

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Magnus Kaldjärv
**PIHUSTIPRINTER IOONSETE
MAHTUVUSLIKE LAMINAATIDE
TOOTMISEKS**

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:
dots. Indrek Must

Tartu 2020

Resümee/Abstract

Pihustiprinterioonsete mahtuvuslike laminaatide tootmiseks

Ioonised mahtuvuslikud laminaatidid on suure arengupotentsiaaliga tehislühaste materjal, mille laialdasem arendamine ja kasutamine on seni olnud piiratud nende töömahuka käsitöölise tootmisprotsessiga, kust saadava produkti kvaliteet on kõikuv.

Selle lahenduseks on tootmisprotsessi automatiseerimine. Arvprogrammjuhitud tööpingile ühendatakse automaatne pihustipüstol. Vältimaks komposiitse elektrodimaterjali pihustamiseks kasutatava suspensiooni sadestumist süsteemis, luuakse püstolpihustit läbiv pihustatava vedeliku tsirkulatsioon. Loodud süsteemi töö karakteriseeritakse ning antakse ülevaade funktsionaalsete osade ja süsteemi sobivusest vastava ülesande valguses.

CERCS: T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika; T152 Komposiitmaterjalid

Märksõnad: automatiseerimine, pihustamine, sadenemine

Spray Printer for Manufacturing Ionic Capacitive Laminates

Ionic capacitive laminates are a material of artificial muscles with high development potential, the wider development and use of which has so far been limited by their labor-intensive artisan production process, the quality of which varies.

The solution is to automate the production process. An automatic spray gun is connected to the numerically programmed machine tool. To prevent the suspension used to spray the composite electrode material from settling in the system, a circulation of the spray liquid passing through the spray gun is created. The operation of the created system is characterized and an overview of the suitability of the functional parts and the system in the light of the respective task is given.

CERCS: T125 Automation, robotics, control engineering; T152 Composite materials

Keywords: automation, spraying, settling

Sisukord

Töös kasutatavad lühendid	5
Töös kasutatavad väljendid	6
1. Sissejuhatus	7
2. Ülevaade	8
2.1 ülevaade pehmerobotikast	8
2.2 ülevaade tehislühastest	9
2.3 painduvad elektrilise kaksikkihi superkondensaatorid / ioonsed mahtvuslikud laminaadid	9
2.3.2. CPC elektroodimaterjalina	10
2.3.2. Tekstiilarmeeringuga ioonsed ja mahtvuslikud laminaadid	11
2.2. Automaatne püstolpihustiga värvimine	12
3. Eesmärk	13
3.1 Eeltingimused	13
3.2. Töö eesmärgi püstitus	14
4. Metoodika	15
4.1. Masina ülesehitus	15
4.1.1. Pihusti	17
4.1.2. Tsirkulatsioon	17
4.1.3. Suruõhk	20
4.1.4. Kuivatamine pärast pihustamist	21
4.2. Pihustamine	21
4.2.1. Digitaalne kontroll	21
4.2.2. Pihustusmuster	21
4.2.3. Pihustatav materjal	24
4.2.4. Substraat	24
4.3. Süsteemi karakteriseerimine	25
4.3.1. Katsete ülesehitus	25
4.3.2. Katsetulemuste analüüs	26
4.3.2.1. Analüüsitava graafiku saavutamine	26
4.3.2.2. Poolpaksuslaid	28

4.3.2.3. Haripunktide kõrgus	29
4.3.2.4. Mõõtmiste eesmärk	30
5. Tulemused ja arutelu	31
5.1. Tsirkulatsioon	31
5.2. Optimaalsete parameetrite leidmine	32
5.3. Katseseeriade analüüs	33
5.3.2. Pihustuskoguse hulga püsivus	33
5.3.2. Poolpaksuslaius	33
5.3.3. Ühe katse ulatuses raja harja kõrguse muutus	34
5.4. Arutelu	35
5.4.1. Süsteemi piirangud	35
5.4.2. Erinevate lahustega pihustamine	36
5.4.3. Tsirkulatsioonsegamise hinnang	36
5.4.4. Kasutatava automaatse pihustuspüstoli hinnang	38
6. Järeldused	39
7. Kokkuvõte	40
8. Lisad	41
Lisa 1	41
9. Viited	43

Töös kasutatavad lühendid

ICL	ingl <i>Ionic Capacitive Laminate</i> , ioonne mahtuvuslik laminaat
CPC	ingl <i>Carbon-Polymer Composite</i> , süsinik-polümeer komposiit
EAP	ingl <i>Electroactive Polymer</i> , elektroaktiivne polümeer
PVdF	ingl <i>Polyvinylidene fluoride</i> , polüvinüülideen floriid
HFP	ingl <i>Hexafluoropropylene</i> , heksafluoropropüleen
CNC	ingl <i>Computer Numeric Control</i> , arvprogrammjuhtimine
MP	4-metüül-2-pentanoon

Töös kasutatavad väljendid

G kood	programmeerimiskeel käskude edastamiseks automatiseeritud tööpingile
Rada	CNC kontrollitud programmi ajal ühtlasel liikumisel püstolpihustiga pihustamisel substraadile jääv materjal
Rajavahe	püstolpihustiga pihustamisel kahe paralleelse kulgemisega raja telgede vaheline kaugus
Pihusti	töös kasutatud automaatne pihustipüstol

1. Sissejuhatus

Pehmerobootilised painduvad tehislihased pakuvad potentsiaali luua tarku tekstiile ning loodust jäljendavaid pehmeid roboteid [1] ning huvi selliste lahenduste vastu leidub. Kuid hetkereaalsus on, et nende valmistamine on töömahukas tegevus, kus üks valminud seeria võib oma kvaliteedilt erineda teisest palju [2]. Nii taandub vastav areng ja edasimineku raskesti saadava ja sageli madala kvaliteediga materjali taha.

Seni käsitööna tehtud suure arengupotentsiaaliga ioonsete mahtuvuslike laminaatide tootmise meetodika puhul nähakse võimalust automatiseerida. Sellel eesmärgil pannakse kokku prototüüpne süsteem, mis peaks kannatama materjali tootmiseks kasutatava mitte just väga püsivat süsiniksuspensiooni ilma selle lahuses sulamata ja ummistumata. Lahendusena suspensiooni torudesse sadenemise probleemile nähakse töölahuse tsirkuleerimisest. Katsetades leides sobivad parameetrid asja töötamiseks, jõutakse lähemale loodetavale eesmärgile, ühtlase suspensiooni kihi pihustamiseni, mis võimaldaks hakata pehmeid lihaseid tootma. Üles seatud süsteem ja leitud lahendused vajavad katsetamist ja hindamist, et kas nad on sel kujul võimelised oma ülesannet täitma ning selle info baasil tehakse tähelepanekuid tulevasteks arendusteks.

