

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Mona Küüts

Vedelikupõhine mälu kiukoodis

Magistritöö (30 EAP)
Arvutitehnika ja robotika eriala

Juhendaja:

Janno Torop, PhD

Indrek Must, PhD

Tartu 2023

Resümee/Abstract

Vedelikupõhine mälu kiukoodis

Kogu inimkonna ajaloo vältel on tekstiilidel alati olnud märkimisväärne roll meie elus, alustades tekstiilist kui elementaarsest ellujäämise vahendist, lõpetades globaalse eneseväljenduse vahendina moetööstuses. Lisaks eelnevalt mainitule paigutub sellele spektrile ka palju funktsionaalseid tekstiili rakendusi, millest üks on tekstiilidega integreeritud kantavad robotid. Pehmest tekstiilist ajamid on pehmerobotika valdkonnas laialt levinud tänu oma paindlikkusele, kergusele ja ohutusele. Lisaks sellele, et tekstiil käitub täiturmehhanismide sees tugistruktuurina, on tekstiilil ka suurepärased kapillaarsusomadused mis pole robotikas leidnud laialdaselt rakendust.

Lõputões demonstreeritakse kuidas tekstiili niitude programmiline paigutus (kiukood) aktiivse poorse materjali sees võimaldab määrata vedeliku (lahusti ja elektrolüüti) eelistatud liikumise suuna. Lahusti liikumine mööda tekstiili niitude kapillaarpindu võimaldab elektrolüüdi hulga lokaalseid suurenemisi või vähenemisi, mis omakorda võimaldab muuta tekstiili omadusi. Selle uurimiseks tikiti tekstiil (kiukood), mis osaliselt kaeti elektroaktiivsete materjalidega. Elektroaktiivsete materjalidega kaetud tekstiil moodustas aktiivse ala. Antud töö raames kasutati lahustina 4-metüül-2-pentanooni, et transportida elektrolüüti (ioonset vedelikku) tekstiili passiivsete ja aktiivsete alade vahel. Lahusti aurustumise järel on võimalik elektrolüüdi kontsentratsioonigradientidesse salvestada informatsiooni (vedelikupõhine mälu).

Pehmed aktiivsed tekstiilid on väga nõutud tervishoiuvaldkonnas, kus on suur vajadus eksoskelettide järele, mida saaks kanda nagu rõivaesemeid, mis ühilduks inimese kehaga ning mille materjali omadusi on võimalik muuta ja kontrollida.

CERCS: T150 Materjalitehnoloogia, T470 Tekstiilitehnoloogia, T125 Automatiseerimine, robotika, control engineering

Märksõnad: pehmerobotika, robotika, targad tekstiilid, kantav elektroonika, mikrofluidika, kapillaarsus

Liquid-enabled memory in fibrous code

Textiles have played an essential role in the history of mankind in many different ways starting from acting as a basic need for survival all the way to a form of self-expression through fashion. On this spectrum are numerous amounts of applications for textiles, one of them being textile-integrated wearable robots. Soft textile actuators are widespread in the field of soft robotics due to their flexible, light, and safe qualities. In addition to the textile acting as a supporting structure inside the actuators, the textile also embodies excellent capillarity properties that have not found widespread application in robotics.

In this thesis, it is demonstrated how the programmatic arrangement of textile threads (fibrous code) inside active porous material allows to determine the preferred direction of movement of

the liquid (solvent and electrolyte). The movement of the solvent along the capillary surfaces of the textile threads allows for local increases or decreases in the amount of electrolyte, which in turn allows changing the properties of the textile. To investigate this, a textile (fibrous code) was embroidered, which was partially coated with electroactive materials. The textile coated with electroactive materials formed the active area. In this work, 4-methyl-2-pentanone was used as a solvent to transport the electrolyte (ionic liquid) between the passive and active areas of the textile. After the solvent evaporates, it is possible to store information in the concentration gradients of the electrolyte (liquid-enabled memory).

Soft active textiles are highly sought after in the field of healthcare, where there is a prominent need for exoskeletons that could be worn like clothing items, are compatible with the human body, and whose material properties can be modified and controlled.

CERCS: T150 Material technology, T470 Textiles technology, T125 Automation, robotics, control engineering

Keywords: soft robotics, robotics, smart textiles, wearable electronics, micro fluidics, capillarity

Sisukord

Resümee/Abstract	2
1 Sissejuhatus	6
2 Kehaline tarkus (<i>embodied intelligence</i>) tekstiilis ja taimedes	7
2.1 Kantav robootika	7
2.2 Kehaline tarkus tekstiilis	7
2.3 Mälu avaldumine tekstiilis, täiturmehhanismides ja vedeliksüsteemides	8
2.4 Kapillaarsus taimedes ja tekstiilis	9
2.5 Vedeliku võimaldatud mälu tekstiilirobootikas	10
3 Originaalse lahenduse kirjeldus: vedelikupõhine mälu kiukoodis	12
3.1 Kontseptsioon	12
3.2 Töö eesmärgid	13
4 Meetodid	15
4.1 Tikkimismasina tööfaili loomine	15
4.2 Tikandi valmistamine	15
4.3 Targa tekstiili valmistamine	15
4.3.1 Membraanilahuse pealekandmine	15
4.3.2 Ajutiste tugistruktuuride eemaldamine	16
4.3.3 Elektroodisuspensiooni pealekandmine	17
4.3.4 Voolukollektori pealekandmine	17
4.4 Mõõtekeskkond	18
4.4.1 Õhukindel kast	18
4.4.2 Mõõteobjektide hoidikud	19
4.4.3 Kontaktid	20
4.5 Mõõtetehnikad	21
4.5.1 Impedantsi mõõtmine	21

4.5.2 Jäikuse mõõtmine	21
4.5.3 Skaneeriv elektronmikroskoopia	22
5 Tulemused ja arutelu	23
5.1 Vedeliku ümberpaigutuse kineetika uurimine tekstiilis	23
5.1.1 Mõõteobjektide A, B, C ja D morfoloogia	23
5.1.2 Mõõteobjektid A, B ja C.....	25
5.1.3 Mõõteobjekti D tulemused	28
5.2 Vedelikupõhine mälu ja niidipõhine kood tekstiilis.....	30
5.3 Tekstiilne kood.....	34
6 Kokkuvõte	38
Viited	39
Tänuavaldused	41
Lihtlitsents	42

1 Sissejuhatus

Esimesed tekstiilid pärinevad ajast 3400 eKr, mil iidsetes Egiptuses valmistati esimesed kangad linasest kiust. Ajavahemikus esimestest tekstiilidest kuni tänaseni on riietusesemetel olnud palju erinevaid sümbolseid kui ka funktsionaalseid ülesandeid. Tänapäeval on järjest aktuaalsemad targad tekstiili rakendused, millest üks on tekstiilidega integreeritud kantavad robotid.

Tekstiilirobootikas on õpitud materjali intelligentsust füüsiliselt väljendama (inimkehaga mугanema) materjali valiku ja tekstiilitehnoloogiate kombineerimise kaudu. Üks viis kuidas traditsiooniline tekstiil reageerib mehaanilistele stiimulitele on kiudude ümberkonfigureerimise kaudu (nt kiudude libisemine kudumissilmuses ehk krookimine), moodustades tõhusalt lühiajalise muutmälu. Kas lisaks mehaanilisele muutmälule on võimalik tekstiili salvestada infot ka vedeliku abil? Vedelik liigub tekstiilis mööda kiudude vahelisi kapillaarpindu vedeliku pindpinevusest tekkivate kapillaarjõudude ja rõhuerinevuse tõttu. Antud töö eesmärk on uurida, kas vedeliku transport kapillaarsuse toimele võimaldab tekstiilis mälu avaldumist. Mälu avaldumiseks on vaja vedelikku mööda tekstiilikiude transportida ette nähtud viisil. Vedeliku eelistatud liikumise mustri määramiseks saab kiude tekstiili sees programmiselt paigutada.

Antud lõputöös uuriti kuidas tekstiili kiudude kahemõõtmeline paigutus polümeerses elektroaktiivses maatriksis ning elektrolüüdi transport mööda programmeeritud kiudude kapillaarpindu moodustavad materjalis kehastunud intelligentsuse. Tekstiili niitide paigutus moodustab kiukoodi, mis määrab vedeliku liikumise mustri, et lokaalselt materjali omadusi muuta.

Antud lõputöö struktuur on järgnev: esiteks antakse ülevaade kehastunud tarkusest tekstiilis ja taimedes, teiseks esitletakse töö kontseptsiooni ja eesmärgi, kolmandaks kirjeldatakse töö käigus kasutatud meetodeid (tikkimine, pihustamine) elektroaktiivse tekstiili valmistamiseks ja karakteriseerimiseks, ning viimasena esitletakse esmaseid eksperimentaalseid tulemusi vedelikupõhise mälu kohta kiukoodis.

2 Kehaline tarkus (*embodied intelligence*) tekstiilis ja taimedes

2.1 Kantav robotika

Kogu inimkonna ajaloo vältel on tekstiilidel alati olnud märkimisväärne roll meie elus, alustades tekstiilist kui elementaarsest ellujäämise vahendist lõpetades globaalse eneseväljenduse vahendina moetööstuses. Lisaks eelnevalt mainitule paigutub sellele spektrile ka palju funktsionaalseid tekstiilirakendusi, millest üks on tekstiilidega integreeritud robotikaseadmed, lühidalt kantav robotika. Sellised pehmed, painduvad ja kerged kantava robotika seadmed on aktuaalsed tervishoiuvaldkonnas, kus tuntakse suurt vajadust pehmete taastusravi-eksoskelettide järele, mida oleks võimalik kanda nagu riideeset [1].

Esimesed eksoskelette meenutavad vahendid olid jäigad passiivsed ortoosid [2], mis pärinevad ajast 3000 eKr. Neid peetakse tänapäeva klassikalise robotika valdkonna poolt arendatud jäikade aktiivsete välisrüüde eelkäijateks. Lisaks taastusraviks mõeldud robotitele on pandud palju rõhku ka inimese elukvaliteeti parandavatele robotitele. Näiteks on olemas Ekso Bionics-i poolt arendatud välisskelett EVO, mis aitab suurendada tööliste vastupidavust ning leevendada koormust sundasendites [3]. Vaatamata sellele, et klassikalise robotika seadmed on tihtipeale väga efektiivsed spetsiifilises keskkonnas, ei sobi need kantavate lahenduste tootmiseks. Klassikaliste robotite jäikus muudab nad ebasobivaks inimnahaga kokkupuutuvate seadmete arendamiseks [4]. Selle probleemi lahendamiseks arendatakse pehmerobotikateadlaste poolt tekstiiliroboteid.

2.2 Kehaline tarkus tekstiilis

Tekstiilirobootikas on õpitud materjali intelligentsust füüsiliselt väljendama ja keskkonnale edastama erinevate täiturmehhanismide kaudu. Levinumad näited kommertsiaalsetest pehmerobotikalahendustest on näiteks autodes paiknevad õhkpadjad [5], mis peavad ühilduma inimesega maksimaalses ulatuses. Selle eesmärgi saavutamiseks on kõige parem materjal tekstiil. Teine tuntud näide tekstiili kasutamisest robotikalahendustes on McKibbeni tehislhas [5], kus tekstiil töötab tugevduse ning jõuülekandeelemendina. Fiiberstruktuurid on levinud ka modernses arhitektuuris, kus on inspiratsiooni võetud loodusest – enamik kandvaid

struktuure looduses on samuti fiiberstruktuurid [6]. Materjali tasemel intelligentsusega ühildamisel omandavad täiturmehhanismid ise samuti keskse rolli intelligentsuses – täiturmehhanismide vorm ja paigutus võivad osaliselt või täielikult moodustada materjali tasemel koodi. Ühe täiturmehhanismi füüsiline seotus keskkonnaga sisendsignaalide reageerimise kaudu on üldiselt hästi arusaadav – nt pneumaatilised täituriid. See-eest mitmele sisendile (nt elektriline signaal ja vedelik) reageerivate täituriite vahelised interaktsioone, mis väljendavad programmist reaktsiooni ning ühendavad omavahel sisendsignaali (analoog närvisüsteemi mootorsete käskudega), sisemise füüsilise stimulatsiooni (mis on määratletud struktuurilise paigutusega) ja täituri asukoha keskkonnas [7], ei ole samal määral uuritud.

2.3 Mälu avaldumine tekstiilis, täiturmehhanismides ja vedeliksüsteemides

Traditsiooniline tekstiil reageerib mehaanilistele stiimulitele kiudude ümberkonfigureerimise kaudu (nt kiudude libisemine kudumissilmuses ehk krookimine), moodustades tõhusalt lühiajalise muutmälu. Teisisõnu tekstiilist on võimalik moodustada 1-bitine muutmälu, kust on võimalik lugeda ühte kahest võimalikust olekust.

Sarnast intelligentset materjali tasemel mälu ilmneb ka teistes materjalides - näiteks magneetuvad materjalid. Käitamise lihtsus ja magnetiliste osade sujuv integreerimine nii tahketesse kui ka vedelatesse keskkondadesse muudavad magnetväljale reageerivad ajamid soovitavaks [8]. Vedela magnetilise aine (ehk ferrovedeliku) integreerimist üksikute täiturmehhanismidega ning nende juhtimist on varasemalt demonstreeritud pehmerobootikalahendustes [9]. Selliste täituriite eelis on vajadus vaid ühe magnetvälja järele kogu süsteemi juhtimiseks. Lühiajaline muutmälu materjali tasemel avaldub magnetväljale reageeriva materjali hüsterese kaudu – magnetvälja kadumisel ei naase ferromagnetiline materjal täielikult oma algolekusse ning salvestab rakendatud välja suuna lühimälus. Siiski on vajadus vaid ühe magnetvälja järele ka puudus, sest kõik süsteemis olevad täituriid reageerivad väljale sünkroonselt ehk täitureid pole võimalik eraldi juhtida.

