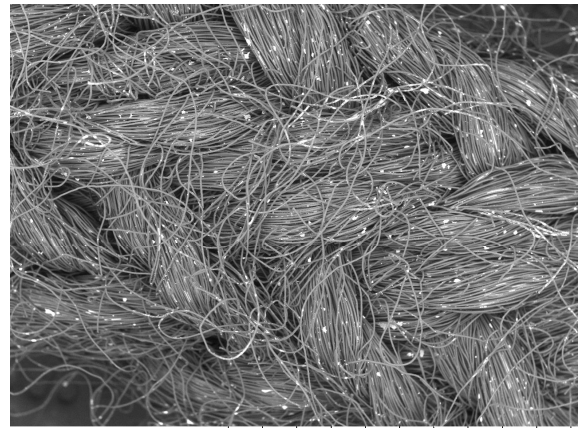
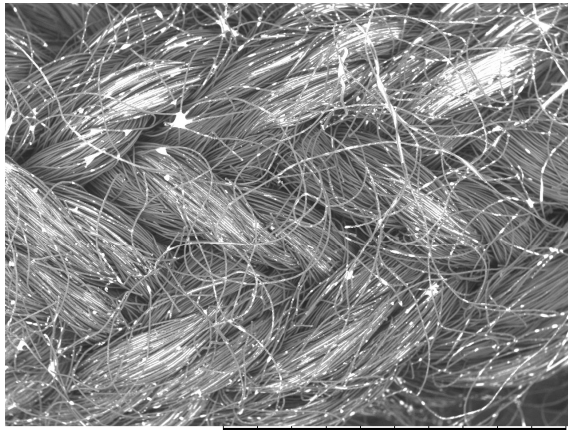
Joonis 13: Riputusseadmega meetodi põhimõtteskeem

3.22 Piirjuhud

Metoodi väljatöötamisel uuriti piirjuhte ning nende analüüsimisel määratleti täpsed parameetrid, mis tagavad korratavate tulemuste saamise.

Esmast meetodit välja töötades tuvastati juhuseid, mil pael oli üleni kaetud pisikeste CsOH täpikestega, see viitab kuivatusahju liiga kõrgele kuivatustemperatuurile (üle 40°C). Sellisel juhul hakkab CsOH-lahus vaakumahjus keemia ning paiskab CsOH osakesed üle kogu paela. All on toodud võrdlevalt mikrograafid (joonis 14) tavaliselt imbunud ning nõ keema läinud lahusega paelast.

Alguses tekkis probleem ka riputussüsteemiga meetodi juures, kuna traadist alusel rippusid paelad vertikaalselt kuivatusahjus õhus, mitte ei aetsenud horisontaalselt, mistõttu kuivatas ahi paelad eelnevalt valitud rõhu (3 mbar) juures liialt ära, tulemusena pudenes CsOH paela puutumisel maha pudenes. Probleemi lahendamiseks hoiti paelu vaakumahjus 5 mbar-ni.

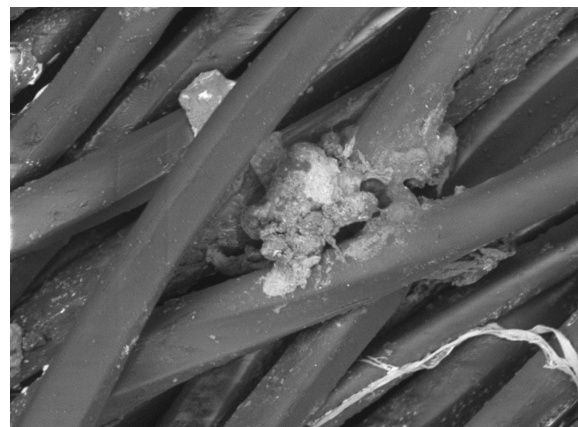
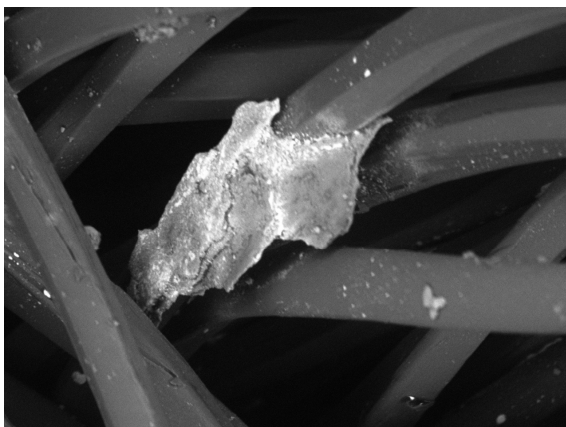


Joonis 14: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograafid töödeldud *spun* paela lahuses olnud osadest: tavaline märgunud pael (vasakul) ja keema läinud lahusega pael (paremal).