2. Ülevaade

2.1 ülevaade pehmerbootikast

Inimeste poolt ehitatud mehaanilised robotid on enamjaolt jäigad, mõeldud tegema kiireid, täpseid, tugevaid ja punktuaalseid korduvaid liigutusi, kasutades selleks riigidsetest materjalidest elektri ja sisepõlemismootoreid. Kuid kõike seda harilikult kontrollitud tingimustes. Väljapool, loomade maailmas, domineerivad pehmed materjalid. Jäljendades loomade morfoloogiat ning nende kudede ehitust on võimalik luua pehmeroboteid, mis suudaks oma füüsilise paindlikkusega taluda ja hakkama saada harjumatute ja muutuvate tingimustega. [3]

Pehmerbootika tehnoloogiad on võimalik kasutada muidu hariliku mehaanilise süsteemi ühe alaosana, näiteks haaratsina [4], või loomaks autonoomset platvormi ainult neil põhinevalt [1].

(Joonis 2.1)



Joonis 2.1. Pehmerbootiline haarats [4] ja autonoomne robotvaksik [1].

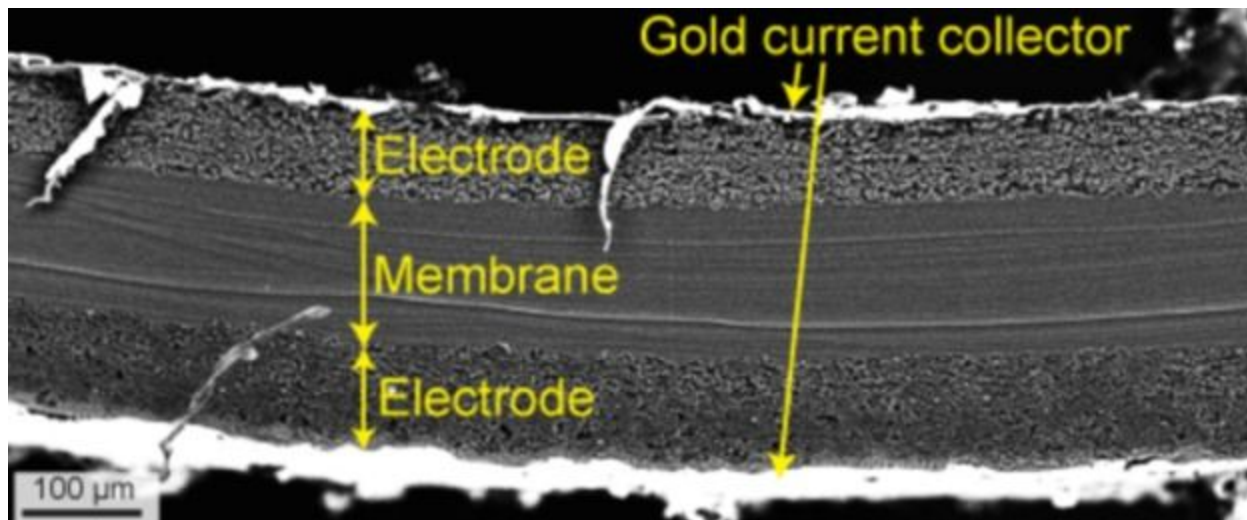
2.2 ülevaade tehislihastest

Üheks looduses rohkelt liikumiseks ja liigutamiseks kasutatavaks organiks on lihas, mis kujutab endast ühest massi, mis on võimeline oma kuju muutma kokku tõmmates, paisudes või keerdues välise stiimuli toimetel [5]. Sarnast käitumist simuleerivaid materjale ja seadmeid kutsutakse tehislihasteks. Vastavat kolme baasliikumist kombineerides on võimalik luua keerulisemaid liikumisi nagu näiteks paindumist (ühel küljel toimub kokkutõmbumine samaaegselt teise poole paisumisega).

2.3 painduvad elektrilise kaksikkihi superkondensaatorid / ioonsed mahtvuslikud laminaadid

Elektrilise kaksikkihi superkondensaatorid ehk ioonsed mahtvuslikud laminaadid (ICL) kujutavad endast kihilisi komposiitmaterjale, koosnedes kahelt poolt elektronjuhtivate elektrodidega kaetud ionjuhtivast membraanist. Et parandada laengu ühtlust kondensaatori ulatuses, kaetakse elektrodid väljast hea juhtivusega voolukollektori kihiga. (Joonis 2.2)

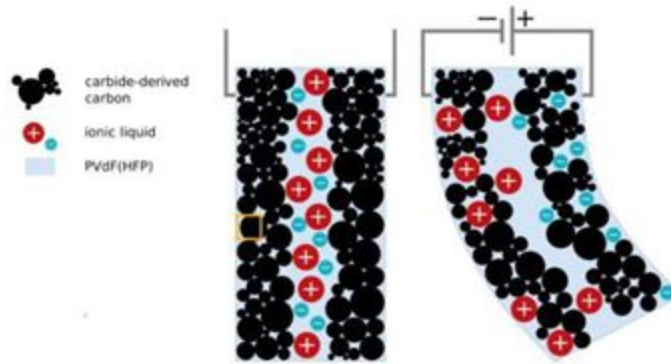
Ioonsete mahtvuslike laminaatide valmistamisel lehtmaterjalina on need neile pingel rakendamisel võimelised painduma, millest võib järeldada nende rakendatavust tehislihastena.



Joonis 2.2. Skaneeriva elektronmikroskoobi pilt ICL läbilõikest, PVdF-HFP membraaniga ICL näitel [1]; *electrode* - elektrood, *membrane* - membraan, *gold current collector* - kullast voolukollektor

2. 3. 2. CPC elektroomaterjalina

Levinud elektroomaterjal: komposiit pulbrilisest süsinikust, polümeerist ning vedelast elektrolüüdist. Süsinikelektroodidega komposiidi polümeermembraan on ioone läbilaskev. CPC-d sisaldavad reeglina elektrolüüdina ioonvedelikku, mis võimaldab neil töötada nii kuivas keskkonnas kui ka vaakumis. Niisuguses süsteemis saavad liikuda mõlemad, nii anioonid kui ka katioonid. Elektrivälja toimel liiguvad anioonid ja katioonid vastaselektroodide suunas ja nende sisse (Joonis 2.3). Kasutatava ioonvedeliku kationide ja anioonide suuruse erinevuse tõttu paisuvad poorsed süsinikelektroodid erinevalt nende poole liikuvate ionide suuruste erinevuse järgi ning sellest tulenevalt membraan paindub. [6]