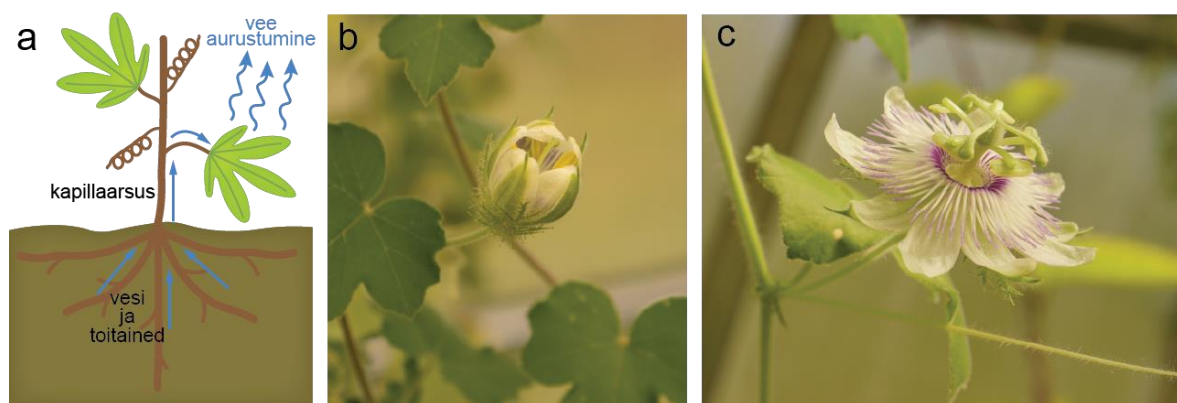
Magneetuvate materjalide ja tekstiilide omavahelise integreerimise kohta on tehtud väga mitmeid teadustöid. Tekstiili katmiseks magneetuvate osakestega on välja töötatud mitmeid meetodeid nagu näiteks galvaniseerimine, pihustamine, vaakumis sadestamine jne [10]. Lisaks sellele valmistatakse funktsionaalseid niite, mida on võimalik integreerida passiivse tekstiiliga

[11]. Tekstiile, mille sisse on põimitud metallist niite, kasutatakse näiteks isikukaitsevahendite tootmiseks töölistele, kes puutuvad igapäevaselt kokku elektromagnetväljadega [12]. Sellistes süsteemides kergesti purunevad metallist niidid ohustavad tekstiilide töökindlust suurel määral. Selle vältimiseks arendasid Glyva *et al* välja tekstiili, kus ferromagnetilised nanoosakesed integreeritakse tekstiiliga vedeliku abil [13].

Magnetväljale reageerivatele materjalidega sarnast käitumist võib täheldada ka vedeliksüsteemides. Kui vedelik siseneb tekstiili, on kindla aja jooksul võimalik määrata, millisest suunast vedelik tuli. Samal ajal jaotub vedelik kogu süsteemis difusiooni ning kapillaarjõu toimele. Vedeliku jaotumine ja liikumine tekstiili sees, alustades siidist ja lõpetades villaga, on teada ning uuritud juba pikka aega. Ometi on olemas vaid piiratud hulk insenertehnilisi lahendusi, mis seda looduslikult esinevat nähtust täielikult ära kasutaksid. Vedeliku imendumise ja reageerimisvõime kohta looduslikes kiududes on tehtud mitmeid uuringuid [14] [15], kuid oskused tekstiili sees mitme aktiivse elemendi vahel jaotunud vedeliku kontrollimiseks on peaaegu olematud. Palju on publitseeritud töid, kus vedeliku transportimiseks on tekstiiliga integreeritud muid materjale, näiteks pehmed silikoonist voolikud [16], kuid sellised lahendused ei kasuta ära tekstiili enda vedelikujuhtimise funktsionaalsust. Lisaks on olemas lahendusi, kus vedeliku transportimiseks kasutatakse üksikuid niite – nagu näiteks tekstiilipõhine kapillaarelektroforees [17]). Mõlema eelneva lahenduse puhul on vedeliku liikumise kontroll aga piiratud ühe aktiivse alaga.

2.4 Kapillaarsus taimedes ja tekstiilis

Kapillaarsus esineb looduslikes süsteemides nagu näiteks taimedes. Taimed omandavad mullast toitaineid juurte abil. Kapillaarsuse toimele mullast saadud vesi ja mineraalained liiguvad taime ksüleemi kudetest moodustunud torudes üles poole. Vett tõmmatakse pidevalt juurtest ülespoole ning lehtedes toimuva transpiratsiooni teel toimub pidev aurustumine [18] (Joonis 1a). Taime õielehtede liikumist mõjutab rakkude kokkutõmbumine (Joonis 1b) ja pundumine (Joonis 1c) osmoregulatsiooni tagajärjena [19]. Et mitu õielehte saaks korraga avaneda, peab ka rakkude siserõhk muutuma sünkroonselt, mis tähendab, et osmoregulatsioon on taime poolt aktiivselt kontrollitud sünkroonne protsess.



Joonis 1. Vee liikumine ja kasutamine taimedes. a) Taimed omandavad juurte abil mullast vett ja toitaineid. Kapillaarsuse toimele liiguvad vesi ja toitained mööda taime vart üles lehtedeni, kus transpiratsiooni tagajärjel aurustub üleliigne vesi keskkonda. b) *Passiflora foetida* õis suletud olekus. c) *Passiflora foetida* õis avatud olekus. Osmoregulatsiooni toimele avanevad õielehed sünkroonselt.

Vee liikumisel taimekudedes ning tekstiilikiududes on mitmeid sarnasusi. Vedelik liigub tekstiilis mööda kiududevahelisi kapillaarpindu vedeliku pindpinevusest tekkivate kapillaarjõudude ja rõhuerinevuse tõttu [20]. Kuna tekstiilikiud ei ole isoleeritud, vaid osa suuremast tervikust, vedelik migreerub ja jaotub tekstiili sees vastavalt kiudude paigutusele ja vedeliku liikumise kineetikale. Tehnoloogilistes lahendustes võib sarnast käitumist täheldada näiteks õlilambi tööpõhimõttes. Kiududevahelised kapillaarpinnad (kiudude pikkus võib ulatuda meetriteni) võimaldavad vedelikku transportida pikkadel vahemaadel.

Mitmetes modernsetes täiturmehhanismides, kus aktiivsed alad on üksteisest isoleeritud, peetakse pikki vahemaid tavaliselt negatiivseks, kuid vedelikuga juhitud täiturites võib see olla keskselt interaktsiooniviisiks. Selle näiteks on ioonsed elektroaktiivsed täituriid, kus vedelik liigub läbi täituri ristlõike ligikaudu 100 μm ulatuses [21]. Juba eelnevalt mainitud tekstiilipõhine kapillaarelektroforees võimaldab vedeliku liikumist pikematel vahemaadel, kuid selleks vajaliku kõrge pingetõttu pole see ohutu. Seega kapillaarjõu kasutamine tekstiilitäiturites on ohutu ja võimaldab vedeliku transporti pikkade vahemaa vahel.

2.5 Vedeliku võimaldatud mälu tekstiilirobootikas

Vedeliku kasutamine tekstiili sisaldavates süsteemides võimaldab arendada mitmeid materjali tasemel intelligentseid robootikaseadmeid. Kiudude paigutamine programmiselt võimaldab tekstiiliüleste ühenduste tekke. Kaasaegsed tekstiilivalmistamise meetodid võimaldavad lõpmatult hulgal erinevaid niitide paigutamise viise kahemõõtmelises ruumis, kus niitide orientatsioon määrab tekstiili mehaanilised omadused. Täituriid genereerivad liigutusi läbi deformatsiooni, mis pehmerobotites on reeglina defineeritud materjali omadustega, millest

täitur on valmistatud [22]. Pehmed tekstiilist täiturid sisaldavad nii juhtivaid kui ka mittejuhtivaid materjale ning kiude, mis on funktsionaalsuselt võrreldavad trükkplaatides olevate ühenduste ja antennidega [23]. Tekstiilikiude on võimalik defineeritud mustritena aktiivsete materjalidega ühildada kududes [24], lõimides, tikkides [21] või juhuslikult (*non-woven*). Samuti kasutatakse aktiivsete materjalidega kaetud niite omakorda aktiivsete tekstiilide valmistamiseks [25].

Ioonsetes elektroaktiivsetes täiturites paigutatakse elektrolüüti ümber kahe suure pindalaga elektroodi vahel, mis on kantud tekstiili vastaskülgedele. Selline elektrolüüdi ümberpaigutamine tekitab tekstiilis sisemise mehaanilise pinge, mille leevendamiseks materjal paindub. Siiani on painutuse ulatus määratud ühe juhtsignaaliga (mis defineerib ionide ümberpaigutamiseks kuluva aja ning energia) ning täiturmehhanismi ülekandefunktsiooni mõjutavaid tegureid (nt keskkonnast vee imendumine ehk õhuniiskus) on peetud eelkõige negatiivseks.

3 Originaalse lahenduse kirjeldus: vedelikupõhine mälu kiukoodis

3.1 Kontseptsioon

Vedeliku liikumine tekstiilis mööda niidi kiudude vahel olevaid kapillaarpindu on hästi teadaolev nähtus (Joonis 2.a). Sarnaselt taimedele, võimaldab kapillaarsus kiiret vedeliku liikumist ka tekstiilis. Sarnasel viisil nagu looduslikes süsteemides võimaldab kapillaarsus taimedes toitainete transporti, võimaldab vedeliku liikumine tekstiilis elektrolüüdi ümberpaigutamist mööda tekstiilikiude (Joonis 2.b). Kiudude vahel olevad kapillaarpinnad on efektiivsed vedeliku ümberpaigutamiseks elektroaktiivsete materjalidega integreeritud kiududes, passiivse tekstiili kiududes (tekstiil ilma elektroaktiivsete materjalideta) ning nende kahe vahel (Joonis 2.c). On teada, et mida rohkem on täituri määratud alal lahustit, seda liikuvamad on ioonid (Joonis 2.e) ning seda suurem on täituri liigutuse amplituud. Sellest tulenevalt on loogiline järeldada, et kui lahusti kogus samas piirkonnas väheneb, muutub ala passiivsemaks ning ioonid on elektrilisest sisendsignaalist vähem mõjutatud (Joonis 2.e).

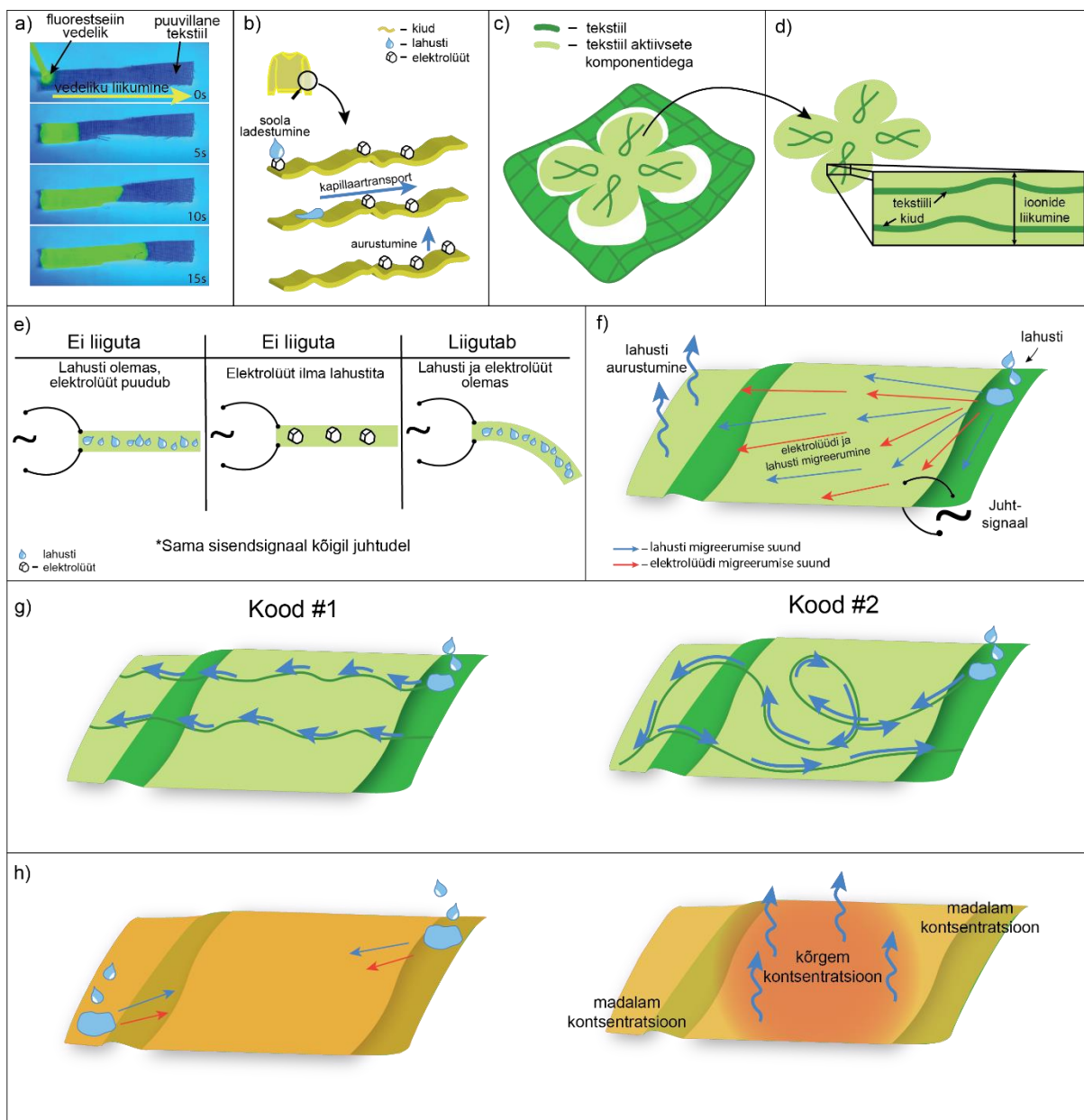
Üks protsess, mis võimaldab elektrolüüdi ümberpaigutamist täituri sees ning mis toimub pidevalt, on niiskuse imendumine keskkonnast. Siiski pole sel viisil võimalik kontrollida elektrolüüdi eelistatud liikumise suunda täituri sees. Selle probleemi lahendaks tekstiili kiudude integreerimine aktiivsete materjalidega (Joonis 2.d). Kuid mis juhtub siis, kui ühendada omavahel passiivne tekstiil ja tekstiiliga integreeritud aktiivne materjal ning skaleerida kogu uus moodustunud elektroaktiivne tekstiil suuremaks (Joonis 2.f)? Kui passiivne ja aktiivne ala on omavahel ühendatud programmeeritud paigutatud tekstiili kiudude abil, saavutab passiivne tekstiil kogu süsteemis uue funktsionaalsuse. Passiivsele alale tilgutatud lahusti liigub eelistatud suunas mööda tekstiili kiudude kapillaarpindu aktiivse ala poole ning viib endaga kaasa ka elektrolüüdi (Joonis 2.g). Protsessi tulemusena lahusti aurustub keskkonda ning elektrolüüt paigutub ümber kogu funktsionaalse tekstiili piires vastavalt kiudude programmeeritud paigutusele (Joonis 2.h). Kiudude kahemõõtmeline paigutus ning elektrolüüdi transport mööda programmeeritud kiude moodustavad kehastunud intelligentsuse: kandvate ja vedelikku transportivate kiudude konkreetne paigutus elektroaktiivses ajamstruktuuris defineerib intelligentse käitumise koodi (Joonis 2.g). Selle tulemuseks on ohutu, kohanduv, aktiivne tekstiil, mida on võimalik integreerida tervishoiurakendustes

kasutatavatesse tarkadesse tekstiilidesse. Lisaks muudab võimalus elektrolüüti varieerida välja pakutud tehnoloogia taastuvaks ja jätkusuutlikuks.