3.23 Juhuslikud efektid

3.231 Lisaosakesed paeltel

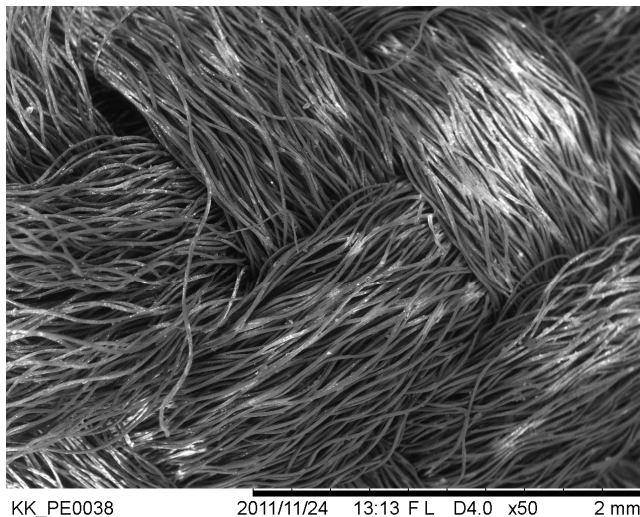
Skaneeriva elektronmikroskoobi abil paelu uurides on tihti näha (joonis 15) polüesterkiududele kinnitunud lisaosakesi (tolmu, puru, niite jms), mis võivad olla sinna tekkinud juba tehases seistes. Purule jääb CsOH-lahus oluliselt paremini külge, kattes neid kihiti.



Joonis 15: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1000-kordse suurendusega mikrograafid lisaosakestest paeltel: töötlemata polüesterpael (vasakul) ja töödeldud halli niidiga polüesterpael (paremal).

3.232 Juhuslikud lahuselaigud keset paela

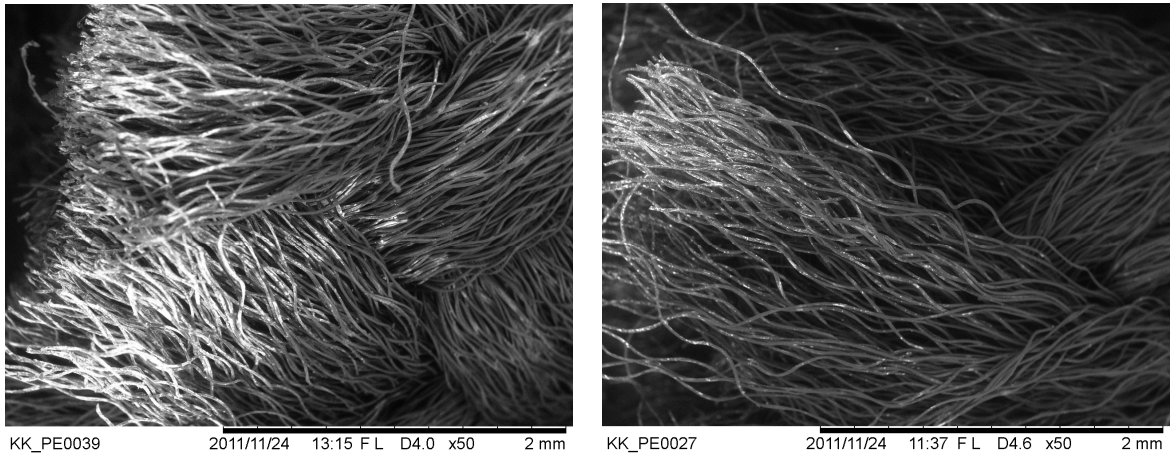
Mõningatel juhul on paela ülemises servas näha üksikuid suuremaid CsOH-lahuse laiuke, mis on tekkinud paela kokkupuutel katseklaasi seinaga või määratud kinnastega paela katsumisest. (joonis 16). Probleemi ära hoidmiseks tuleb hoolega jälgida, et kindad ei saaks lahusega eelnevalt kokku ega pael ei puutuks kokku anuma seinaga.



Joonis 16: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograafid töötlemata polüesterpaela juhuslikest lahuselaikudest (paremal servas).

3.233 Lõikamiskohtade juures lahust rohkem

Katsetes kasteti polüesterpael lahusesse algsel kujul ehk sisu koos ümbrisega, hiljem lõigati pael katki ning võeti sisu välja. Ümbrist ja sisu uuriti eraldi. Eesmärgiks oli SEM-i mikrograafidel ära tunda lahuses oleva osa piiri ning imunud lahuse piiri, selleks lõigati katseobjektid kolmeks osaks ning uuriti vaid alumist ja ülemist osa. Piltidelt on näha (joonis 17) paelte lõikamiskohtade juures suuremat CsOH-lahuse hulka, mille tingib kasutatavate kääride eelnev lahusega kokkupuutumine ja lahuse edasi kandumine paelale. Sellise olukorra vältimiseks tuleb käärid enne igat lõikamist puhastada.