Joonis 2.3. CPC elektrodidega täitur, ingl *carbide-derived carbon* – karbiidist saadud süsinik, ingl *ionic liquid* - ioonvedelik, [7]

CPC elektrodidega laminaatide valmistamiseks kasutatakse peamiselt kaht meetodit. Esimese meetodi puhul valmistatakse esmalt kõik kihid eraldi ja seejärel kuumpressitakse kihid kokku üheks laminaadiks [8]. Teise meetodi puhul kantakse elektrodid membraanile pihustamise teel. [9]

2.3.2 Tekstiilarmeeringuga ioonsed ja mahtuvuslikud laminaadid

Armeeritud tekstiili kasutamisel sarrusena kasvab suuremate koguste valmistamisel valmistusprotsessi korratavus, samuti on välistatud lühise teke elektrodide vahel. Kui teised meetodid võimaldavad luua vaid suhteliselt väikesi laboratoorseid koguseid, siis tekstiilarmeeringu meetodil on valmistatud laminaate diameetriga ligikaudu 15 cm (rakisena kasutatud käsitöö tikkimisraami), kuid vastavat suurusjärku ei peeta kindlasti mõõtmete piiriks. Tootmisprotsessi käigus valmistati tehislislas kiht-kihi haaval funktsionaalseid kihte tekstiilarmeeringule pihustamise teel. Kuigi tekstiilarmeeringul on rakendus vaid ehituse faasis, siis ei ole täheldatud sellel toimet elektromehaanilistele omadustele. Väljatöötud meetod võimaldab pihustamisega head kontrolli membraani ja elektrodide paksuse osas. Kõigi kihtide kandmine sama meetodiga üksteise peale, kasutades samu lahusteid, tagab materjali äärmise homogeensuse ja välistab komposiidi lagunemise kihtide eraldumise tõttu (delamineerumine). Kuna valmistamisprotseduur selle suhteliselt uue meetodi abil osutub märkimisväärselt lihtsamaks ja kiiremaks, siis loodetakse meetodit arvestatavaks arenguhüppeks pehmerobotika rakenduste jaoks sobivate pehmete täiturite tootmises. [2]

2. 2. Automaatne püstolpihustiga värvimine

Automaatne surveõhul töötava püstolpihustiga pinna lahusega katmine on automatiseeritud tootmises rohkelt kasutatav meetod. [10] Kasutades arvuti juhitud kontrollprogrammi on võimalik erinevate püstolpihustite mudelite erinevate konfiguratsioonide juures värvimiskoonuse laiuseks saavutada mõnest millimeetrist paarikümne sentimeetrini[10] ning värvitava kihi läbimõõduks saavutada suurusjärg 10 mikromeetrit[11].

3. Eesmärk

Varasemalt on kasutatud ICL-i elektrodidmaterjali süsiniksuspensiooni pihustamiseks käsitsi kontrollitud aerograafi. Kuigi vastav tehnoloogia võimaldab teoreetiliselt tootmise automatiseerimist, on seda läbi viidud vaid käsitööna, mille tõttu on protsess jätkuvalt suhteliselt töömahukas ning produkti kvaliteet sõltub arvestatavalt protsessi läbiviijast [2].

3.1 Eeltingimused

Andres Punningu poolt on eelnevalt selle ülesande lahenduseks üles seatud esmane süsteem. Selleks ta modifitseeris CNC freespingi liigutama automatiseeritud pihustipüstolit ja kinnitas pingile selle toimimiseks vajalikke õhukanaleid võimaldava rõhujaguri, samuti integreeris seinakontakti voolul töötava fööni voolu kontrolli pingi kontrollplokki. Lisaks viis ta läbi katsetusi eeldatavalt süsiniksuspensiooniga füüsiliselt sarnaste omadustega zelatiinilahusega. Nii saavutas ta pihusti töötavuse uutel tingimustel CNC pingi kontrollplokkist kontrollitud solenoidi, omandas esialgse ülevaate süsteemi programmeerimise võimalustest ja lõi paar lihtsamat näidiskoodi süsteemi opereerimiseks.

Saavutatud katsete käigus jõuti järeldusele, et pihustatavate lahuste määrduvusest ning nende kuivamisel tekkivate aurude intensiivsest lõhnast ja tervist kahjustavast toimest tulenevalt tuleb järgnevad katsetused ja potentsiaalne läbi viia tõmbekapi tingimustes.

Esialgasel süsteemil puudus seal hoiustatava vedeliku tsirkulatsioon, ka ei esinenud teisi meetodeid vedeliku segamiseks. Lahust oli võimalik süsteemi lisada vaid paagi katte mutrivõtmega eemaldamisega ning süsteemi tühjendada pihustades või pihusti lahti võtmisega.