3.2 Töö eesmärgid

Antud magistritöö eesmärgid peatükis 3.1 kirjeldatud pikema perspektiivi saavutamisel on järgmised:

1. **TEKSTIIL VEDELIKU KIIRTEENA:** Demonstreerida, et poorsesse polümeersesse maatriksisse integreeritud niidi kiudude vahelised kapillaarpinnad defineerivad vedeliku eelistatud liikumissuuna.
2. **TEKSTIILNE MÄLU:** Elektroaktiivsele tekstiilile lokaalselt kantud solvendi ümberpaigutumine tekstiilis (vastavalt p1 kiudude asetusele) viib endaga kaasa ka elektrolüüdi, tekitades solvendi aurustumise järel lokaalseid elektrolüüdi kontsentreerumisi ja lahjenemisi ning kontsentratsioonigradientidesse on võimalik salvestada informatsiooni.
3. **TEKSTIILNE KOOD:** Niitide programmeeriline paigutus elektroaktiivses tekstiilis määrab eelistatud teekonna vedeliku (solvendi ja elektrolüüdi) ümberpaigutuseks ja lokaalse reaktsiooni juhtsignaalile.



Joonis 2. Kontseptsioon: vedelikvõimaldatud mälu kiupõhises koodis. a) Vedeliku liikumine puuvillases tekstiilis kapillaarsuse toimele. b) Lahusti tilgutamisel tekstiilile, mis sisaldab elektrolüüti (soola) kandub sool mööda tekstiili koos lahustiga edasi. Peale lahusti aurustumist keskkonda on sool saavutanud uue asukoha. c) Aktiivsete komponentide lokaalne kandmine tekstiilile defineerib aktiivsed alad. d) Elektrolüüdi ioonide liikumine tekstiiliga integreeritud elektroaktiivsete komponentide ristlõikes elektrivälja toimele. e) Elektroaktiivne ala moodustab elektrolüüdi ja lahusti olemasolul täituri. f) Tekstiilile tilgutatud lahusti migreerub mööda aktiivsete komponentide sees olevaid niite edasi ka järgmistele passiivsetele ja aktiivsetele aladele. Lahusti kannab endaga kaasa elektrolüüti, kuni lahusti lõpuks keskkonda aurustub. g) Niitude paigutus tekstiilis defineerib vedeliku liikumise eelistatud suuna tekstiilis. h) Elektrolüüdi hulga programmatiline muutus sõltuvalt lahusti tilgutamise kohast ja niitude paigutusest.

4 Meetodid

4.1 Tikkimismasina tööfaili loomine

Selle töö raames kasutati masintikandite loomiseks Pfaff creative icon tikkimismasinat. See masin aktsepteerib sisendina tikandeid VP3 või PCS failiformaadis. Masina tööfaili on võimalik luua kas kasutades saadaval olevaid tikkimismasinate tarkvarasid või genereerides tööfaili ise vastavalt soovitud koordinaatidele. Siin töös kasutati kolmandat võimalikku meetodit. Nimelt loodi tikandi disain esiteks Adobe Illustratori vektorgraafika tarkvara abil. See võimaldas ilma piiranguteta joonistada täpselt sellist disaini nagu sooviti. Adobe Illustratori abil oli võimalik luua korduvate elementidega mustreid veelgi lihtsamalt kui programmeerimiskeelte abil. Vektorgraafika abil loodud mustrites tähistab iga ankrupunkt pistet tikandis. Seega on võimalik vektorgraafika tarkvara kasutades samuti täpselt määrata pistete asukohta mustris. Peale tikandi mustri valmimist kasutati Inkscape tarkvaras olemasolevat Ink/Stitch laiendit, et vektorgraafika fail mugavalt VP3 failiformaati teisendada. Tulemuseks oli tikkimismasinal sobiv tööfail.

4.2 Tikandi valmistamine

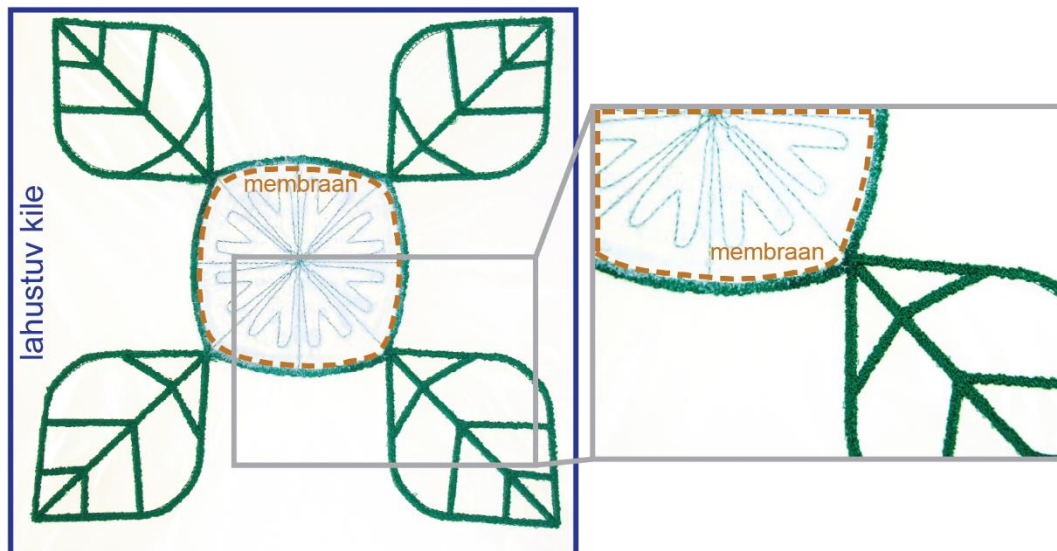
Valminud disain tikiti ajutise vees lahustuva tugikile peale (PVA, paksus 35 µm). Nii aktiivse kui ka passiivse ala tikandi jaoks kasutati ülemise niidina harilikku polüesterniiti (diameeter: ~250 µm). Aktiivse ala tikandi alumine niit oli vees lahustuv ajutine niit (PVA, diameeter: 250 µm) ning passiivse ala tikandi alumine niit oli sama polüesterniit, mida kasutati ka ülemise niidina. Tikkimisel kasutati 120 mm x 120 mm suurusega tikkimisraami ning nr 75 nõela. Elektroodi ja voolukollektori tikandi peale kandmise ajaks kinnitati tikand vedrude abil ümmarguse tikkimisraami külge.

4.3 Targa tekstiili valmistamine

4.3.1 Membraanilahuse pealekandmine

Esimese etapina kanti tikandi pealmisele poolele aerograafi abil pihustades membraanilahus (koostis: polü(vinülideendifluoriid-ko-heksafluoropropüleen (PVdF(HFP)), 1-etüül-3-metüülimidasoolium trifluorometaansulfonaat (EMIm-Otf), N-dimetüülatssetamiid,

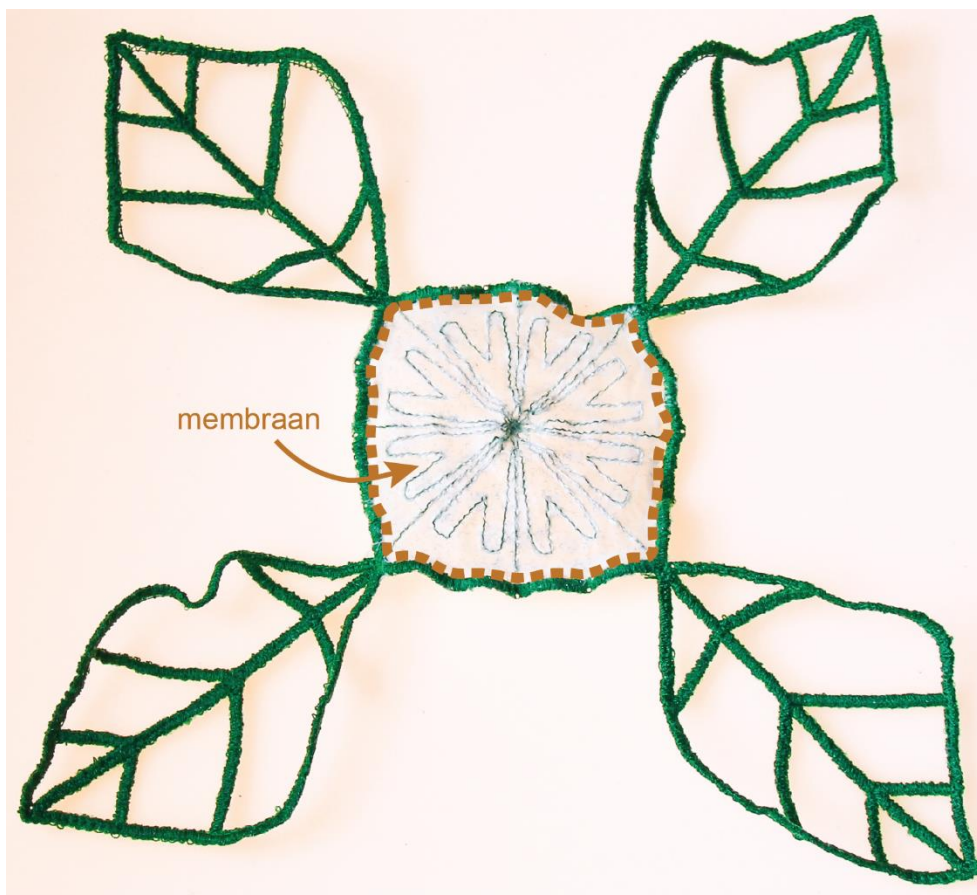
propüleenkarbonaat (PC)). Et vältida juhtivate materjalide sattumist passiivsetele aladele, kaeti need pihustamise ajaks šablooniga. Aerograafi abil oli võimalik lahus tikandile kanda õhukeste ja ühtlaste kihtidena. Lahust pihustati kuni aktiivne ala oli ühtlaselt lahusega kaetud (10 kihti) ning nõela poolt kile sisse tekitatud augud olid lahusega täitunud (Joonis 3).



Joonis 3. Valminud tikand (roheline) ajutise tugikile peal. Oranž punktiir tähistab membraanilahusega kaetud tikandit. Sinine joon tähistab lahustuvat tugikile. Parempoolsel pildil on näha membraanilahusega kaetud ja mitte kaetud ala piir.

4.3.2 Ajutiste tugistruktuuride eemaldamine

Järgmisena lahustati ajutised tugistruktuurid – aluskile ning aktiivse ala tikandi tikkimiseks kasutatud alumine niit. Selleks hoiti esmalt membraanilahusega kaetud tikandit jooksva kraanivee all. Kui suurem osa lahustuvatest struktuuridest olid kadunud, leotati tikandit veel veevannis. Tulemuseks oli eraldiseisev ja oma kuju hoidev tikand (Joonis 4).



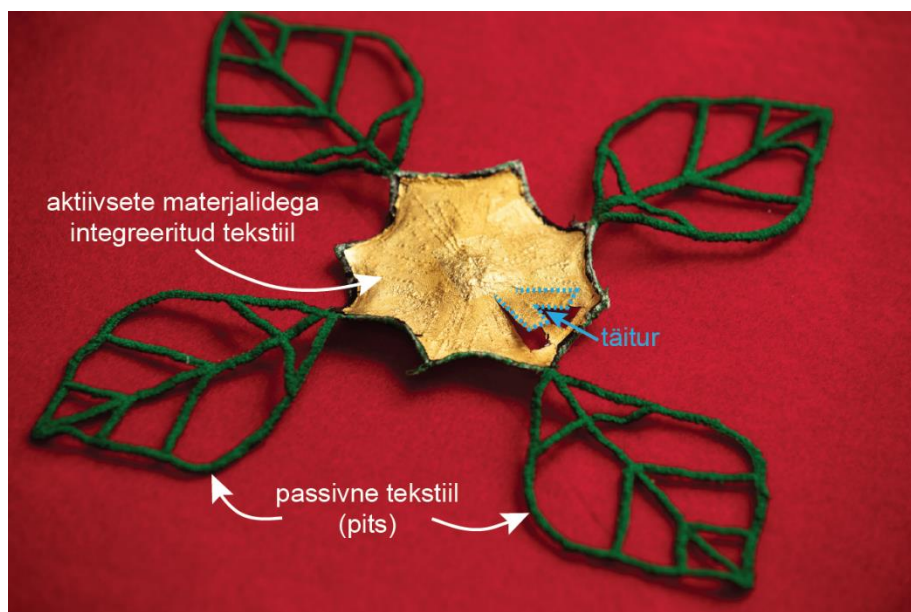
Joonis 4. Tikand peale ajutiste tugistruktuuride lahustamist. Oranž punktiirjoon tähistab membraanilahusega kaetud ala.

4.3.3 Elektroodisuspensiooni pealekandmine

Järgmise etapina kanti tikandi aktiivse ala mõlemale poolele 9 õhukest kihti elektroodisuspensiooni (koostis: PVdF(HFP), 4-metüül-2-pentanoon (MP), tahm BP-1000, EMIm-Otf). Sarnaselt membraanilahuse pealekandmisele kaeti ka nüüd passiivsed alad šablooniga ning elektroodisuspensioon kanti samuti tikandile aerograafi abil õhukeste ja ühtlaste kihtidena.

4.3.4 Voolukollektori pealekandmine

Viimase kihina kanti aktiivse ala mõlemale poolele voolukollektor. Selleks kasutati õhukesi kullalehti (paksus: 100 nm) ning peatükis 4.3.1 kirjeldatud membraanilahust. Kõige pealt pihustati aktiivsele alale õhuke kiht membraanilahust, mis toimis nagu liim, ning seejärel kanti selle peale koheselt kullaleht. Tulemuseks oli elektroaktiivne tekstiil, mis on ümbritsetud passiivse tekstiiliga (Joonis 5).