Joonis 17: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograafid töötlemata polüesterpaela lõikamiskohast : paela ümbris (vasakul) ja sisu (paremal)

3.3 Meetodi rakendamine

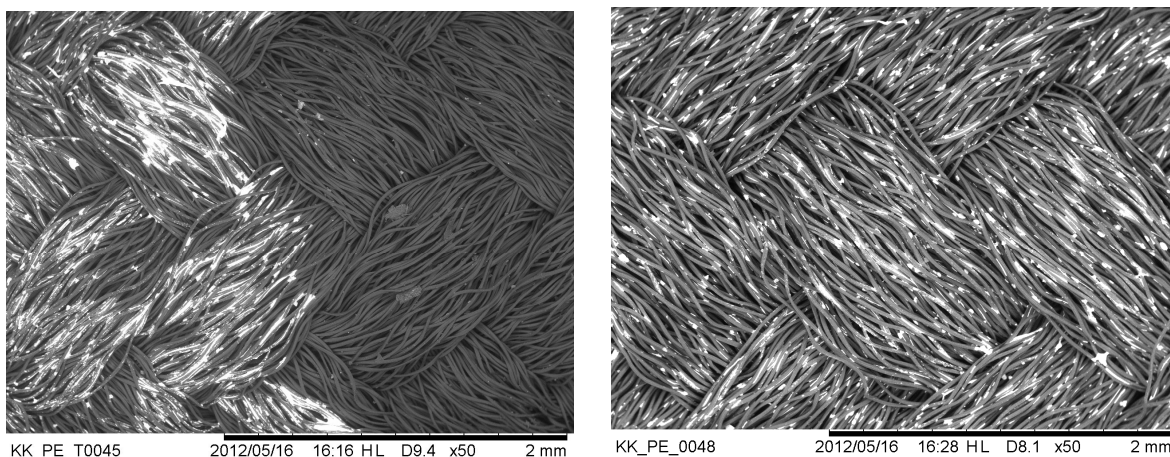
3.31 Paelte märgumine

Paelte märgumist ning mittemärgumist hinnati vedeliku tõusu kõrguse järgi. Mittemärguvaks juhul kui oli näha selget lahuse piiri ning vedelik polnud sellest edasi liikunud, märguvaks kui lahus oli nähtavalt sellest piirist edasi imunud (~0,5 cm) või piir polnud üldse eristatav - st lahus oli paela mööda ühtlaselt edasi liikunud.

3.311 Harilikud tekstureeritud polüesterlõngast paelad

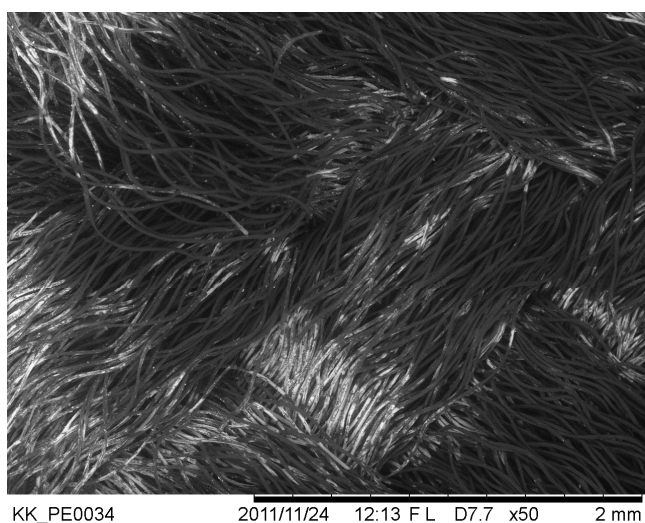
Katsetes uuriti nelja erinevat tekstureeritud polüesterlõngast paela: töötlemata ning töödeldud must, töödeldud musta/ kollase ja musta/halli niidiga pael. Lisaks eemaldati üleni musta värvi paelast sisu ning vaadeldi ka selle märgumist eraldi. Uuriti ka töötlemata paela ümbrise sisemist poolt.

Töödeldud paela lahusesse asetades tekivad paela pinnale õhumullid ja SEM-i abil on näha selgelt piiri, kuhumaani on pael lahuses olnud ja et vedelik pole sealt edasi imunud. Töötlemata paelal aga imub lahus mööda kapillaare katse jooksul ühest paela otsast teise. Järelikult tagab õnnestunud töötlus paelale tõepoolest esialgse veekindluse. Joonisel 18 on näha võrdlevalt mikrograafe, töödeldud paelal on eristatav lahuse piir, töötlemata paelal on lahus sellest piirist ühtlaselt edasi imunud.



Joonis 18: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograafid CsOH lahusega mustast polüesterpaelast :töödeldud (vasakul), töötlemata (paremal).