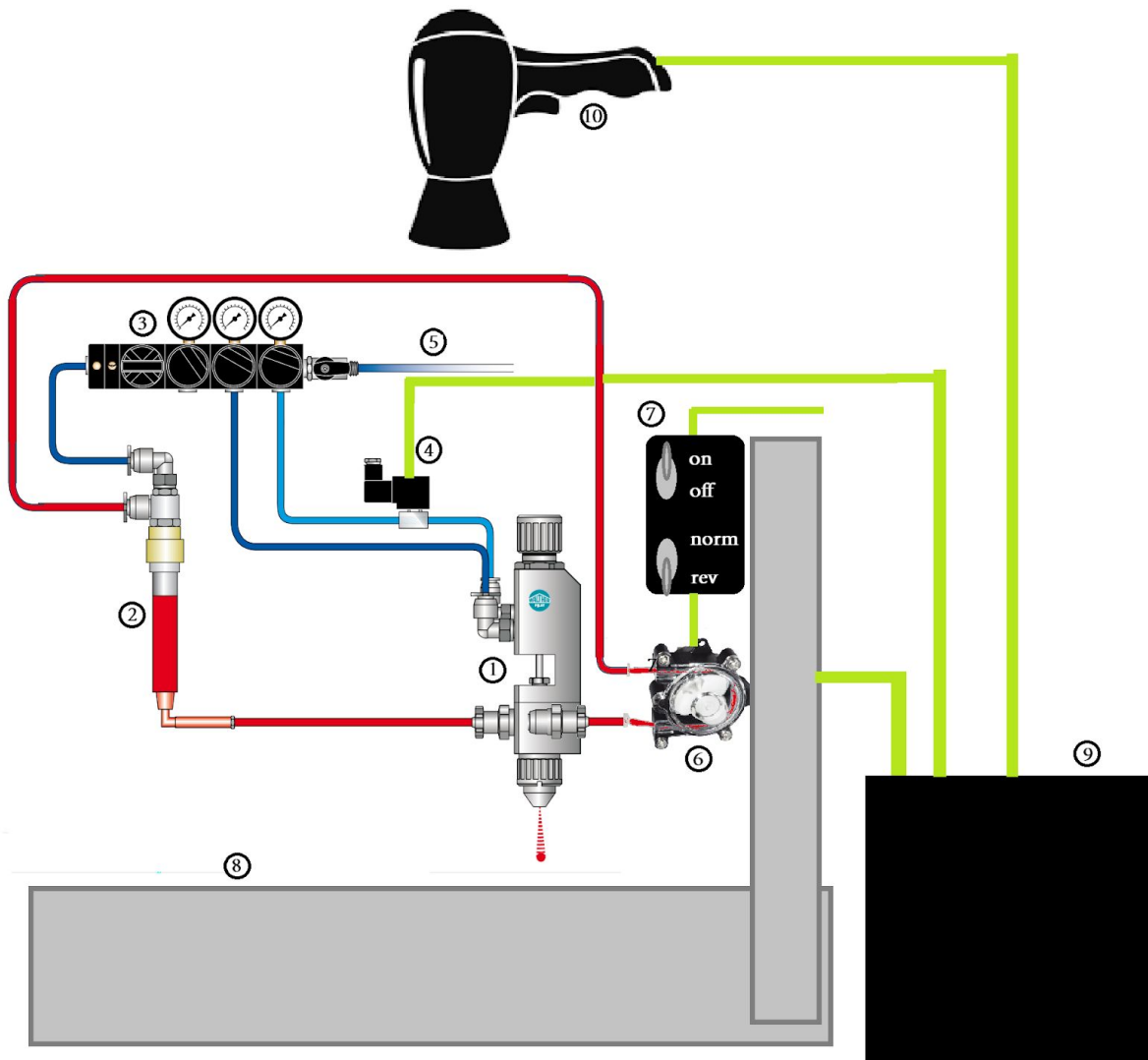
3.2. Töö eesmärgi püstitus

Uurimistöö eesmärgiks on luua automatiseeritud pihustussüsteem süsiniksuspensiooni pihustamiseks ICL valmistusprotsessis. Vältimaks süsiniksuspensiooni sadenemist süsteemi osades on vaja luua töölahuse segamine läbi tervet süsteemi läbiva tsirkulatsioonisüsteemiga. Loodud süsteemiga arendada meetodika CNC kontrollitult ühtlase ja korratava pihustustulemuse saavutamiseks ilma suurte materjali kadudeta keskkonda ning hinnata tulemust praktiliste katseseeriade ja nende tulemuste graafilise analüüsiga substraadi pinna suhtelise katvuse alusel. Saadud tulemuste põhjal anda hinnang kasutatud funktsionaalsete elementide sobivusele antud rolli ja analüüsida süsteemi kui terviku arenguvõimalusi.

4. Metoodika

4.1. Masina ülesehitus

CNC pink (Joonis 4.1-8), millel on freesi mehhanism vahetatud automaatse värvipihustiga. Vertikaalses asendis pihustamiseks on pink oma tavaasendis, horisontaalselt pihustamiseks on pink tõstetud rakisele; vastava suuna kirjeldusel on lähtunud pihusti pikitelje asendist. Pihusti kujutab endast tööstuslikku automaatset värvipüstolit (Joonis 4.1-1) suruõhu kontrolliga, mille rõhke haldab kolme väljundiga sama firma suruõhu jaotur (Joonis 4.1-3) manuaalselt muudetavate väljunditega. Jaotussüsteem on kinnitatud CNC pingi külge, õhu sisendvoolik (Joonis 4.1-5) on vabalt pingi kõrval. Pihustipüstol on kinnitatud statiivi klambriga, võimaldades pihustit vähese vaevaga keerata seda masina küljest eemaldamata 360 kraadi ühte telge pidi. Pihustatava vedeliku paak (Joonis 4.1-2), vedeliku voolikud ja pump (Joonis 4.1-6) koos oma lülitkarbiga (Joonis 4.1-7) on kinnitatud pihustile või selle staatilisele kinnistuspulgale. Kuivatusföön (Joonis 4.1-10) on kinnitatud vertikaalseks pihustuseks eraldiseisvale statiiviline ning horisontaalses asendis pihustamisel pihusti kinnistuspulgale. Süsteem on juhitud arvutiga kontrollitava CNC pingi juhtploki (Joonis 4.1-9) poolt läbi CNC pingi mootorite, pihustuse kontrollrõhu vooliku solenoidi (Joonis 4.1-4) ja fööni.



Joonis 4.1. Süsteemi skeem; punased ühendused kujutavad endast tsirkulatsioonivoolikuid, sinised suruõhu voolikuid ja rohelised juhtmeid; 1 - automaatne püstolpihusti, 2 - pihustatava vedeliku paak, 3 - suruõhu jaotur, 4 - pihustuse kontrollrõhu vooliku solenoid, 5 - suruõhu sisendvoolik, 6 - pump, 7 - pumba lülitikarp, 8 - CNC pink, 9 - CNC pingi juhtplokk, 10 - föön

4.1.1. Pihusti

Pihustina kasutati täisautomaatset pihustipüstolit Wagner Pilot GA9010 Marking. Võimalikest pihusti pea ava suurustest vahemikus 0,3 - 1,5 mm, oli soetatud minimaalseim 0,3 mm. Pihustipüstol võimaldab kasutada pihustuse kontrolli rõhuks vahemikus 4 - 6 bar ning pihustusrõhuks vahemikus 0 - 6 bar. [12] (Joonis 4.2)



Joonis 4.2. Automaatne pihustipüstol Wagner Pilot GA9010 Marking. [12]