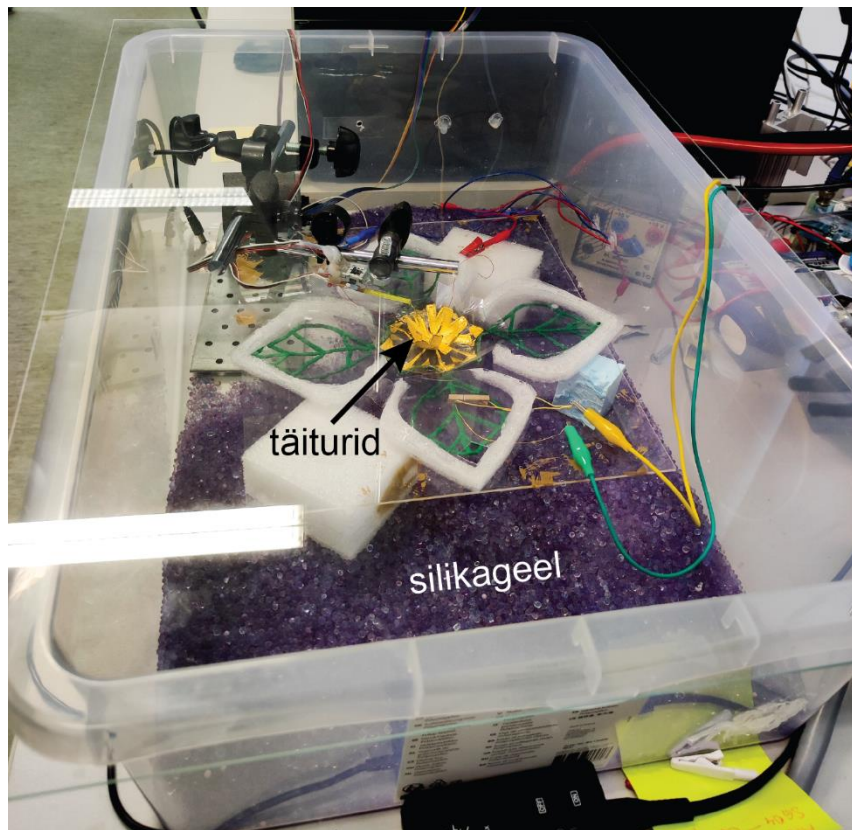
Joonis 5. Valminud elektroaktiivne tekstiil. Kullaga kaetud ala moodustab tekstiili aktiivsete komponentidega integreeritud osa. Servades asuvad rohelised lehekujulised pitsid moodustavad aktiivset ala ümbritseva passiivse tekstiili. Aktiivsest alast on skalpelliga lõigates defineeritud üks täitur (tähistatud sinise punktiirjoonega). Foto: Silver Gutmann

4.4 Mõõtekeskkond

4.4.1 Õhukindel kast

Kuna tekstiil ja ka kasutatud elektroaktiivsed materjalid on tundlikud muutustele keskkonna õhuniiskuses, oli vaja luua stabiilne keskkond mõõtmiste sooritamiseks. Selle jaoks võeti polüpropüleenist kast (mõõdud: 570 mm x 390 mm x 170 mm), mis täideti silikageeli pärlitega nii, et kogu kasti põhi oleks ühtlaselt kaetud. Silikageel võimaldas säilitada stabiilset õhuniiskust.

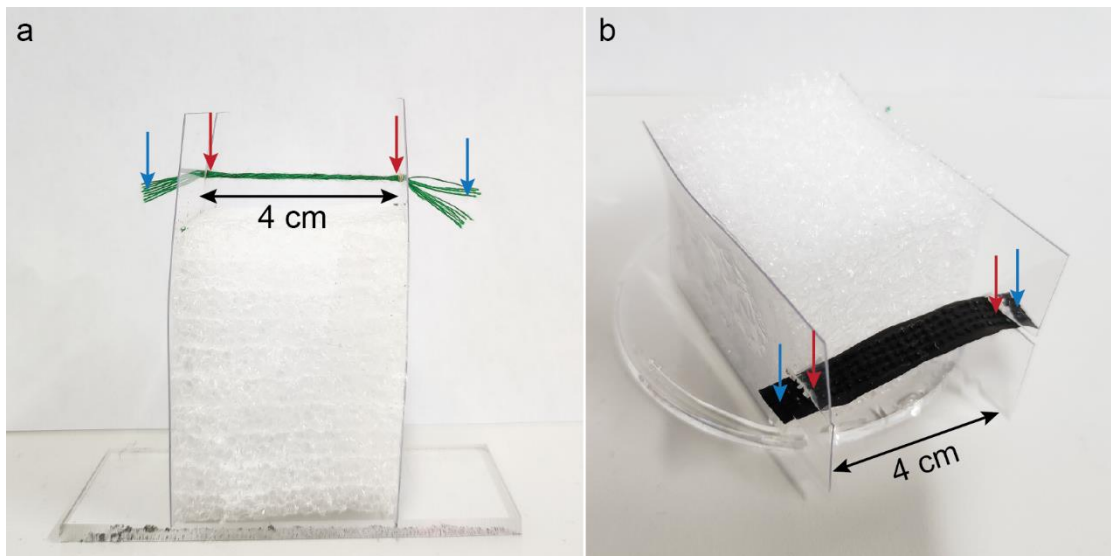
Lisaks sellele oli kastis kõrgendatud alus, kuhu asetada mõõteobjektid. Nii ei olnud mõõteobjektid otseses kontaktis silikageeli pärlitega. Kuna kast pidi olema võimalikult õhukindel, puuriti kasti seintesse augud juhtmetele, mis oli vaja ühendada kasti sees oleva mõõteobjekti külge. Lõtkud juhtme ja kasti seina vahel eemaldati kuuma liimi abil. Kasti kaanena kasutati siledat klaasi (mõõdud: 600 mm x 400 mm x 2 mm). Tulemuseks oli stabiilse õhuniiskusega õhukindel keskkond katsete sooritamiseks (Joonis 6).



Joonis 6. Stabiilse õhuniiskusega kast mõõtmiste sooritamiseks.

4.4.2 Mõõteobjektide hoidikud

Väiksemate mõõteobjektide jaoks valmistati hoidikud, et objekt püsiks mõõtmise ajal stabiilselt ühes asendis. Valmistati kaks erinevat hoidikut (Joonis 7) – üks ainult niidist valmistatud mõõteobjekti hoidmiseks (Joonis 7a) ning teine aktiivsete materjalidega ühildatud tekstiili hoidmiseks (Joonis 7b). Hoidikute valmistamiseks kasutati polüetüleen vahtu mille külge liimiti PET kile tükid.

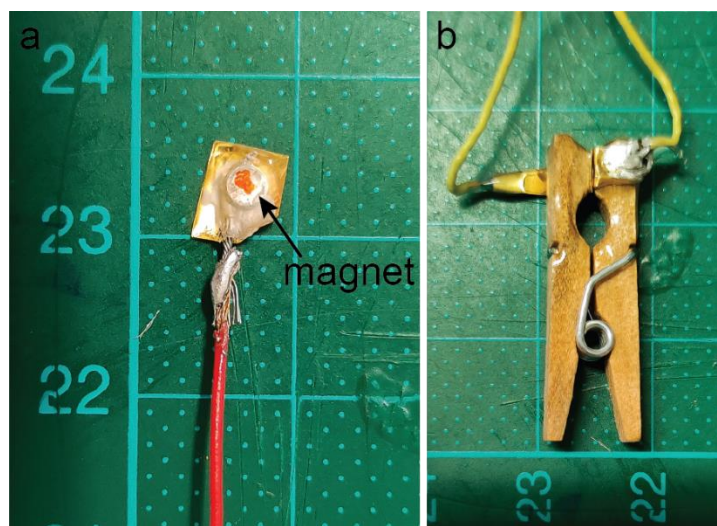


Joonis 7. Mõõteobjektide hoidikud. Punased nooled tähistavad kontaktide ühendamiseks mõeldud alasid. Sinised nooled tähistavad lahusti tilgutamise alasid. a) Ainult niidist valmistatud mõõteobjekti hoidmiseks vajalik hoidik. b) Elektroaktiivsetest materjalidest ja tekstiilist koosnevate mõõteobjektide hoidmiseks vajalik hoidik

4.4.3 Kontaktid

Mõõtmiste sooritamiseks kasutati kahte eri tüüpi kontakte (Joonis 8). Esimest tüüpi kontaktide (Joonis 8a) puhul liimiti esmalt peenike juhe hõbedaliimiga kullalehe külge. Seejärel kasutati kontaktliimi, et Nd magnet kulla ja juhtme külge kinnitada. Lõpuks kaeti kogu kontakti magnetiga pool UV-kõvastuva liimiga, et vältida magnetite ja hõbedaliimi korrodeerumist kokkupuutel vedelikuga. Kullast kontakti küljes olevad magnetid aitasid hoida kontaktisurvet mõõtmise ajal.

Teist tüüpi kontaktide (Joonis 8b) jaoks võeti väike puidust klamber (mõõdud: 25 mm x 10 mm) ning klambri vahele liimiti kontaktliimi abil kaks kullatükki. Kullatükkide külge joodeti juhtmed. Vedelikuga kokku puutuvad alad kaeti UV-kõvastuva liimiga, et vältida vedeliku imendumist puidu sisse ja tina korrodeerumist kokkupuutel vedelikuga.



Joonis 8. Kaks erinevat tüüpi kontakti. Piltide taustal olev ruudustik on sentimeetrites. a) Nd magnetiga üks kontakt kontaktiparis. b) Puidust klambri baasile loodud kontaktpaar.

4.5 Mõõtetehnikad

4.5.1 Impedantsi mõõtmine

Tehnika, mida kasutati mõõteobjektide impedantsi mõõtmiseks, oli impedantsspektroskoopia, mille tarbeks kasutati PalmSens4 elektrokeemiliste mõõtmiste liidest koos PStace tarkvaraga või Biologic BP-300 elektrokeemia mõõtekompleksi EC-Lab tarkvaraga. Eksperimentide puhul, kus tuli mõõta rohkem kui kahest punktist korraga, ühendati PalmSens4 külge ka MUX8-R2 multiplekser. Sel viisil oli võimalik mõõta kuni kaheksast punktist korraga. Impedantsspektroskoopiaga mõõdeti mõnede mõõtmiste puhul spektrit (sagedusvahemik 100 kHz – 0,3 Hz, amplituud 10 mV, alaliskomponent 0 V), aga vaadeldi ainult ühel sagedusel (9,9 kHz) mõõdetud impedantsi, mis väljendas elektrolüütilist juhtivust. Ülejäänute puhul mõõdeti impedantsi fikseeritud sagedusel (1000 Hz) saavutades ajalise lahutuse suurusjärgus 0,1 – 3 s. Tulemuste tõlgendamiseks avaldati parameeter $Z(\text{Re})$ elektrolüütilise takistuse kirjeldamiseks.

4.5.2 Jäikuse mõõtmine

Jäikuse mõõtmiseks kasutati miniatuurset häälmähistäiturit, mis kohandati kaubanduslikust optilisest kettaseadmest. Häälmähise külge oli kinnitatud miniatuurne jõuandur, mis koosnes kahest tensomõõturist Wheatstone'i poolsilla konfiguratsioonis. Jõuandur oli ühendatud National Instruments SC-2345 signaaltöötlusbloki külge, mis edastas mõõdetud signaalid LabVIEW 2021 tarkvaral jooksvale programmile. Jäikuse väärtuseid koguti intervalliga 4 s.

Sensorit ei kalibreeritud jõuühikutele, vaid esitati normeeritud väärtus algväärtuse suhtes. Häälmahis pandi võnkuma signaaligeneraatori Rigol DG1032 abil genereeritud siinussignaale sagedusel 0,5 Hz ja täisamplituudiga 500 mV.

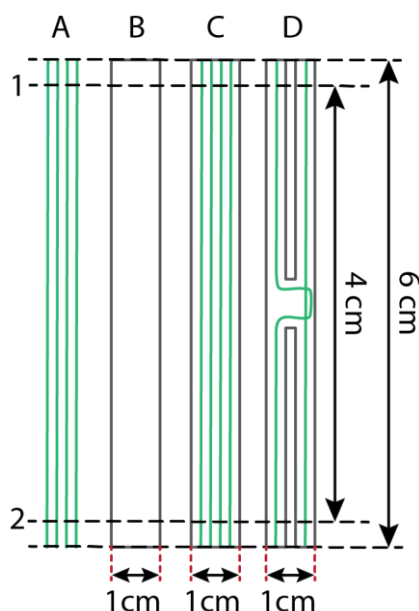
4.5.3 Skaneeriv elektronmikroskoopia

Valminud mõõteobjektide läbilõiget uuriti kasutades skaneerivat elektronmikroskoopi. Hitachi TM3000, mis oli varustatud tagasipeegeldunud elektronide detektoriga. Enne mikroskoobiga uurimist paigutati mõõteobjektid üle õõ vaakumahju, et eemaldada mõõteobjektidest lenduvad komponendid. Seejärel võeti uus skalpellitera, et tekstiili lõikamisel oleks tulemuseks võimalikult puhas läbilõige.

5 Tulemused ja arutelu

5.1 Vedeliku ümberpaigutuse kineetika uurimine tekstiilis

Esiteks uuriti vedeliku liikumist tekstiili ja aktiivsete materjalide sees. Selleks töötati välja neljast katseobjektist koosnev komplekt (Joonis 9), mis võimaldas vedeliku kineetika uurimist olulistest konfiguratsioonides: ainult paralleelsed niidid (Joonis 9, A), ainult aktiivne materjal (Joonis 9, B), paralleelsed niidid aktiivses materjalis (Joonis 9, C) ning ristuvad niidid aktiivses materjalis (Joonis 9, D). Kõigi mõõteobjektide pikkus oli 6 cm ning aktiivseid materjale sisaldavate objektide laius oli 1 cm. Mõõteobjekti A 8 paralleelset niiti seoti lisaniidi abil omavahel kahest otsast kokku. Sidumiskohad asusid üksteisest 4 cm kaugusel (Joonis 9).

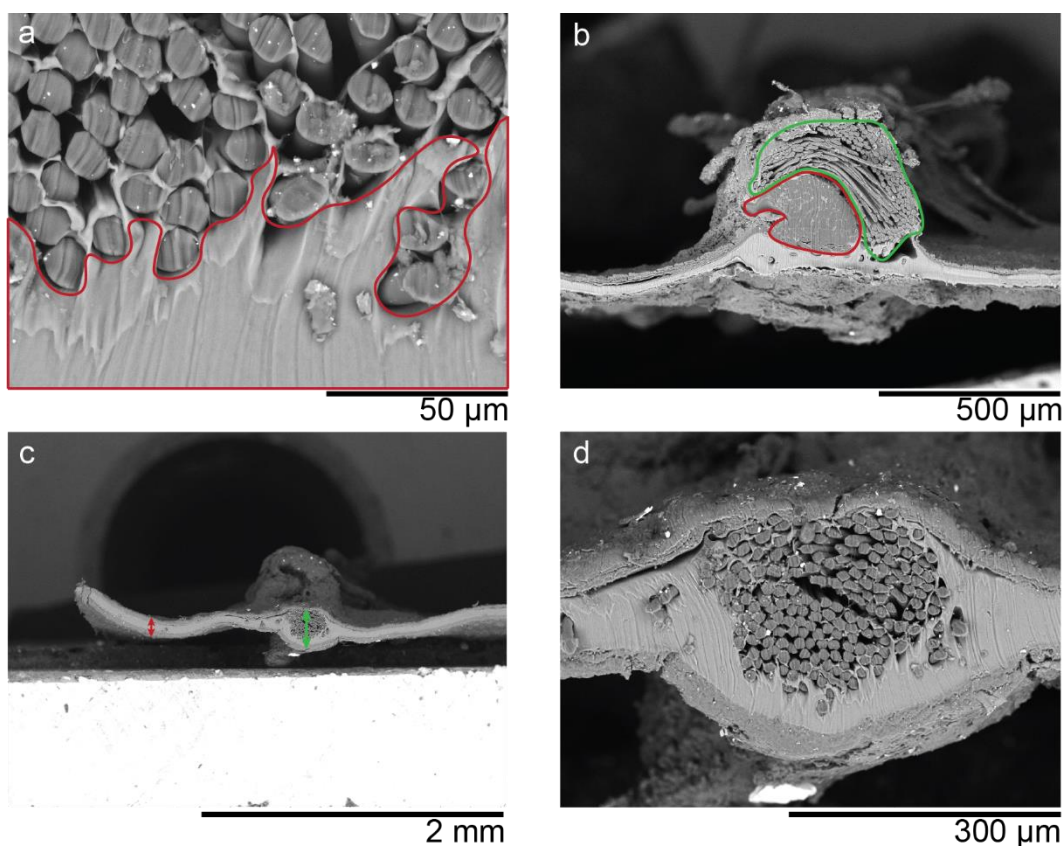


Joonis 9. Komplekt neljast erinevast mõõteobjektist vedeliku transpordi uurimiseks aktiivses tekstiilis. A.) Neljast paralleelsest niidist koosnev mõõteobjekt. Paralleelsed niidid seoti omavahel kokku kahest üksteisest 4 cm kaugusel asuvast punktist (1 ja 2). B.) Ainult elektroaktiivsest materjalist koosnev mõõteobjekt. C.) Paralleelsed niidid aktiivse materjali sees. D.) Ristuvad niidid aktiivse materjali sees.