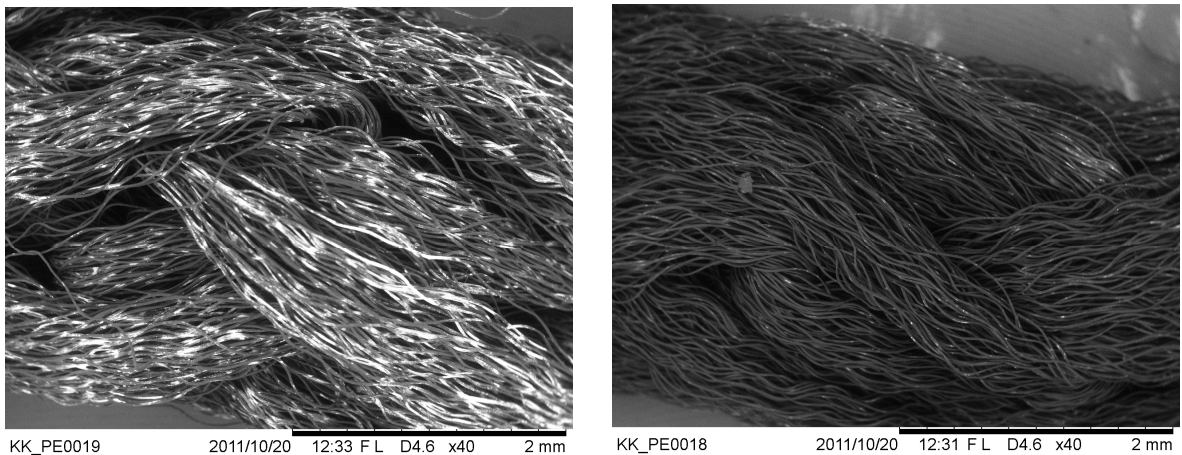
Töötlemata musta polüesterpaela ümbrise sisemise poole analüüsimisel (joonis 19) selgus, et ka sisemisel poolel leidub CsOH-lahust, eriti punutise ristumiskohtades, mis on eeldavasti olnud kontaktis sisuga. Järelikult toimub lahuse liikumine ka ümbrisest sisu poole. Samuti on oluline kanal ümbrise ja sisu vahel.



Joonis 19: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograaf töötlemata musta polüesterpaela ümbrise sisemisest poolest.

Kastes sisu ilma ümbriseta lahusesse, imab see lahuse suhteliselt kiiresti endasse, täites kiudude vahelised kapillaarid. Ümbrise sees olev sisu on märgunud vaid mõnest üksikust kohast. (joonis 20). Järelikult on sisu enda struktuur ideaalne lahuse liikumiseks mööda seda, kuid ümbrise sees olles on sisu lahuse eest justkui kaitstud.

Märguvad need kohad, kus sisu ja ümbrise vahel on vahe väike. Kohati on sisu nii hõre, et sobiva mõõduga kapillaare ei teki.



Joonis 20: Skaneeriva elektronmikroskoobi 40-kordse suurendusega mikrograafid polüesterpaela sisust: otse lahusesse kastetud (vasakul), ümbrisega koos lahuses olnud (paremal).

3.312 Kedratud polüesterlõngast (*spun*) pael

Katsetes uuriti kolme erinevat *spun* paela: sisuta, sisuga ning töödeldud. Lisaks eemaldati sisuga paelast sisu ning vaadeldi ka seda eraldi.

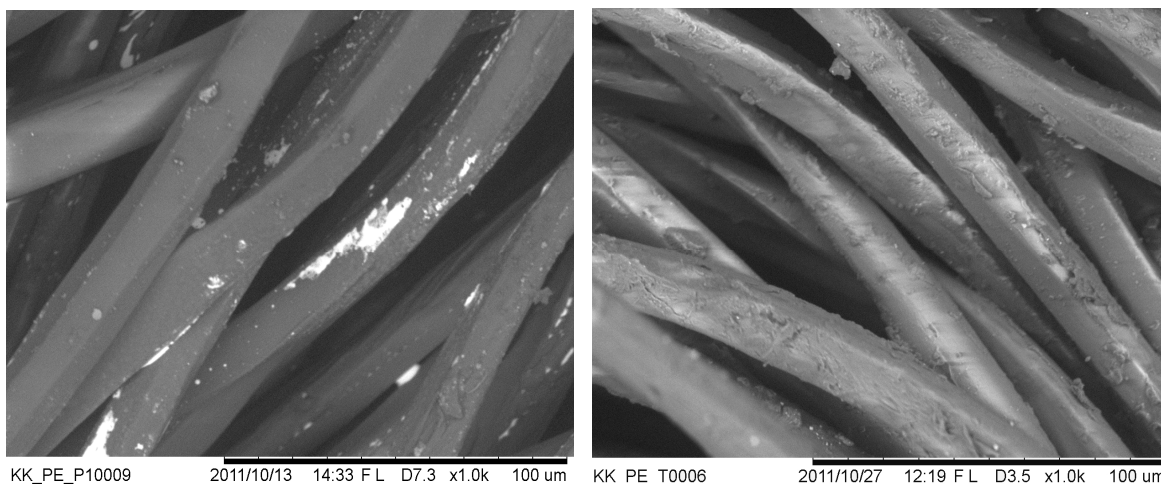
Tänu sellele, et *spun* paeltel olevatel „karvakestel“ puudub omavaheline ühendus ja nende ühed otsad paiknevad paelast eemal, ei imbu lahus „karvakesi“ mööda edasi. Selle järgi on võimalik hinnata, kuhumaani on paelad lahuses olnud ja kust alates on toimunud imbumine.