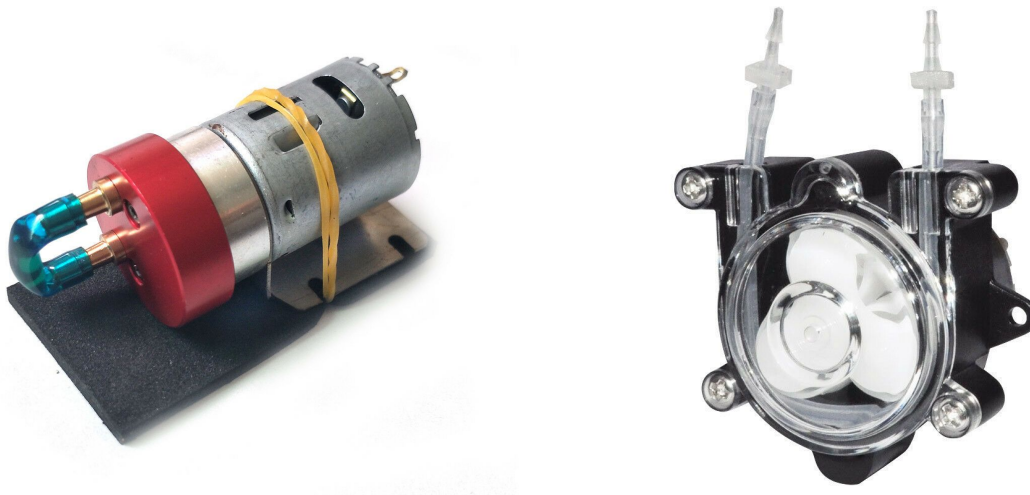
4.1.2. Tsirkulatsioon

Kogu töölahuse pidevaks segamiseks tsirkulatsiooni teel oli vaja luua vooluringlus terve vedeliku süsteemi ulatuses: paagist pihusti kambrisse, sealt pumpa ning pumbast tagasi paaki. Kasutatav pihusti on disainitud võimeliseks ühilduma tsirkulatsioonisüsteemi oma mitme sisendiga pihustuskambrisse erinevatest seintest, kuid selle soetamisel polnud vastava lisavarustuse peale mõeldud. Sellest tulenevalt sai esialgu otsitud vaid pihusti tootmisfirma ja teiste sarnaste tootmispihustite valmislahendusi ja osi, kuid need olid liiga suured nii mahtude kui ka voolukiiruste osas. Seetõttu sai tehtud otsus ise vastav lahendus luua. Siinkohal sai arvestatud pihustatava preparaadi omadustega ehk pump peab olema MP ehk selle keemilise ekvivalendi atsetooni kindel.

Et mootorikütused on keemilistelt omadustelt sarnased atsetoonile, leiti kütusepump olevaks üheks sobivaks lahenduseks. Et enamus sisepõlemismootoritega masinate pumbad on suhteliselt suure voolumahuga, sai leitud minimalistlik lahendus mudelsõidukite täitmispumba näol. (Joonis 4.3a)

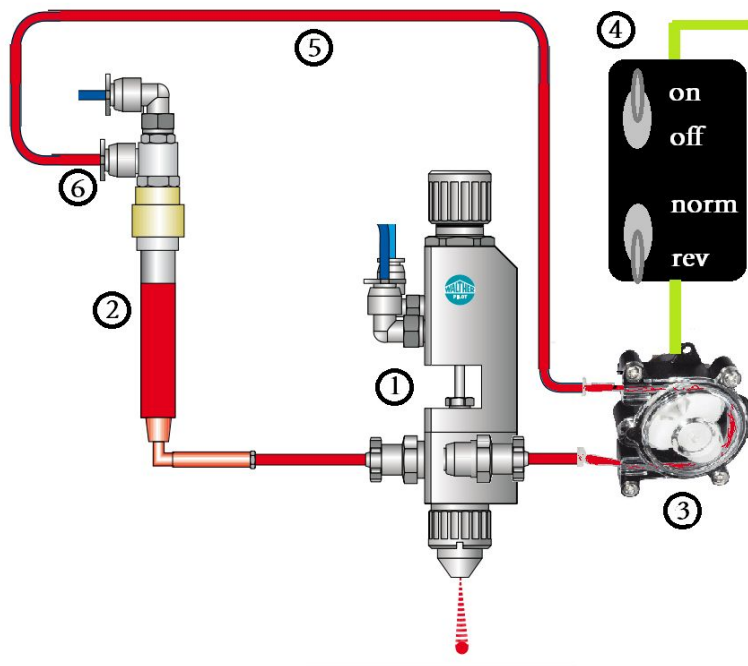
Teiseks pumbaks sai soetatud peristaltiline doseerimispump(joonis 4.3b), mis välistas töölahuse sattumise pumba liikuvatele osadele, piirates selle liikumise vaid keemiliselt stabiilse 2x4 mõõdus latex vooliku ulatusse, mis lisaboonusena on kergesti vahetatav.

Mõlemad pumbad kasutasid 6V alalist toitepinget.



Joonis 4.3. Kasutatud mudellennuki kütusepump (a) [13] ja peristaltiline doseerimispump (b) [14]

Kasutatava pumba (joonis 4.4-3) üks voolik ühendati otse pihusti (joonis 4.4-1) külge atsetooni kindlast plastikust voolikuühendusega ning teine üle plastikust voolikuühenduse teflonvooliku külge (joonis 4.4-5). Teflonvooliku teine pool ühendus paagi otsa kinnitatud toru jagurile kinnitatud vooliku kiirliitmikku (joonis 4.4-6). Vastavast kiirliitmiku kaudu toimus süstlaga paaki suspensiooni ja pesulahuse lisamine. Teflonvoolikut kasutati kiirliitmikust lahti ühendatuna pumba abil süsteemi tühjaks pumpamiseks.

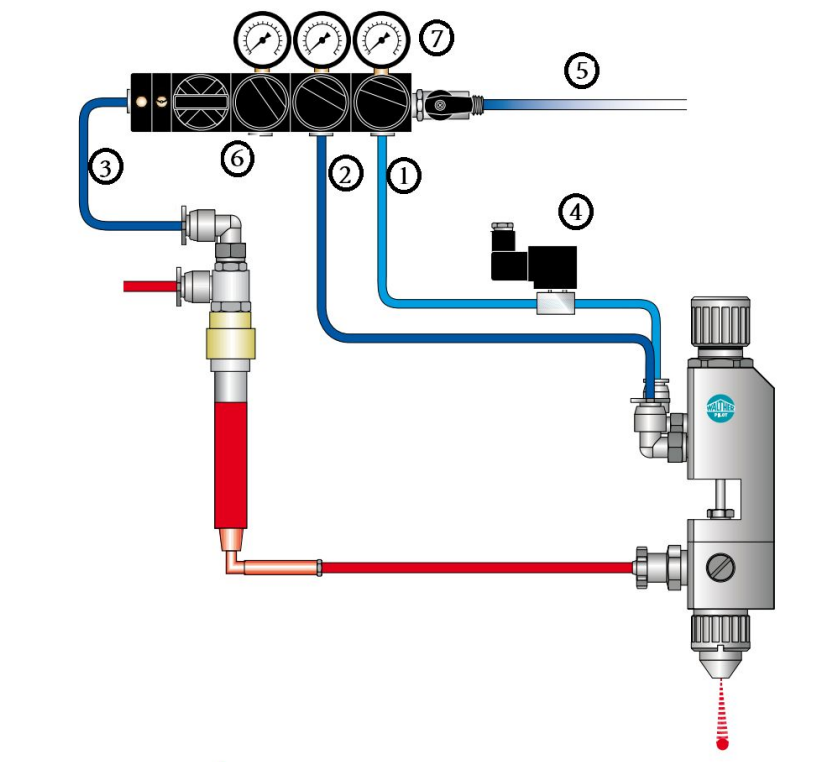


Joonis 4.4. Pihusti tsirkulatsioonisüsteem; 1 - pihusti, 2 - pihustatava materjali paak, 3 - pump, 4 - pumba lülitikarp, 5 - teflonist voolik, 6 - kiirliitmik

Pumba töö kontrollimiseks kasutati lülitikarpi (joonis 4.4-4) pumba toite lülitamiseks. Selle poolt pakutud võimalused olid vastavalt sisse- ja väljalülitus ning pumba pumpamise suund. Tasandamaks pumba käivitumise voolutarbe hüpet, oli enne lülitikarpi ühendatud kahe sissetuleva toitejuhtme vahele 1 mF kondensaator.