Mõõteobjektid B, C ja D valmistati peatükis 4 kirjeldatud viisil kahe erisusega – mõõteobjekt B ei sisaldanud niiti ning viimase etapina voolukollektorit mõõteobjektidele ei kantud, kuna sooviti uurida objektide lokaalseid protsesse. Valminud objektid kaeti enne mõõtmise alustamist ühtlaselt ligikaudu 1 ml lahusega, mille komponendid olid EMIM-Otf (15%), PC (16%) ja MP (69%).

5.1.1 Mõõteobjektide A, B, C ja D morfoloogia

Valminud mõõteobjektide läbilõiget vaadeldi skaneeriva elektronmikroskoobiga nagu on kirjeldatud peatükis 4.5.3. Joonisel 10a on näha tekstiili kiudude vahel olevad kapillaarpinnad, mis on avatud ning võimaldavad head vedeliku transporti. Samuti on näha, kuidas pihustatud membraanikiht on moodustunud niidi ühele küljele. Joonisel 10b on näha mõõteobjekti C ühe niidi läbilõiget. Punase piirjoonega ümbritsetud alas on näha ajutist lahustuvat niiti, mille eemaldamine ei ole valmistamise protsessis täielikult õnnestunud ning roheline piirjoonega ümbritsetud alas asub polüesterniit. Joonisel 10b on näha, et lahustuva niidi kiud on vedelikuga kokkupuutel kleepunud kokku üheks kiuks, mille tagajärjena ei ole olemas ka kapillaarpindu, mööda mida vedelik saaks liikuda.



Joonis 10. Skaneeriva elektronmikroskoobi kujutised mõõteobjektide A, B, C ja D läbilõigetest. a) Niidi kiudude vahel on vedelikku juhtivad kapillaarpinnad. Punane piirjoon tähistab membraanikihti. b) Mõõteobjekt C. Punane piirjoon tähistab lahustumata ajutist niiti. Roheline piirjoon tähistab polüesterniiti. c) Elektroaktiivse tekstiili paksus niidi koha peal (roheline nool) ja laminaadi koha peal (punane joon) d) Polüesterniit on edukalt integreeritud elektroaktiivsetesse materjalidesse ja ajutised tugistruktuurid on täielikult lahustunud (objekt D).

Joonisel 10c on näha, et tekstiili niit suurendab elektroaktiivsetest materjalides valmistatud laminaadi (Joonis 10c, punase noolega) paksust vähemalt kaks korda. Joonisel 10d on kujutatud läbilõige polüesterniidist, mille integreerimine aktiivsete materjalidega on täiuslikult õnnestunud. Seda väljendavad efektiivsed avatud kapillaarpinnad niidi kiudude vahel, mis

annab põhjust eeldada väga head kapillaarsust polümeerse maatriksi sisse integreeritud tekstiilis.

5.1.2 Mõõteobjektid A, B ja C

Kui tilgutada objekti peale lahustit, jaotub see kapillaarjõu toimele objekti sees. Mõõteobjektidega A, B ja C sooviti demonstreerida, et vedelik liigub materjali sees eelistatult mööda tekstiili kiude, mitte läbi poorse materjali.

Kui tilgutada vedelikku objekti otsa nr 1 peale (Joonis 11a.i), oodatakse, et vedelik liigub edasi objekti otsa nr 2 poole (Joonis 11a.ii). Seda kinnitab objekti takistuse langus nr 2 pool (Joonis 11a.ii). Kui peale lahusti aurustumist (Joonis 11a.iii) objekti takistus otsa nr 2 pool taastub madalamale väärtusele ning otsa nr 1 pool kõrgemale kui alguses (Joonis 11d), on olemas tõestus, et lahusti kandis endaga kaasa ka elektrolüüti ehk elektrolüüdi kontsentratsioon on nüüd otsa nr 2 pool suurem kui otsa nr 1 pool (Joonis 11d).

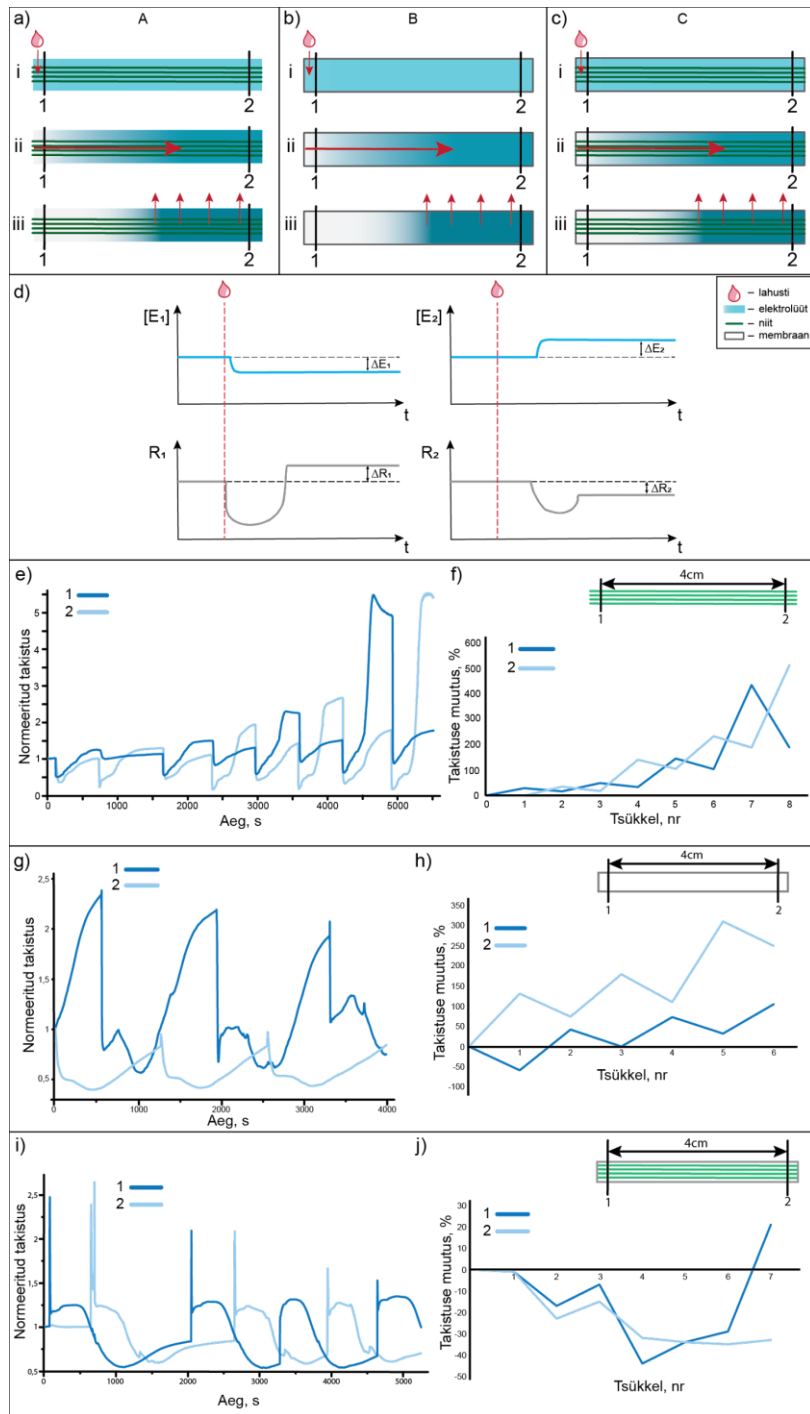
Kirjeldatud oodatava käitumise uurimiseks asetati iga objekt (A, B ja C) peatükis 4.4.2 kirjeldatud hoidikusse ning objekti külge ühendati peatükis 4.4.3 kirjeldatud klamberkontaktid. Kontaktid asusid üksteisest 4 cm kaugusel. Mõõtetehnika mida kasutati objektide impedantsi mõõtmiseks oli peatükis 4.5.1 kirjeldatud impedantsspektroskoopia. Kõikide objektide puhul tilgutati otstele nr 1 ja 2 vaheldumisi ligikaudu 10-minutiliste vahedega mõni tilk lahustit (MP). Üks tsüklil mõõtmistes oli lahusti tilgutamine objekti ühele otsale ja 10-minutiline paus.

Mõõteobjekt A puhul alustati tilgutamist otsa nr 1 poolt ning kokku läbiti 8 tsüklit. Objekti A impedantsi monitoorimise tulemustes (Joonis 11e) avaldub oodatud elektrolüüdi transportimise efekt. Kui lahustit lisati otsa nr 1 poolt, taastus tsükli lõpuks sealt punktist mõõdetud impedants kõrgemale tasemele ning otsa nr 2 pool madalamale tasemele kui tsükli alguses. Tsüklitel, kus lahustit lisati otsa nr 2 poolt, näeme vastupidist tulemust. Tulemusi illustreerib hästi ka Joonis 11.f, kus on näha, et vahelduva polaarsusega vedeliku lisamise tulemuseks on vahelduv takistuste suhe.

Mõõteobjekt B puhul alustati tilgutamist otsa nr 1 poolt ning kokku läbiti 6 tsüklit. Võrreldes objekti A tulemustega (vahelduva polaarsusega vedeliku lisamise tulemuseks on vahelduv takistuste suhe) näeme siin mõõdetud takistuste väärtustes (Joonis 11g) täpselt vastupidist tulemust. See on kinnituseks oodatud tulemusele, et vedelik liigub paremini mööda tekstiili kiude kui polümeerset maatriksit. Otsal, mille poolt lahustit lisati, taastub tsükli lõpuks takistus madalamale tasemele ja teisel otsal kõrgemale tasemele kui tsükli alguses (Joonis 11g), mis

tähendab, et elektrolüüdi transport mõõteobjekti otste vahel oli minimaalne või olematu. Samuti kinnitab saavutatud tulemust Joonis 11h, kus on näha, et vahelduva polaarsusega vedeliku lisamise tulemuseks ei ole vahelduv takistuste suhe. Poorse materjali halva kapillaarsuse tõttu vedeliku transporti ei toimunud, mis tähendab, et takistuse langus oli põhjustatud aurustuva lahusti lisamisest mõõtepunkti ümbrusesse. Teise otsa lahustit ei lisandunud ehk tsükli raames toimus materjali kuivamine, mis põhjustas takistuse suurenemise. Võimalik, et kui oleks kasutatud vähem lenduvat lahustit, ehk lahusti ei oleks nii kiiresti aurustunud, oleks pikemate tsüklite jooksul toimunud elektrolüüdi transport. Antud töös kasutatud aktiivsed materjalid iseseisvalt ei ole head materjalid kapillaarsuse toimet vedeliku transportimiseks, sest poorses materjalis on vedeliku liikumine oluliselt aeglasem kui tekstiilis - enne, kui jõuab toimuda elektrolüüdi transport, on lahusti aurustunud.

Mõõteobjekt C puhul alustati lahusti tilgutamist otsa nr 1 poolt ning kokku läbiti 7 tsüklit. Objekti C impedantsi monitoorimise tulemustest (Joonis 11i) on näha oodatud efekti väiksemal määral kui objekti A puhul. Objekti otsal, kuhu lahustit tilgutati, on tsükli lõpuks kas samaväärne või suurem ning teisel otsal kas samaväärne või madalam takistus. Joonis 11j näitab, et üleüldine trend objekti juhtivuses on mõlemas otsas languse poole. Kehvem vedeliku transport võrreldes objektiga A ning üldine takistuse langus kogu objektis võib olla ebaõnnestunud valmistamise protsessi tagajärg. Tõestus selle kohta on olemas Joonisel 10b, kus on kujutatud objekti C läbilõiget. Seal on näha, et ajutist lahustuvat niiti ei ole valmistamise protsessi käigus edukalt eemaldatud. Eksperimendi vältel lahustiga kokku puutunud lahustuv niit märgus ning selle tagajärjena muutus kiuline niit ühtlaseks fiibriks, mille ainus kapillaarpind moodustub kontaktist polüesterniidiga. Lahustuv niit mõjutas ka polüesterniidi kapillaarpindade hulka, kuna nagu on näha ka Joonisel 10b, on polüesterniit lahustuva niidi olemasolu tõttu lapikumaks surutud.