Paelte lahuses olnud osadel on erinevusi raske märgata- nii sisuta, sisuga kui ka töödeldud *spun* paelad on lahusega kaetud.

Imbunud osas on erinevused suuremad. Esiteks ei ole töödeldud paelal lahus eriti edasi imbunud (vaid ühte kiukimpu mööda on toimunud vähene imbumine). Järelikult lühiajaliselt ning kahjustamata paela korral töötlus toimib. Oluline erinevus on töötlemata sisuta ja sisuga *spun* paela vahel - sisuga *spun* paela kapillaare ning kiude mööda on lahus oluliselt rohkem liikunud kui sisuta *spun* paela korral. *Spun* paela sisu ja ümbrise erineva kuju tõttu liiguvad need teineteise suhtes ning tekivad sobivate mõõtmetega vahemikud, mida mööda saab lahus hästi edasi liikuda. Järelikult tuleb tähelepanu pöörata paelale sisu valimisel.

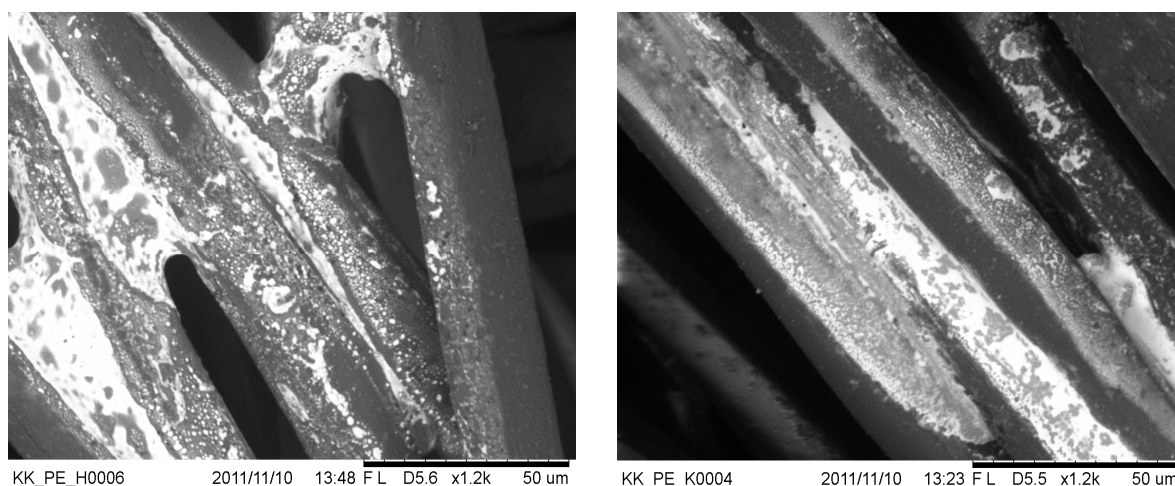
3.32 Goretex kate

Võrreldes CsOH lahuses olnud töötlemata ja *goretex* töötluusega polüesterpaelu, (joonis 21) võib märgata töödeldud kiududel rante ning kogumikke, mille on tekitanud *goretex* kate. *Goretex* kate pole ühtlane üle kogu paela ega ka kiu ulatuses. Mõnel kiul on kate suhteliselt ühtlane, osadel ebaühtlasem, kuid leidub ka hulgaliselt kiude, millel töötluuse järgne kate üldse puudub.



Joonis 21: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1000- kordse suurendusega mikrograafid musta niidiga polüesterpaelttest: *goretex*- töötluuseta (vasakul), *goretex*- töötluusega (paremal).

Goretex töötluus tekitab kiudude vahele *goretex* sillad (joonis 22), mis võivad kiudude omavahelise liikumise tõttu katkeda. *Goretex* sildadele ning katkenud sildadele koguneb CsOH- lahus üsna hästi. Mis näitab, et hüdrofoobsuse olulist kasvu kate kaasa ei too. Vett transportivad kapillaarid moodustuvad ühesuguse eduga nii töötlemata polüestri kui *goretex* kattega polüestri kiudude vahel.



Joonis 22: Skaneeriva elektronmikroskoobi 1200-kordse suurendusega mikrograafid töödeldud paelttest: musta/halli niidiga (vasakul) ja musta/kollase niidiga (paremal).

3.33 Kulutamine

Imiteerimaks Gore-tex laboris tehtavat kulutamistesti paela veekindluse vastupidavuse uurimiseks, konstrueeriti Tartu Ülikooli Tehnoloogia instituudi IMS laboris kulutamismasin. Paela üks ots kinnitati lineaarmootori külge, paela teise otsa riputati 300 g raskus ning kulutati paela edasi- tagasi tõmmetega läbi metallist rõnga (öösi) 90-kraadise nurga all soovitud aru tsükleid (tsükliite arvu sai arvutis vastava programmiga ette anda).