4.1.3. Suruõhk

Pihusti oli kontrollitud kolme manuaalselt seadistatava suruõhukanaliga: kanal, mis avab pihusti pihustamisõhu kanali ja nõela (joonis 4.5-1) ning on kontrollitud pingega avatava solenoidiga (joonis 4.5-4); kanal pihustamisõhu juhtimiseks (joonis 4.5-2); ning kanal paagis rõhu tekitamiseks (joonis 4.5-3), mis antud katse tsirkuleeritud süsteemis väldib negatiivse rõhu tekkimist süsteemis pihustamisest tekitatud materjali kao toimetel. Vastavad rõhud on reguleeritavad kraanidega (joonis 4.5-6) ja nähtavad kraanide kõrval asuvate analoogbaromeetritega (joonis 4.5-7). Nende asukohast tulenevalt ei ole turvaline neid masina töö käigus reguleerida.



Joonis 4.5. Pihusti suruõhu süsteem [8]. 1 - pihustuse kontrolli rõhk, 2 - pihustusrõhk, 3 - paagi rõhk, 4 - pihustuse kontrollrõhu solenoid, 5 - sissetulev suruõhk, 6 - rõhu reguleerimise kraanid, 7 - analoogbaromeetrid rõhu kanalitele

4.1.4. Kuivatamine pärast pihustamist

Peale materjali kihti substraadile pihustamist vajab materjal täielikku kuivatamist. Selleks kasutati madalal soojendusastmel töötavat fööni, mida kontrolliti voolu lülitamisega läbi CNC pingi juhtploki.

4.2. Pihustamine

Pihustamise protsessi viib läbi CNC pink, kontrollides pihusti avanemist ja liikumise trajektoori. Pihustatava materjali hulk ja pihustuslehter tuleb seadistada enne seda manuaalselt rõhkude ja nõela avanemise piiri korrigeerimisega arvestades pihustatava materjali omadusi.

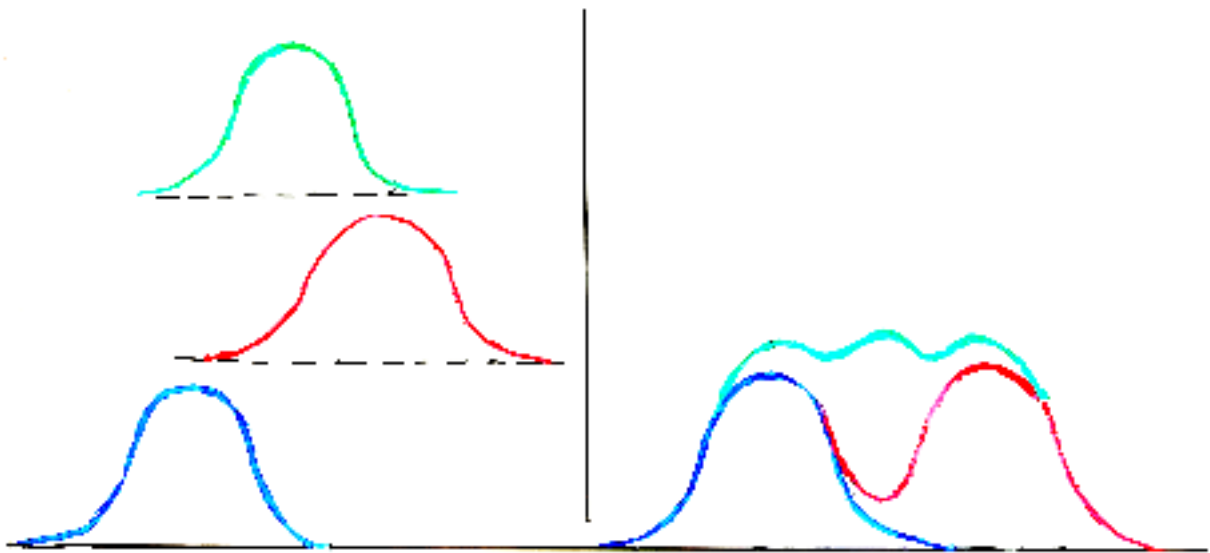
4.2.1. Digitaalne kontroll

Modifitseeritud 3D CNC pink on kontrollitud juhtploki poolt (seal hulgas ka kontrollõhu kanali solenoid ning kuivatusfööni vool), mis saab oma käsklused üle jadaühenduse arvutist. Arvutis kasutatud Mach 3 Mill tarkvara juhtploki juhtimiseks ning interaktiivse kasutajaliidesena. Vastava tarkvaral toimub CNC pingi seadistamine ning kasutaja eelnevalt kirjutatud programmi läbiviimine. Programm sai kirjutatud manuaalselt G koodis järgides Mach 3 programmi juhendit ning sai sisestatud .txt formaadis failina.

4.2.2. Pihustusmuster

Et tagada tekkinud lõppprodukti kvaliteet, on vajalik materjal pihustada substraadile kihtide kaupa, mille juures enne iga järgmise kihi peale kandmisel eelnevad kuivatatakse [2]. A. Punningu suulisel kirjeldusel põhinevalt on esimese pihustiga võimalik saavutada visuaalselt suhteliselt ühtlane katvus distantsilt piisava survega pihustades ka ühest punktist lähtudes, kuid

vastav meetodika puhul täheldati suur materjali kadu ümbritsevasse keskkonda. Põhinedes pihusti tehnilistel parameetritel ja tootja infomaterjalidel arvati olevat võimalik saavutada peenem pihustamisjuga ning vähendades distantsi pihustatavale pinnale luua mustri- liikumise- ja pihustamisjoaga ühtlase katvusega ala, kuhu jõuaks võimalikult suur osa pihustatavast materjalist. Arvestades kasutatavast pihustist pihustatud materjali joa koonus- jaotust, võib eeldada pihusti ühtlasel liikumisel pihustamisel tekkiva pihustatud materjali raja läbilõike- jaotusele vastavat jaotust. Vastava ebäühtluse tasandamiseks lõpp- toote vaates leiti ühe meetodina pihustamise radade nihutamist kihi kaupa, tagades ühes ala punktis erinevate kihtidelt erinev raja läbilõike- jaotuse osa, teise meetodina rakendada osalist ülekatvust juba sama kihi radade ulatuses (joonis 4.6).