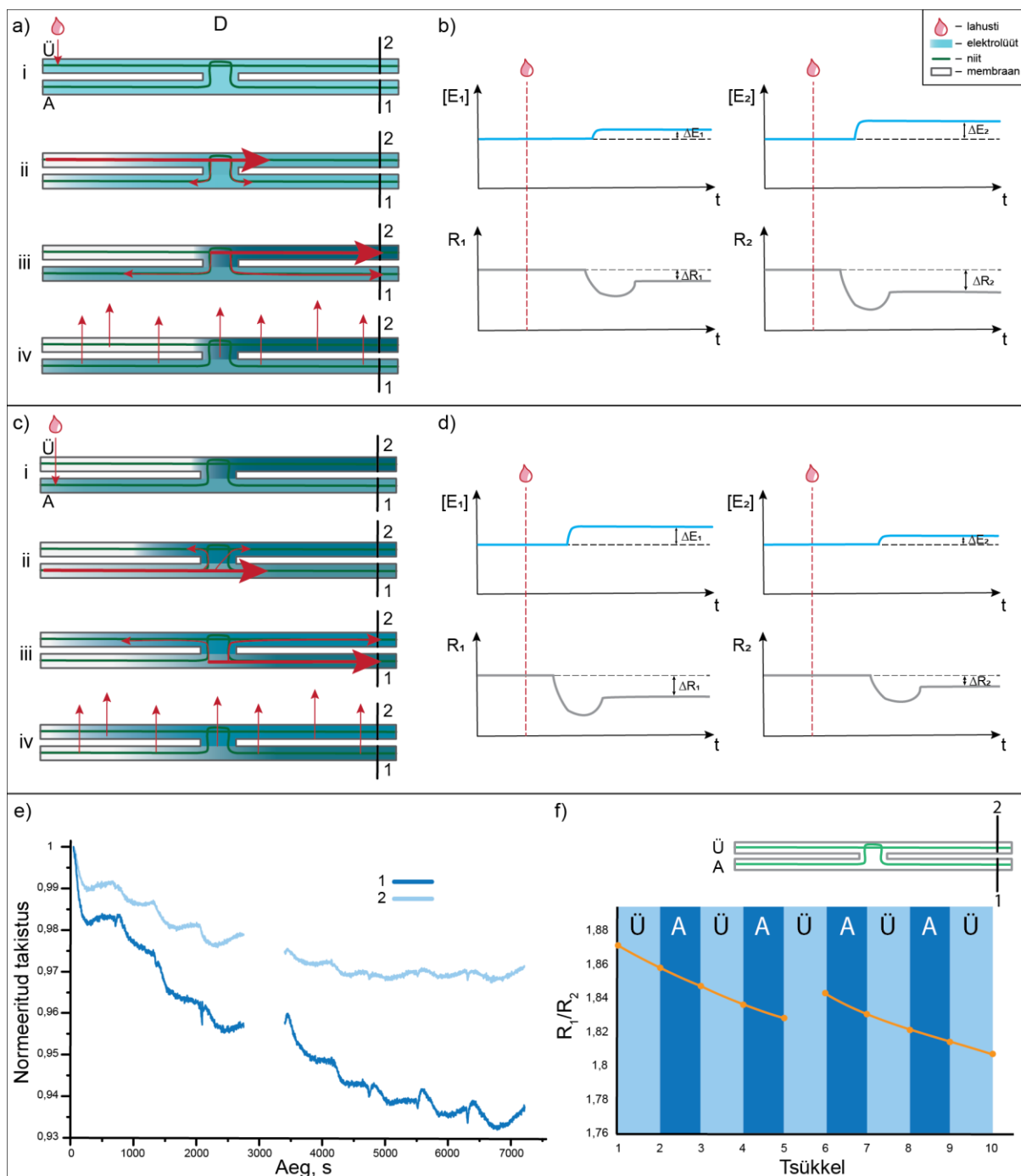


Joonis 11. Skeemid mõõteobjektide A, B ja C oodatavast käitumisest ja mõõtmistulemused. a) Teoreetiline lahusti ja elektrolüüdi liikumine mõõteobjekt A puhul. Tumedam sinine tähistab kõrgemat elektrolüüdi kontsentratsiooni ja valge/heledam sinine madalamat. Punased nooled tähistavad vedeliku liikumise eelistatud suunda. b) Teoreetiline lahusti ja elektrolüüdi liikumine mõõteobjekt B puhul. c) Teoreetiline lahusti ja elektrolüüdi liikumine mõõteobjekt C puhul. d) Teoreetilised elektrolüüdi kontsentratsiooni ja impedantsi muutused otstes 1 [E_1] ja 2 [E_2]. Punase punktiiriga on tähistatud lahusti tilgutamise moment. e) Mõõteobjekti A impedantsi monitoorimise tulemused. Tumesinine joon tähistab nr 1 tulemust ning helesinine tähistab nr 2 tulemust. Kokku mõõdeti 8 tsüklit. f) Mõõteobjekti A impedantsi muutused iga tsükli järel. Tumesinine tähistab muutust nr 1 juures ning helesinine nr 2 juures. Kokku mõõdeti 6 tsüklit. g) Mõõteobjekti B impedantsi monitoorimise tulemused. Tumesinine tähistab tulemust otsa nr 1 juures ning helesinine otsa nr 2 juures. Kokku mõõdeti 6 tsüklit. h) Mõõteobjekti B impedantsi muutused iga tsükli järel. Tumesinine tähistab muutust otsa nr 1 juures ning helesinine otsa nr 2 juures. i) Mõõteobjekti C impedantsi monitoorimise tulemused. Tumesinine joon tähistab otsa nr 1 tulemust ning helesinine tähistab otsa nr 2 tulemust. Kokku mõõdeti 7 tsüklit. j) Mõõteobjekti C impedantsi muutused iga tsükli järel. Tumesinine tähistab muutust otsa nr 1 juures ning helesinine otsa nr 2 juures.

5.1.3 Mõõteobjekti D tulemused

Mõõteobjekt D koosnes kahest puutekontaktis olevast (ristuvast) niidist, mis olid integreeritud aktiivsete materjalidega (Joonis 9, D) (Joonis 12). Ristuvad niidid moodustasid neljajarulise kujundi, mille keskel oli kaks ühist ristumispunkti. Kui tilgutada lahustit ühele ristuvatest niitidest, oodatakse, et niitide ristumine võimaldab vedeliku ühtlase jaotumise. Antud juhul, kui tilgutada objekti D ülemise (Ü) või alumise (A) haru peale lahustit (Joonis 12a,c), oodatakse elektrolüüdi hulga suurenemist nii otsa nr 1 kui ka otsa nr 2 juures.

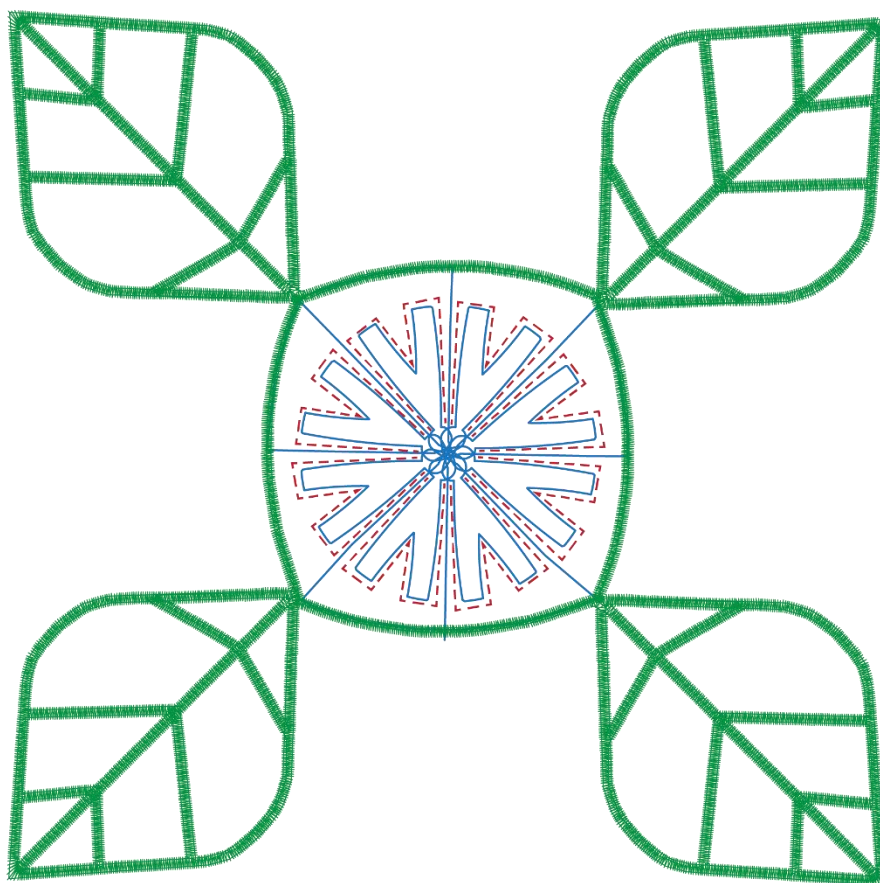
Mõõteobjektis D vedeliku liikumise uurimiseks tilgutati lahustit ülemisele (Ü) ja alumisele (A) harule vaheldumisi ligikaudu 10-minutiliste vahedega, alustades ülemisest harust. Kokku läbiti 10 tsükli. Objekti D impedantsi monitoorimise tulemustest (Joonis 12e) näeme, et iga tsükli lõpuks on nii otsa nr 1 kui ka 2 juurest mõõdetud takistus saavutanud madalama väärtuse kui tsükli alguses. Otsa nr 1 pealt mõõdetud takistuse langused jäid vahemikku 0,5 – 2 % ja otsa nr 2 langused vahemikku 0,25 – 1 %. See tulemus on tõestuseks, et kui tilgutada lahustit ühele niidile mis ristub ja on kontaktis vähemalt ühe teise niidiga, siis toimub nende niitide vahel vedeliku ümberjaotumine. Joonisel 12f olevalt graafikult, mis näitab otsalt nr 1 ja 2 mõõdetud takistuste omavahelist suhet iga tsükli lõpuks, näeme, et elektrolüüt ei jagunenud mõlema otsa peale võrdselt, sest tsükli lõpus mõõdetud takistuste suhe ei ole 1 vaid on suurusjärgus 1,8. Sõltumata sellest, millisele harule (kas ülemisele või alumisele) lahustit tilgutatakse juhtivus mõlemas otsas paraneb. Seda näitab mõõdetud takistuste suhte eksponentsiaalne langus - graafiku kulg ei sõltu sellest, kas lahustit lisati Ü või A koha peale.



Joonis 12. Mõõteobjekti D teoreetilised ja reaalsed tulemused. a) Teoreetiline lahusti ja elektrolüüdi liikumine mõõteobjekt D puhul, kui lahustit tilgutatakse ülemisele (Ü) harule. Tumedam sinine tähistab kõrgemat elektrolüüdi kontsentratsiooni ja valge/heledam sinine madalamat. Punased nooled tähistavad vedeliku liikumise eelistatud suunda. b) Teoreetilised elektrolüüdi kontsentratsiooni ja impedantsi muutused punktides 1 ja 2, kui lahustit tilgutatakse ülemisele (Ü) harule. Punase punktiiriga on tähistatud lahusti tilgutamise moment. c) Teoreetiline lahusti ja elektrolüüdi liikumine mõõteobjekt D puhul, kui lahustit tilgutatakse alumisele (A) harule. Tumedam sinine tähistab kõrgemat elektrolüüdi kontsentratsiooni ja valge/heledam sinine madalamat. Punased nooled tähistavad vedeliku liikumise eelistatud suunda. d) Teoreetilised elektrolüüdi kontsentratsiooni ja impedantsi muutused punktides 1 ja 2, kui lahustit tilgutatakse alumisele (A) harule. Punase punktiiriga on tähistatud lahusti tilgutamise moment. e) Mõõteobjekti D impedantsi monitoorimise tulemused. Tumesinine joon tähistab otsa nr 1 tulemust ning helesinine tähistab otsa nr 2 tulemust. Kokku mõõdeti 10 tsükli. f) Mõõteobjekti D otsa nr 1 ja otsa nr 2 impedantsi väärtuste suhe iga mõõdetud tsükli lõpus.

5.2 Vedelikupõhine mälu ja niidipõhine kood tekstiilis

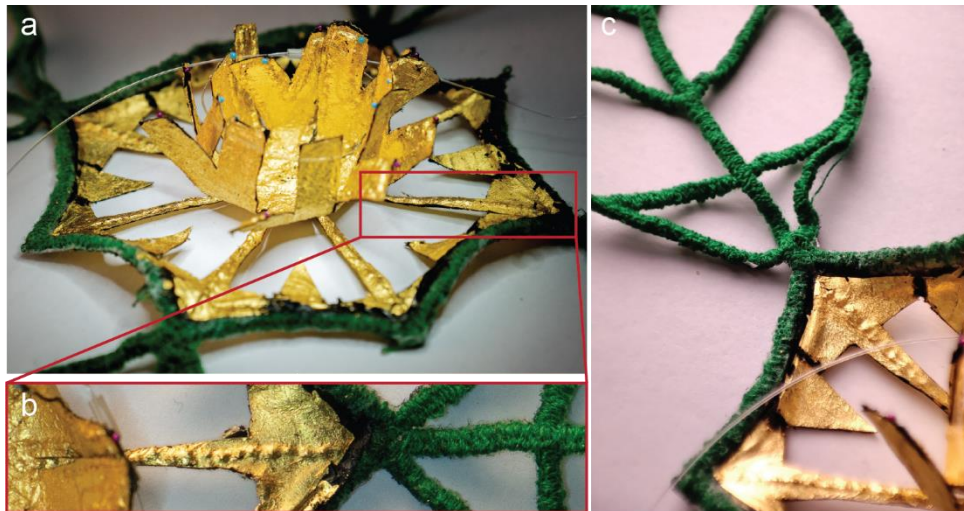
Peatükis 3.2 püstitatud töö eesmärgi nr 2 saavutamiseks tuli luua tikandi disain, mis võimaldaks ühendada passiivse ja aktiivse tekstiili üheks tervikuks, et uurida vedeliku võimaldatud mälu niidil põhinevas koodis. Selleks loodi elektroaktiivne tekstiil, kus aktiivse ala tekstiil oleks ümbritsetud ja ühendatud passiivse tekstiiliga.



Joonis 13. Loodud tikandi disain. Aktiivse tekstiili osa tikandist on kujutatud sinise värviga ning passiivne osa rohelisega. Punane punktiirjoon tähistab lõikejoont täiturite defineerimiseks.

Kuna loodava tekstiili funktsionaalsus oli inspireeritud taimedes esinevast kapillaarsusest, otsustati ka tikandi disaini (Joonis 13) puhul otsida inspiratsiooni loodusest. Taimes liiguvad vesi ja toitained läbi ksüleemi lehtede ja õite poole. Aktiivne vee transport, mis on biokeemiliste protsesside poolt juhitud, põhjustab vee pumpamise taime õielehtedes olevatesse rakkudesse, mis sünkroonselt pundudes põhjustavad lille õie kroonlehtede sünkroonse avanemise. Analoogselt - tikandis transpordib lahusti elektrolüüti mööda tekstiili kapillaarpindu. Alad, kus elektrolüüdi transpordi tulemusena elektrolüüdi kontsentratsioon suureneb, on nüüd juhtivamad, materjali jäikus väheneb ning aktiivsest alast defineeritud täitured liiguvad suurema amplituudiga. Nii aktiivse kui ka passiivse ala tikandid on tikitud

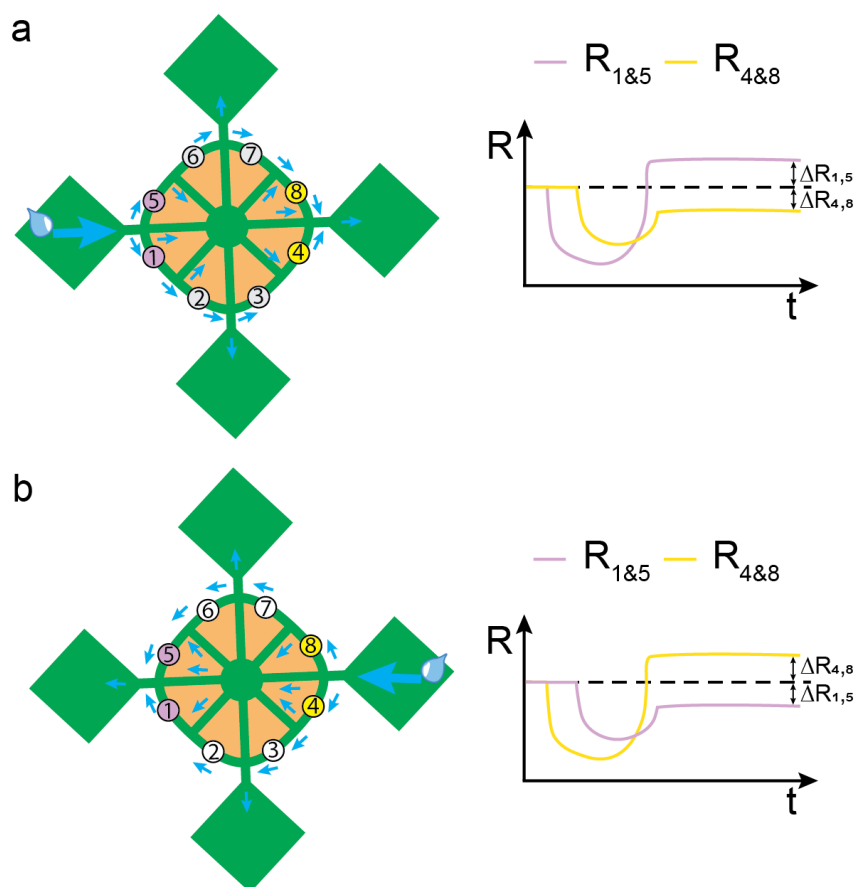
ühast pidevast niidist peatükis 4.2 kirjeldatud meetodil. Valminud tikandis on aktiivse ja passiivse ala niidid omavahel ühendatud 8 ristuva niidi abil (Joonis 14b,c), mis võimaldab vedeliku liikumist passiivselt alalt aktiivsele mööda ristuvate niitude kapillaarpindu sarnasel viisil nagu on näha peatükis 5.1.2 esitatud tulemustes. Elektroaktiivsed materjalid kanti tikandile peatükis 4.3 kirjeldatud meetodil. Valminud elektroaktiivse tekstiili aktiivsest alast defineeriti 8 täiturit skalpelliga lõikamise teel nii, et ühtegi niiti ei lõigatud läbi (Joonis 13)(Joonis 14a).