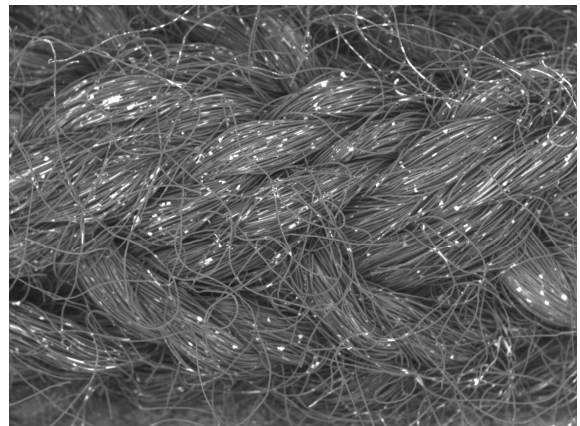
3.331 Spun paela kulutamine

Goretex kate vastupidavust mehaanilisele töötlusele (kulutamisele) otsustati eeskätt uurida töödeldud *spun* paelal. Esiteks sellepärast, et *spun* paelal on lihtne eristada lahuses olnud osa imbunud osast. Teiseks on teada, et *spun*_paela korral on kulutamistestide järel paela veekindlus reeglina kadunud või tunduvalt halvenenud.

Töödeldud *spun* paela kulutamine toob kaasa olulisi muutusi paelas ning vastavalt ka erinevusi vedeliku liikumises. SEM-i mikrograafidelt on näha, et pärast kulutamist asuvad „karvakesed“ punutud osale lähemal ning muutub ka kiudude omavaheline paiknemine paelas. Võrreldes mikrograafe (joonis 26) võib märgata, et kulutamata osas on CsOH-lahus liikunud ja kinnitunud korrapärasemalt kõikidele üksteiste all asuvate kapillaaride vahele, kulutatud osas on lahuse paiknenud pigem kindlatele kapillaaridele. Kiudude, mille omavaheline paiknemine on oluliselt muutunud, vahele pole CsOH-lahus saanud kinnituda.



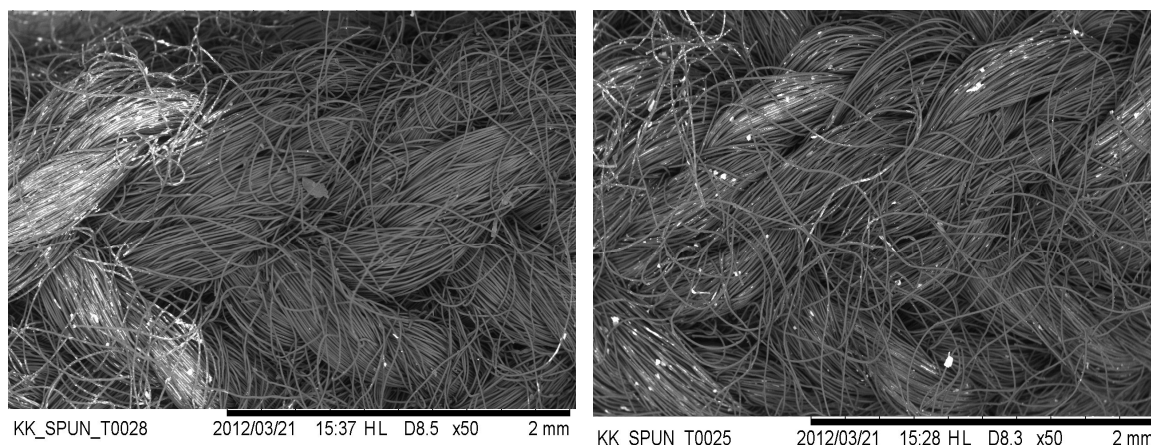
KK_SPUN_T0023 2012/03/21 15:11 HL D7.0 x50 2 mm



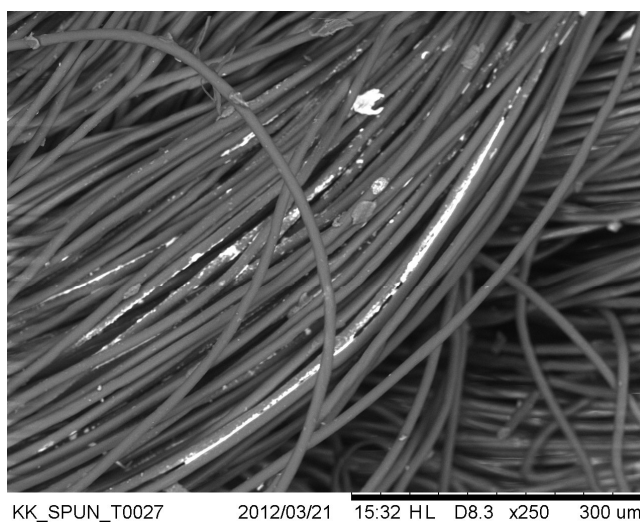
KK_SPUN_T0022 2012/03/21 14:54 HL D7.1 x50 2 mm

Joonis 26: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograafid töödeldud *spun* paela kulutatud ja kulutamata lahuses olnud osadest: kulutamata osa (vasakul) ja kulutatud osa (paremal).