Joonis 4.6. Üldise ühtluse suurendamine radade osalise ülekatvusega

Eelnevale tuginedes otsustati kasutada pihustustustreid, mis kujutavad endast pihusti ühtlast liikumist pidevalt pihustades radadel, mis asuvad üksteisest teatava vahemaa kaugusel. Esmalt katsetati paralleelseid jooni, mille puhul ühelt joonelt teisele liikumisel katkestati pihustamine ja

jätkati sellega uuel joonel (joonis 4.7a). Et vähendada pihusti pea liikumisele kuluvat aega, pandi pihusti liikuma paralleelseid radasid pidi nõ edasi tagasi.

Kuigi rasterdamine võimaldab teorias luua erinevaid mustreid vastava lähtumisega, jäädi katsetamisel võrdsete joonte juurde, mis tagas ristküliku mustri.

Vastavalt soovitud arengusuunale kasutada pihustamissubstraadina ringikujulisi teflonaluseid, sai uue mustrina kasutusele võetud spiraal. Täpsemini küll pseudospiiraal (joonis 4.7b), tulenevalt Mach3 G koodi interpreteerimispiirangutest, mis kujutab endast järjest joonistuvaid poolringe, millest iga järgmise diameeter on soovitud raja vahe võrra kas suurem või väiksem lähtuvalt alguspunkti asukohast kas siis keskelt või ala servalt. Nii tekkinud muster tagab samuti raja, mis on igast teisest rajast minimaalsel kaugusel soovitud teatava vahemaa võrra. Samuti on pihusti ühtlaselt avatud kogu oma liikumise aja ühe kihi kohta, tagades pihusti avamisest tekkiva võimaliku materjali voolamise kõikumise vaid ühekordselt mustri algusesse.

Kõigi kasutatud mustrite puhul on pihustamise ajal pihusti liikumine konstantse kiirusega ning CNC pingi seadistustes on vähendatud prioriteeti rahulikule pidurdamisele ning suurendatud prioriteeti kiiruse ühtlasena hoidmiseks.



Joonis 4.7. Pihustumuster sirgete paralleelsete radadega(a) ja pseudospiiraaliga(b);

RV - rajavahe

4.2.3. Pihustatav materjal

Süsteemi töökindluse ja üldiste tööparameetrite piirkonna leidmiseks sai kasutatud demineraliseeritud vett (milliRho). Tagamaks, et süsteem kannataks töölahust (MP-I põhinev süsiniksuspensioon), kasutati sarnaste keemiliste omadustega atsetooni . Et leida täpsemalt sobivaid pihustamise parameetreid, võeti kasutusele (varasemate katsetuste tarvis valmistatud) želatiini lahus vees äädikhappe lisandiga võimaldamaks saavutada indikaator metüülpunasega intensiivne värvus. Et aga leitud tulemused pihustamise parameetrite koha pealt oluliselt ei erinenud varasematest katsetest demineraliseeritud veest ja atsetoonist, tehti otsus katvuse hindamiseks värvida demineraliseeritud vesi paari tilga tindiga.

Töölahus on MP baasil süsiniksuspensioon. Vastav vajab kontsentratsioonivahemiku leidmist, mille juures on lahus piisavalt madal, et minimaliseerida kolloidosise sadenemiskadu, kuid piisavalt kõrge, et saavutatav ühe pihustuse tulemus oleks veel praktiline.

4.2.4. Substraat

Kõik katsetused sobivate parameetrite leidmiseks on läbi viidud A4 koopiapaberiga, mis oma märguvusomadustega võimaldab liigse vedeliku sidumist ning pakub valget fooni katsetulemuste hindamiseks.

Katsete käigus rahuldavate tulemuste saavutamine võimaldab leitud tööparameetreid kasutades potentsiaalselt luua tesktiilalusele tehtud mebraanil või teflonmembraanil põhineva produkti, mida saaks testida täituri vaatenurgast vaadates.

4.3. Süsteemi karakteriseerimine

4.3.1. Katsete ülesehitus

Saamaks ülevaadet ehitatud süsteemi võimekusest viidi läbi katsete seeriad.

Rõhujaoturi rõhud ning pihusti nõela avatavuseks valiti optimaalseks leitud parameetrid. Pihustatva töölahusena kasutati süsiksuspensiooni, kasutades optimaalsete parameetrite katsetustes leitud lahjendusastet.

Protseduur:

1. Töölahus oli enne igat katsetust segatud vähemalt 30 min ultrahelisondiga
2. Enne seeriade alustamist ja iga seeria vahel tühjendati süsteem töölahuse jääkidest
3. Lisati 20 ml puhast atsetooni pesulahusena paaki süstlaga
4. süsteem suleti, avati suruõhu kraan ja käivitati tsirkulatsioon
5. tsirkulatsioonil lasti segamatult toimuda vähemalt 5 minutit
6. Seejärel pumbati pesulahuse jäägid süsteemist, eemaldati pihusti pea
7. Pihusti peal lasti seista vähemalt 2 minutit puhtas atsetoonis
8. Pihusti pea pesti katseklaasipesuharjaga ning süstlaga läbivoolu tekitamisega ja ühendati taas pihustiga
9. Fikseeriti õige väärtuse juurde pihusti nõela avanemist reguleeriv pöördnupp
10. Iga seeria jaoks lisati paaki 15 ml töölahust süstlaga; peale lisamist käivitati koheselt tsirkulatsioon ning avati õhu rõhud süsteemi
11. Pihustamisplatvormile asetati substraat
12. Arvutist käivitati pihustusprogramm
13. Programmi lõppedes tõsteti katse substraat pihustusplatvormilt ning jäeti tõmbekappi hingama
14. Edasi kordus alates punktist 10 kuni pihustuse katkemiseni

Katse substraadiks kasutati valget koopiapaberit tänu suhteliselt ühtlasele tekstuurile ning konstantsele valgele toonile. Ülesseadmise katsetustele tuginevalt võeti muustrina kasutusele pseudospiraal, et saada ühe katse jooksul pikk jooksev pihustus rajavahega 20 mm, mis oli eeldatavasti piisav paralleelsete raja lõikude ülekatvuse minimaliseerimiseks (käsklusfail 1006.txt, lisa 1). Seeria pikkust otseselt ei fikseeritud: katseid viidi läbi kuni pihustust enam ei toimunud, kas siis süsteemi ummistumise toimele või töölahuse otsa saamisel süsteemist. Süsteemi ülesseadmise katsetuste käigus tekkinud kahtlusest pihusti töötamisest erinevalt vastavalt vertikaalses või horisontaalses asendis tulemusel otsustati teha võrdne arv seeriaid mõlemas asendis.