Joonis 14. Valminud elektroaktiivne tekstiil. a) Elektroaktiivse tekstiili aktiivsest alast defineeriti 8 täiturit. b) Aktiivne ja passiivsed alad on omavahel ühendatud tekstiili kiudude abil. c) Aktiivne ala on ümbritsetud passiivse tekstiiliga.

Valminud elektroaktiivse tekstiili põhjal sooviti uurida vedelikupõhist mälu niidipõhises koodis. Kui tilgutada tekstiili passiivsele alale lahustit, jaotub see piki tekstiiliniitide kiudude vahel olevaid kapillaarpindu ning poorset maatriksit (vastavalt tulemustele peatükis 5.1.2) kogu tekstiilis. Tekstiiliniitide programmilise paigutusega on võimalik määrata vedeliku eelistatud liikumise suund. Kui näiteks tilgutada lahustit tekstiili kõige vasakpoolsemale passiivsele alale, migreerub lahusti edasi kõigis ülejäänud suundades, kandes endaga kaasa ka elektrolüüti (Joonis 15). Kui võrrelda nüüd vasakpoolsemat ala ülejäänud tekstiiliga, on tekstiili takistus kõrgem sealpool, kuhu lahustit tilgutati, kui sealpool, kuhu lahusti elektrolüüti kandis (Joonis 15). See olek püsib, kuni seda muudetakse ehk kuni lahustit lisatakse süsteemi nii, et elektrolüüti transportitakse tagasi vähem juhtivatele aladele. Kui süsteem seisab pikaajaliselt, ilma et mälu olekut muudetaks, toimub tekstiilis aeglane spontaanne vedeliku jaotumine mööda kapillaarpindu. Siinkohal on kujunenud välja analoog muutmäluga. Lahustit lisades kirjutatakse uus info kiukoodi, mis otseselt avaldub tekstiili kstes stiimulitele – suurem elektrolüüdi kontsentratsioon muudab materjali kiukoodi poolt defineeritud aladel pehmemaks ja juhtivamaks ning täiturite liikumise amplituud suureneb.

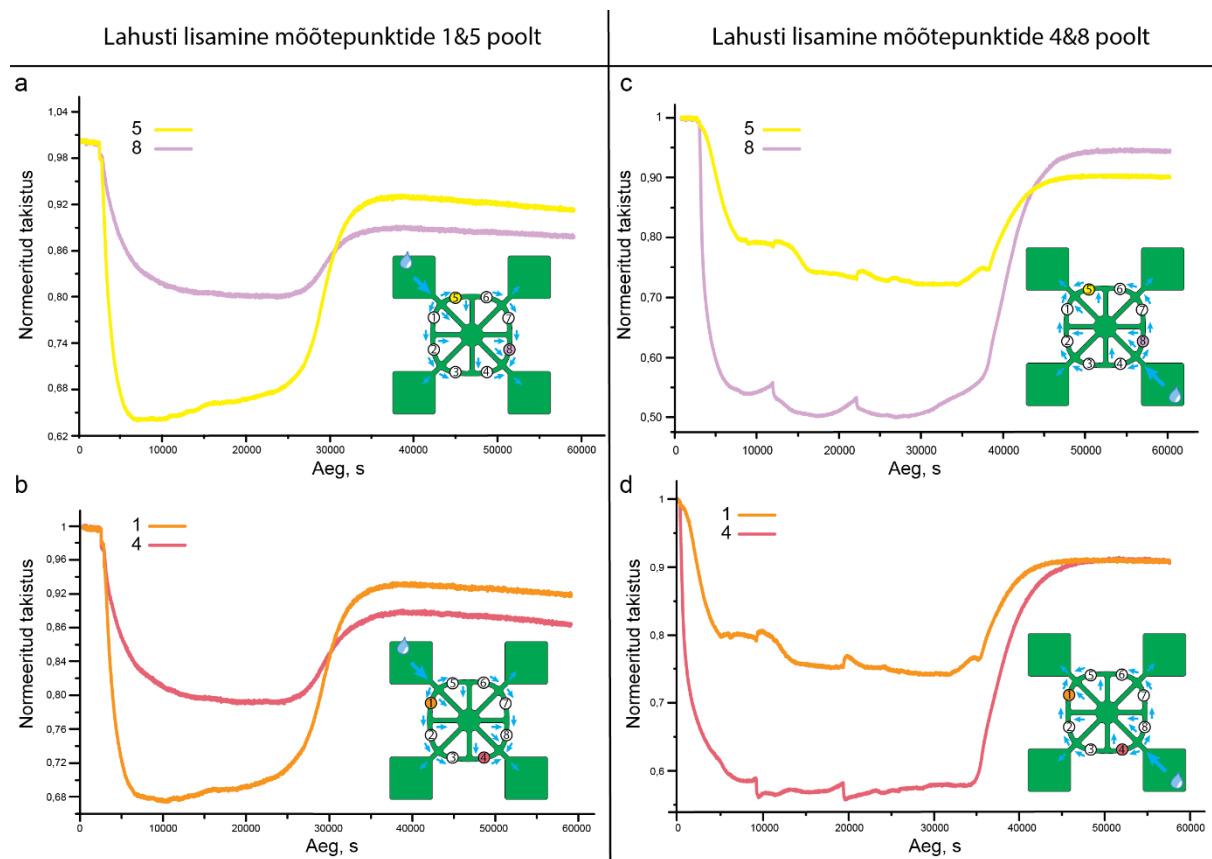
Vedelikupõhise mälu uurimiseks kiukoodis asetati elektroaktiivne tekstiil peatükis 4.4.1 kirjeldatud kasti ning mõõteobjekti külge ühendati 8 peatükis 4.4.3 kirjeldatud magnetitega varustatud kontaktipaari. Kontaktide täpne paigutus on kujutatud Joonisel 15.



Joonis 15. Vedelikupõhise mälu oodatav käitumine. Roheline värv tähistab tekstiili, oranž värv tähistab aktiivsete komponentidega integreeritud tekstiili. Numbrid 1-8 tähistavad mõõtepunkte. Sinised nooled tähistavad oodatavat lahusti ja elektrolüüdi liikumist läbi kogu tekstiili. a) Elektroaktiivse tekstiili mälusse kirjutatakse vasakule poole kõrge takistusega olek ning paremale poole madala takistusega olek. b) Elektroaktiivse tekstiili mälusse kirjutatakse paremale poole kõrge takistusega olek ning vasakule poole madala takistusega olek.

Mõõtetulemuste analüüsimiseks võrreldi omavahel mõõtepunktide 1, 5, 4 ja 8 (Joonis 15) takistusi, sest üksteisest kõige kaugemal asuvad mõõtepunktid kirjeldavad elektrolüüdi transporti läbi aktiivse tekstiili kõige paremini. Esmalt tilgutati mõõtepunktide 1 ja 5 pool olevale passiivsele tekstiilile 2 ml lahustit. Pea 17 tundi kestnud pika monitoorimise tulemusena näeme, et takistus kogu süsteemis on langenud (Joonis 16a,b). See on tingitud MP kontsentratsiooni tõusust suletud mõõtekeskkonnas. Lisaks üldisele langustrendile näeme ka, et mõõtepunktides 1 ja 5 taastus takistus peale lahusti aurustumist suuremale väärtusele kui punktides 4 ja 8 (Joonis 16a,b). See on tõestuseks, et on toimunud elektrolüüdi transport – mõõtepunktide 1 ja 5 juures asuvasse materjali kirjutati võrreldes algseisuga kõrgema takistusega olek ning punktide 4 ja 8 juurde madalama takistusega olek. Nende kahe oleku vahe ongi mälu. Materjali kirjutatud oleku säilimist demonstreerivad mõõdetud väärtuste stabiilne

olek alates ajahetkest 35000 sekundit (Joonis 16a,b). Mälu ülekirjutamiseks tilgutati järgmisena punktide 4 ja 8 pool olevale passiivsele tekstiilile 3 ml lahustit. Tulemusena näeme, et punktis 5 taastus takistus peale lahusti

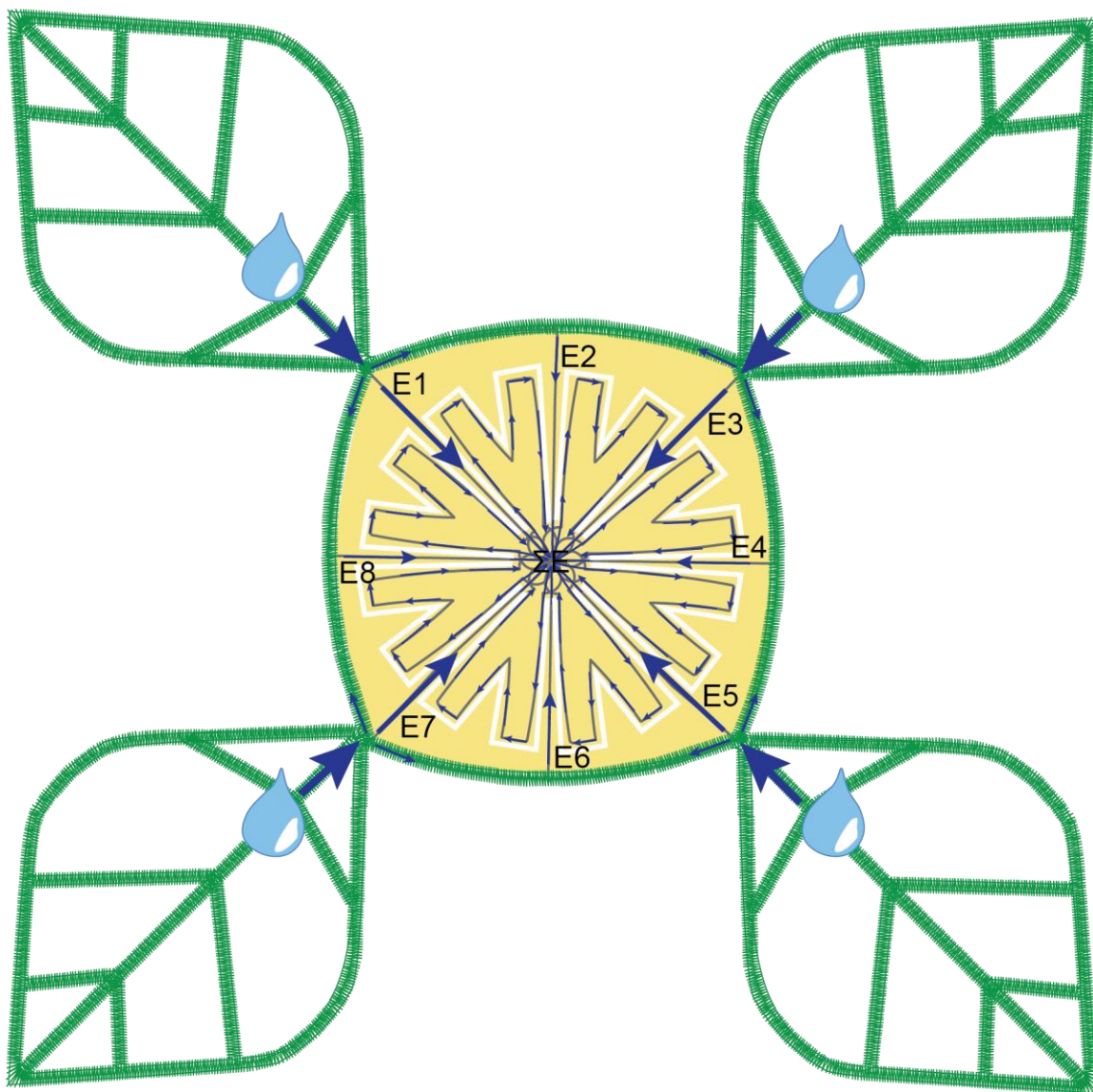


Joonis 16. Targa tekstiili impedantsspektroskoopia tulemused. Kõigil graafikutel on kujutatud impedantsi suhtelist muutust peale lahusti lisamist võrreldes algseisuga. Kollane graafik tähistab mõõdetud muutust mõõtepunkti 5 juures, roosa mõõtepunkti 8 juures, oranž mõõtepunkti 1 ning punane mõõtepunkti 4 juures. Iga tulemuste graafik sisaldab ka piktogrammi tulemuste lugemise lihtsustamiseks. a) Lahustit lisati passiivse tekstiili peale kanali 1 ja 5 poolt. Graafikul on mõõtepunktide 5 ja 8 tulemused. b) Lahustit lisati passiivse tekstiili peale kanali 1 ja 5 poolt. Graafikul on mõõtepunktide 1 ja 4 tulemused. c) Lahustit lisati passiivse tekstiili peale kanali 4 ja 8 poolt. Graafikul on mõõtepunktide 5 ja 8 tulemused. d) Lahustit lisati passiivse tekstiili peale kanali 4 ja 8 poolt. Graafikul on mõõtepunktide 1 ja 4 tulemused

aurustumist madalamale kui punktis 8 (Joonis 16c), mis tähendab edukat elektrolüüdi transporti läbi elektroaktiivse tekstiili, mis omakorda viitab edukale mälu ülekirjutamisele materjalis. Mõõtepunktides 1 ja 4 taastusid takistuse väärtused sarnasele tasemele (Joonis 16d). Kuna niitude paigutus defineerib vedeliku liikumise eelistatud, mitte kindla suuna, on võimalik, et seekord kandis lahusti elektrolüüti rohkem passiivse tekstiili poole, mis asus mõõtepunktide 2 ja 3 vahel, mis tähendab, et elektrolüüt jagunes ühtlaselt mõõtepunktide 1, 2, 3 ja 4 vahel. Sarnaselt eelmise lahusti lisamise tagajärjele on ka seekord mõõtepunktides uued stabiilsed väärtused, ehk mällu on kirjutatud uued väärtused.