Olulisim efekt, mida kulutamine põhjustab, on muutus paela veele vastupanekus. Võrreldes mikrograafe (joonis 27) on näha, et kulutamata paela osas pole lahus anumades olnud lahusepiirist edasi imbunud erinevalt kulutatud paela osast, kus on selgelt näha vedeliku edasiliikumist ning paiknemist kapillaaride vahel. CsOH-lahuse liikumine on toimunud mööda kindlate vahekaugusega kiudude vahelisi kapillaare (joonis 28).



Joonis 27: Skaneeriva elektronmikroskoobi 50-kordse suurendusega mikrograafid töödeldud *spun* paela kulutatud ja kulutamata osade lahuse piirist: kulutamata osa (vasakul) ja kulutatud osa (paremal)



Joonis 28: Skaneeriva elektronmikroskoobi 250-kordse suurendusega mikrograaf töödeldud *spun* paela kulutatud osasse imbunud lahusega kapillaarist.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töö eesmärk oli analüüsida paelatööstuses kasutatavate polüesterlõngade struktuuri ning töötada välja meetod polüesterpaelte märgumisprotsesside uurimiseks. Skaneerival elektronmikroskoopiaal põhinevat meetodit rakendati OÜ Haine Paelavabriku kahte liiki polüesterpaelte: harilike tekstureeritud polüesterlõngast (PE) ning kedratud polüesterlõngast (*spun*) paelte analüüsimisel. Uuriti märgumise sõltuvust mitmetest paela iseloomustavatest teguritest: kiu struktuur ja mõõtmed, paela punumisstiil ning sisu erinevused. Lisaks vaadeldi *goretex* töötamise efektiivsust ja selle vastupanu kulutamisele. Nimelt ei tohiks *goretex* töötamisega pael vee suhtes tahina käituda.

Meetodi väljatöötamisel lähtuti sellest, et vedeliku (vee) liikumine paeltes toimub kapillaarjõudude mõjul. Paelte uurimiseks kasutati skaneerivat elektronmikroskoopi (SEM) nõrga vaakumi režiimis. Kuivõrd alarõhk SEM proovikambris ei võimalda vee tuvastamist ning polüesterkiudude ja veekihi vahel ei tekiks niikuinii piisavat aatomkontrasti, kasutati vee asemel 1% CsOH vesilahust. Enne mikroskoopiat aurutati paelad vaakumahjus kuivaks. Selleks, et paelu üheaegselt lahusesse kasta ning välja võtta, konstrueeriti riputusseade, mida sai koos uuritavate paeltega vaakumahju asetada. Meetodi väljatöötamisel tuvastati, et kõige optimaalsem on paelu kuivatada temperatuuril 35° C, rõhuni 5 mbar.

Välja töötatud meetodit rakendati paelte analüüsimiseks ning leiti vedeliku liikumise viisid ning *goretex* töötamise puudused. Vedeliku kapillaarne tõus paeltes toimub kolmel viisil: ümbrise sees, ümbrisest sisu poole ning ümbrise ja sisu vahelistes tühimikes. Seetõttu on oluline ka paela sisu valik, sest kui ümbris ja sisu on erineva kuju ja mõõtmetega, liiguvad need teineteise suhtes ning moodustuvad uued kapillaarid, mida mööda saab vedelik hästi edasi imbuda. Lisaks leiti, et isegi kulutamata paelte puhul efektiivne *goretex* töötlus pole üldiselt paela lõikes ühtlane ning on suunatud peamiselt kiudude katmisele ega täida vett transportivad kapillaare, mistõttu ei taga selline töötlus paeltele püsivat veekindlust. Samuti on kate liiga rabe - kulutamise käigus paela kiudude vahekaugused muutuvad ning *goretex* kate rebeneb, kaotades oma kaitsvad omadused.

CAPILLARY PROCESSES IN POLYESTER FIBERS

The aim of the present work was to examine the structure of polyester yarns used in shoelace industry and to develop a reliable method for the investigation of moisture transport through polyester shoelaces. The method based on scanning electron microscopy was put to use for the analysis of two types of shoelaces made of polyester textured yarn and polyester spun yarn manufactured by OÜ Haine Paelavabrik. In addition, the efficiency of *goretex* finish (water repellent finish used on different textiles and fabrics) on shoelaces made of polyester fibers and the *goretex* coating's resistance to mechanical treatment was investigated.