5.3 Tekstiilne kood

Nüüd kui peatükis 5.1 on edukalt demonstreeritud tekstiili suurepäraseid kapillaarsuse omadusi ning peatükis 5.2 demonstreeriti vedelikupõhise tekstiilse mälu võimalikkust, soovib antud lõputöö demonstreerida ka kiukoodi võimalikkust. Peatükis 5.2 kirjeldatud elektroaktiivses tekstiilis moodustab aktiivne ala 8 niidiga domeeni, mis defineerivad kohale jõudnud aine migreerumise suuna (passiivselt alalt aktiivsele) ja koguse. Need 8 niiti koonduvad keskel üheks sõlmpunktiks, mis tagab selles punktis niitide ühtlase niiskumise (vastavalt tulemustele peatükis 5.1.2) (Joonis 17). Seejärel liigub vedelik sõlmpunktist edasi mööda iga täituri sees olevaid niite ning tulemuseks on kõigi täituri samaaegne juhtivuse paranemine (Joonis 17) – täituriid avanevad suurema amplituudiga ning muutuvad vedeliku lisandumise tõttu pehmemaks. Selline samaaegne juhtivuse paranemine ning jäikuse muut on saavutatav kiukoodi abil, kus aktiivse ala keskel olev kiudude sõlmpunkt käitub kõigi radiaalsete sisendite keskmistajana ja jaoturina (Joonis 17).

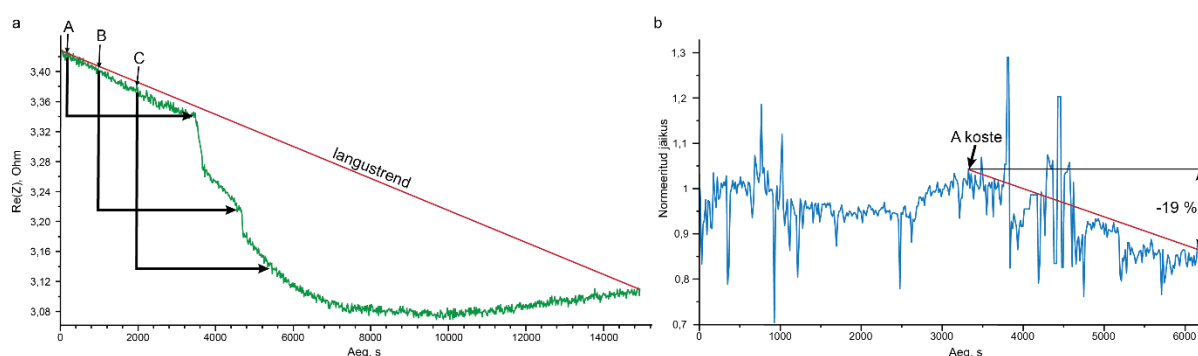


Joonis 17. Oodatav vedeliku jaotumine aktiivse tekstiili kiudude sõlmpunktis. Tumesinised nooled tähistavad passiivsetele aladele tilgutatud lahusti migreerumise suunda. Aktiivse ala piires tähistavad sinised nooled lisaks lahusti liikumisele ka elektrolüüdi liikumise suunda.

Elektrolüüdi transpordi uurimiseks kiukoodis asetati elektroaktiivne tekstiil peatükis 4.4.1 kirjeldatud mõõtekeskkonda ning mõõteobjekti aktiivse ala keskpunkti ühendati peatükis 4.4.3 kirjeldatud magnetitega varustatud kontaktpaar. Ühe aktiivsest alast defineeritud täituri juurde asetati jäikuse sensor nii, et sensori ots oleks kogu mõõtmise vältel täituriga kontaktis.

Mõõtmise ajal tilgutati 0,25 ml lahustit neljale aktiivset ala ümbritsevatele rohelistele lehekujulistele tikanditele, ehk kokku 1 ml. Seda tehti kolm korda (Joonis 18a), ehk kogu mõõtmise ajal tilgutati tikandile kokku 3 ml lahustit. Üldine takistuse langustrend aktiivse tekstiili keskel olevas niitide sõlmpunktis on põhjustatud mõõtekeskkonna niiskuse tõusust lahusti lisamise tõttu. Koste esimesele lahusti tilgutamisele ilmnes 3295 sekundit ehk ligikaudu 55 minutit peale lisamise hetke (Joonis 18a). Sellel hetkel jõudis esimene kogus vedelikku

aktiivse ala keskel olevasse niitide sõlmpunkti. Koste teisele lahusti tilgutamisele ilmnes 3568 sekundit ehk ligikaudu 60 minutit peale lisamise hetke (Joonis 18a). Koste kolmandale lahusti lisamisele ei ole visuaalselt tulemuste graafikult eristatav, kuna takistuse langus jääb müra piiresse. Kuna aeg, mis kulus esimese ja teise tilgutamise koste väljendumiseks, oli väga sarnane, on põhjust eeldada, et see oli sarnane ka kolmanda puhul, ehk ligikaudu 55-60 minutit. Jooniselt 18b näeme, et umbes 1,5 minutit peale esimese vedeliku koguse jõudmist niitide sõlmpunkti hakkas ka mõõdetud täituri jäikus märkimisväärselt langema. Eksperimendi lõpuks oli täituri jäikus vähenenud 19%.



Joonis 18. a) Aktiivse ala kiudude sõlmpunktist mõõdetud takistus. A, B ja C on lahusti tilgutamise ajahetked, nooled tähistavad vastava lisamise hetke kostet. b) Mõõdetud täituri jäikus muutus märkimisväärselt alates lahusti lisamise hetke A koste avaldumisest (3475 s).

Mõõtmise tulemusena võime väita, et elektrolüüdi transport lahusti abil mööda kiukoodi on selgelt väljendunud, sest kosted lahusti lisamisele süsteemi avaldusid väga sarnaste intervallidega. Seega ei olnud vedeliku liikumine mööda kiukoodi juhuslik. Kiukoodi toimimist tõestas ka kiire muutus mõõdetud täituri jäikus peale seda, kui esimene koste niitide sõlmpunktis avaldus.

Kiukoodi narratiivi täielikuks tõestamiseks tuleks korrata kirjeldatud mõõtmist ka viisil, mil lahustit tilgutatakse passiivse tekstiili erinevatele aladele (nt ainult ühele passiivsele alale korraga) ning samal ajal mõõdetakse sünkroonselt mitut õielehe iseloomulikku parameetrit (nt jäikus, takistus, täituri liigutusulatus). Vedeliku migreerumise suur ajakonstant on indikaator mitte optimeeritud vedeliku transpordist. Vedeliku liikumine mööda kiudu on küll kiirem kui mööda ümbritsevat poorset maatriksit (vastavalt tulemustele peatükis 5.1), kuid antud suurus tekstiili korral siiski ebapiisav ning nõuaks täiendavat optimeerimist.

6 Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö tulemusena esitleti kontseptsiooni vedelikupõhise mälu kohta kiukoodis. Kontseptsiooni demonstreerimiseks valmistati viis erinevat mõõteobjekti. Tekstiili sisaldavate objektide valmistamiseks kasutati tekstiilitehnoloogia valdkonnast tuntud masintikkimist. Lõputöö raames katsetas autor esimest korda tikandi mustri disainimist vektorgraafika tarkavara abil. Tikitud tekstiilile kanti kindlatele aladele ette nähtud järjekorras elektroaktiivsed materjalid, mis defineerisid elektroaktiivse tekstiili aktiivsed ja passiivsed alad.

Töö ühe tulemusena demonstreeriti, et käesoleva töö raames kasutatud aktiivsed materjalid iseseisvalt ei ole head materjalid kapillaarsuse toimet vedeliku transportimiseks, sest poorses materjalis on vedeliku liikumine oluliselt aeglasem kui tekstiilis. Sellest tulenevalt saab väita, et tekstiili integreerimine poorsete elektroaktiivsete materjalidega defineerib vedeliku liikumise mustri, sest efektiivsed kapillaarpinnad paiknevad piki tekstiili niiti.

Teise tulemusena demonstreeriti vedelikupõhise mälu toimimist kiukoodis. Lahusti migreerumisel tekstiili ühest servast teise kannab lahusti endaga kaasa ka elektrolüüti, materjali juhtivus muutub lokaalselt. Juhtivuse erinevused lokaalsete punktide vahel moodustavad tekstiilse mälu. Saavutatud erinevused säilisid mälus seni, kuni need uue elektrolüüdi transpordiga üle kirjutati.

Kolmanda tulemusena esitleti tekstiilikiudude kahemõõtmelise paigutuse toimimist kiukoodina. Tekstiilikiud määrasid vedeliku eelistatud liikumise suuna tekstiilis. Aktiivse ala keskel koondusid 8 niiti üheks sõlmpunktiks, mis tagas selles punktis niitide ühtlase niiskumise ning juhtivuse paranemine. Vedelik liikus sõlmpunktist edasi mööda iga täituri sees olevaid niite ning tulemuseks oli ühe mõõdetud täituri jäikuse langus. Samaaegne juhtivuse paranemine ning jäikuse muut saavutati kiukoodi abil, kus aktiivse ala keskel olev kiudude sõlmpunkt käitus kõigi radiaalsete sisendite keskmistajana ja jaoturina.

Tuleviku perspektiivis vajab välja töötatud kontseptsioon põhjalikumat karakteriseerist ja arendamist. Sel juhul võimaldaks välja pakutud tehnoloogia valmistada vedelikuga juhitavaid tarku tekstiile.

Viited

- [1] E. Q. Yumbla, Z. Qiao, W. Tao, and W. Zhang, “Human Assistance and Augmentation with Wearable Soft Robotics: a Literature Review and Perspectives,” *Curr. Robot. Rep.*, vol. 2, no. 4, pp. 399–413, Dec. 2021, doi: 10.1007/s43154-021-00067-0.
- [2] J. L. Pons, “Rehabilitation Exoskeletal Robotics,” *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 29, no. 3, pp. 57–63, May 2010, doi: 10.1109/MEMB.2010.936548.
- [3] E. B. H. Inc, “Ekso Bionics® Unveils its Latest Assistive Exoskeleton Innovation for Industrial Use,” *GlobeNewswire News Room*, Aug. 20, 2020. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/08/20/2081341/29945/en/Ekso-Bionics-Unveils-its-Latest-Assistive-Exoskeleton-Innovation-for-Industrial-Use.html> (accessed Jan. 30, 2023).
- [4] C. Xiang *et al.*, “Electroactive Textile Actuators for Breathability Control and Thermal Regulation Devices,” *Polymers*, vol. 11, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2019, doi: 10.3390/polym11071199.
- [5] W. Pyka *et al.*, “On the use of textile materials in robotics,” *J. Eng. Fibers Fabr.*, vol. 15, p. 1558925020910725, Jan. 2020, doi: 10.1177/1558925020910725.
- [6] A. Menges, F. Kannenberg, and C. Zechmeister, “Computational co-design of fibrous architecture,” *Archit. Intell.*, vol. 1, no. 1, p. 6, Jul. 2022, doi: 10.1007/s44223-022-00004-x.
- [7] G. Mengaldo *et al.*, “A concise guide to modelling the physics of embodied intelligence in soft robotics,” *Nat. Rev. Phys.*, vol. 4, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2022, doi: 10.1038/s42254-022-00481-z.
- [8] N. El-Atab *et al.*, “Soft Actuators for Soft Robotic Applications: A Review,” *Adv. Intell. Syst.*, vol. 2, no. 10, p. 2000128, 2020, doi: 10.1002/aisy.202000128.
- [9] G. Z. Lum *et al.*, “Shape-programmable magnetic soft matter,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 113, no. 41, pp. E6007–E6015, Oct. 2016, doi: 10.1073/pnas.1608193113.
- [10] S. Shahidi, “Magnetic nanoparticles application in the textile industry—A review,” *J. Ind. Text.*, vol. 50, no. 7, pp. 970–989, Feb. 2021, doi: 10.1177/1528083719851852.
- [11] J. Zięba, “Models of Textile Magnetic Core,” *Res. J. Text. Appar.*, vol. 11, no. 4, pp. 87–92, Jan. 2007, doi: 10.1108/RJTA-11-04-2007-B009.
- [12] F. Ceken, G. Pamuk, O. Kayacan, A. Ozkurt, and Ş. S. Ugurlu, “Electromagnetic Shielding Properties of Plain Knitted Fabrics Containing Conductive Yarns,” *J. Eng. Fibers Fabr.*, vol. 7, no. 4, p. 155892501200700400, Dec. 2012, doi: 10.1177/155892501200700404.
- [13] V. Glyva *et al.*, “Studying the Shielding of an Electromagnetic Field by a Textile Material Containing Ferromagnetic Nanostructures.” Rochester, NY, Feb. 28, 2020. Accessed: Apr. 04, 2023. [Online]. Available: <https://papers.ssrn.com/abstract=3705250>
- [14] X. Wang, Z. Huang, D. Miao, J. Zhao, J. Yu, and B. Ding, “Biomimetic Fibrous Murray Membranes with Ultrafast Water Transport and Evaporation for Smart Moisture-Wicking Fabrics,” *ACS Nano*, vol. 13, no. 2, pp. 1060–1070, Feb. 2019, doi: 10.1021/acsnano.8b08242.

Tänuavaldused

Tänan Janno Toropit ja Indrek Musta, sest ilma juhendajateta ei valmi ükski lõputöö. Suur tänu huvitavate ja sisukate teadusliku arutelude eest. Samuti tänan toetuse eest kirjutamise faasis.

Kõige enam tahan tänada Saonit, et ta suudab mulle olla toeks isegi nii kaugelt nagu on Saksamaal. Aitäh, et alati minusse usud!

Aitäh toredatele töögrupi kaaslastele, kellega nende nelja aasta jooksul laboris tutvavaks olen saanud ning kellega koos on käidud erinevatel konverentsidel ja kirjutamislaagrites.

Aitäh mu perele, kes täpselt parajal määral ikka uurivad kuidas mul läheb ja mida ma teen. Aitäh, et olete alati olemas!

Belive in yourself, because if you don't, nobody will.

Lihtlitsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mona Kүүts,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

„Vedelikupõhine mälu kiukoodis“

mille juhendajad on Janno Torop ja Indrek Must

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates **20.05.2026** kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Mona Kүүts

20.05.2023