The development of the method was founded on the fact that moisture transport through shoelace is caused by capillary forces which drive the liquid into the capillaries formed in the spaces between fibers in the wicking process. Scanning Electron Microscopy (SEM) at low-vacuum operation conditions was used to examine the polyester fibers. Investigation of water with SEM is problematic, as due to under-pressure inside the specimen chamber, water detection with SEM is impossible. Secondly, atomic-contrast between polyester fibre and water layer will not be sufficient for distinction. Therefore, strongly diluted 1 % CsOH aqueous solution was used in experiments instead of water; prior to microscopy, the objects were dried in vacuum oven. Optimal parameters for drying shoelaces were determined to be - temperature 35 ° C and pressure 5 mbar. In order to put objects in the solution and to take out of it at the same time, a hanging frame system was designed.

Capillary flow in shoelaces takes mainly place in the capillaries formed in the space between outer and inner part of a shoelace in wicking process. Therefore, selection of the inner part (filler) of lace is also important because if its' structure and measurements differ largely of those of the outer part (shell) , they will shift in respect to each other and new capillaries are created where liquid can be transported. In addition, the present *goretex* finish does not provide a uniform coating on fibers, being unable to guarantee durable water repellency to a shoelace. Furthermore, the coating is too brittle - during mechanical treatment the distance between fibers changes and the *goretex* coating will tear, losing its water repellent properties.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Ramé-hart Information on Contact Angle <http://www.ramehart.com/contactangle.htm>
vaadatud 18.05.2012
2. Hiemenz, P. C.; Rajagopalan, R. Principles of Colloid and Surface Chemistry; 3rd ed. Marcel Dekker, inc.1997, 248-270
3. Sharabaty, T.; Biguenet, F.; Dupuis, D.; Viallier, P. Investigation on moisture transport trough polyester/cotton fabrics. *Indian J. Fiber Textil. Res*, 2008, 33, 420
4. Kissa, E. Wetting and wicking. *J. Industr. Textiles*, 1996, 66, 660.
5. Atkins, P.W. Physical Chemistry fifth edition. Ed. Oxford University Press
6. Hsieh, Y.-L., Liquid transport in fabric structures. *J. Textil. Res*, 1995, 65, 65.
7. Hollies, N.; Kaessinger, M.M.; Watson, B. Water Transport Mechanism in Textile Materials Part II: Capillary-Type Penetration in Yarns and Fabrics. *J. Textil. Res*, 1957, 27, 8.
8. Lord, P.R.A. Comparison of the Performance of Open-End and Ring Spun Yarns in Terry Toweling, *J. Textil. Res*, 1974, 44(7), 516
9. Fuchs, A. et al. Composition for oil- and/or water-repellent finishing of fiber materials. WO 2011035906 (A2) European, 31. 03 2011. a.
10. Mhetre, S, K. Effect of Fabric Structure on Liquid Transport, Ink Jet Drop Spreading and Printing Quality Phd. Thesis Georgia Institute of Technology, 2009
11. Clough, Norman E. Innovations in ePTFE Fiber Technology: New Capabilities, New Applications, New Opportunities. s.l. : W. L. Gore & Associates, Inc., 2008.

-
12. Abo-Shosha, M.H.; El-Hilw, Z. H.; Aly, A. A; Amr. A.; Said, Al; Nagdy, I. El., Paraffin Wax Emulsion as Water Repellent for Cotton/Polyester Blended Fabric *J. Industr. Textiles* 2008, 37, 315.
 13. Shahidi, S.; Ghoranneviss, M.; Muazzenchi, B.; Dorranean, D.; Rashid, A. Water repellent properties of cotton and PET fabrics using low temperature plasma of Argon
 14. IMS Labor, Tartu Ulikool. Aruanne: "Tehnoloogiauuring paelte vahatamise kvaliteedi parandamiseks". 2011.
 15. Bal, S.; Behera, R. C. Structural Investigation of Chemical Treated Polyester Fibers Using Saxs and Other Techniques *J. Minerals & Materials Characterization & Engineering* 2006 5(2), 179-198.
 16. Hsieh, Y. L. Wetting, Pore Structure, and Liquid Retention of Hydrolyzed Polyester Fabrics *J. Textil. Res* , 1996 , 66, 1-10
 17. Technische fakultat der christian albrechts universitat, Kiel. Test M604: Scanning electron microscopy.
<http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/matan/teaching/download/fracture.pdf>
vaadatud 02.05.2012
 18. Postek, M. T. ; Howard, K. S. Johnson, A. H. ; McMichael, K.L. Scanning Electron Microscopy: A Student's Handbook, Ladd Research Ind., Inc. Williston, VT., 1980.
 19. Dunlap, M. Adaskaveg J. E. Introduction to the Scanning Electron Microscope Theory, Practice, & Procedures. Faculty for advanced instrumentation, U.C.Davis, 1997. <https://imf.ucmerced.edu/downloads/semmanual.pdf> vaadatud 12.12.2011
 20. TM3000 brochure.pdf <http://www.hht-eu.com/cms/19823.html> vaadatud 30.04.2012