Katsete tingimused hoiti kõigil seeriatel samad.

4.3.2. Katsetulemuste analüüs

Pihusti töö karakteriseerimise katsete seeriade tulemusi analüüsiti digitaalselt. Selleks kasutati National Instruments' tarkvaral LabVIEW 2012 (Service Pack 1) selle uurimistöö jaoks loodud programmide kogumit.

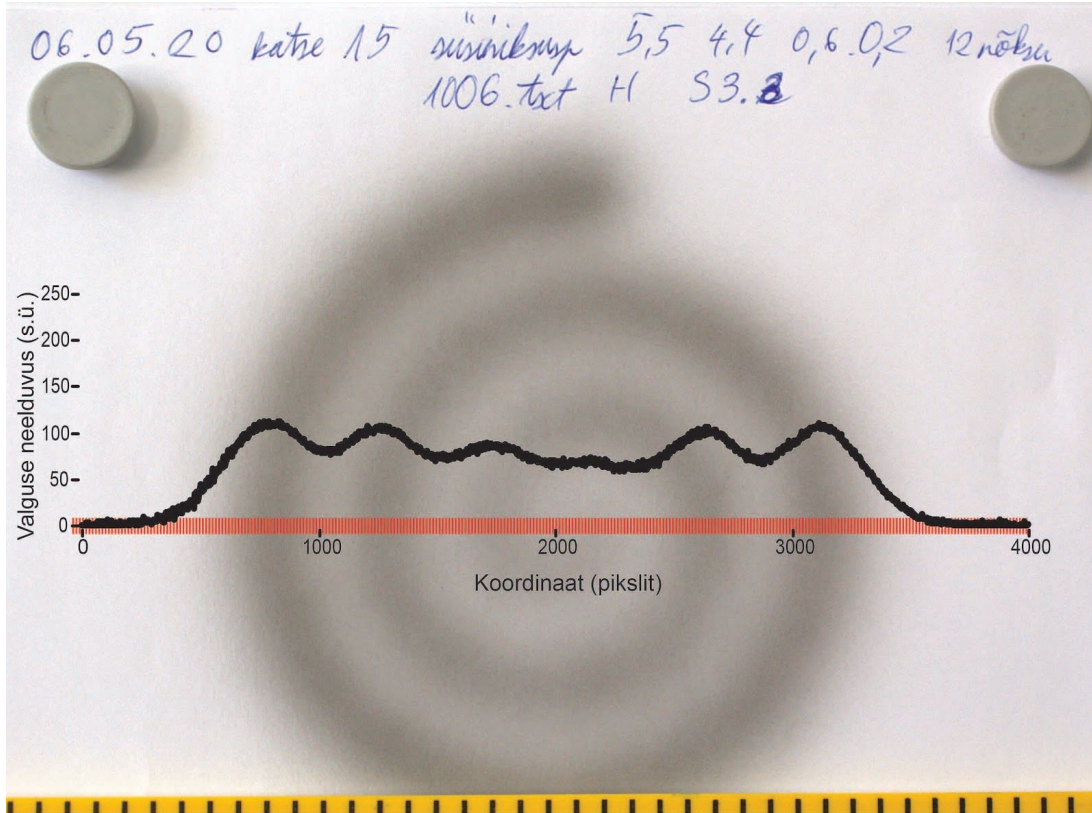
4.3.2.1. Analüüsitava graafiku saavutamine

Seeriade katsetulemused pildistati üles ühtlase naturaalse valguse tingimustes. Vastavalt fotode alaservas oleva 5 mm täpsusega võrdluskalaalale tuvastati fotode pikslitiheduseks 240 ± 4 pikslit/cm, 57600 ± 20 pikslit/cm². Saadud fotofailid teisendati hallskaalale RGB-st konstantidega 0,333, lihtsustamaks valge paberi ning sügavmusta kolloidsüsiniku eristamist. Fotodel valiti analüüsiks manuaalselt ristküliku suurune ala mõõtmetega 4000*50 pikslit horisontaalse asetusega, keskmega spiraali keskmes (joonis 4.8). Vastava ala laius sai valitud, arvestades kasutatava pihustumustri laiust selle keskjoonel, millele lisati mõlemale poole rajavahe võrra servaala ning vähemalt 200 pikslit tausta fooni tuvastuseks ja tulemus ümardati ühe tüvenumbri täpsuseni:

$(5 + 2) * 20\text{mm} * 24 \text{ pikslilaiust/mm} + 2 * 200 \text{ pikslilaiust} = 3760 \text{ pikslilaiust} \approx$
 $\approx 4000 \text{ pikslilaiust};$

Fotode kogu laiuse kasutamise polnud üldjuhul praktiline, kuna fotode servadele jäid katsetulemuse aluspaberi servavarjud (joonis 4.8), mis oleks seganud fooni arvutusi. Vaadeldava ala kõrguseks võeti suurim arv, mille puhul ulatuses pihustatavad rajad lähenesid kujult veel sirgetele. Eraldatud ristküliku alast eraldati massiivina pikslite heledusväärtused (0 - 255). Järgnevalt massiiv teisendati jadaks laiuse suunal, aritmeetiliselt keskmistades kõrguse suuna väärtused ning ümardades tulemuse täisarvudesse. Et huvipakkuv osa katsetulemusest ei ole mitte heledus, vaid valgust neelav kolloidsüsiniku kate, pöörati ala heledust kirjeldav jada vastupidiseks, lahutades kõik jada väärtused 255-st.

Eraldamaks fooni, loodi sellele lineaarne lähendus, kasutades kahte punkti, mis saadi jada esimese ja viimase 100 elemendi väärtuste ja indeksite aritmeetilise keskmistamise tulemusel. Fooni lähenduse väärtustega täidetud jada lahutamise ja seni saavutatud jada väärtustest ning saadud tulemuste läbi jagamisel foonist jääva jäägi suhtosaga saavutati pihustatud kolloidsüsiniku hulga suhteline väärtus katsetulemuse keskmistatud läbilõikel keskjoonel neelduvuse baasil (joonis 4.8).



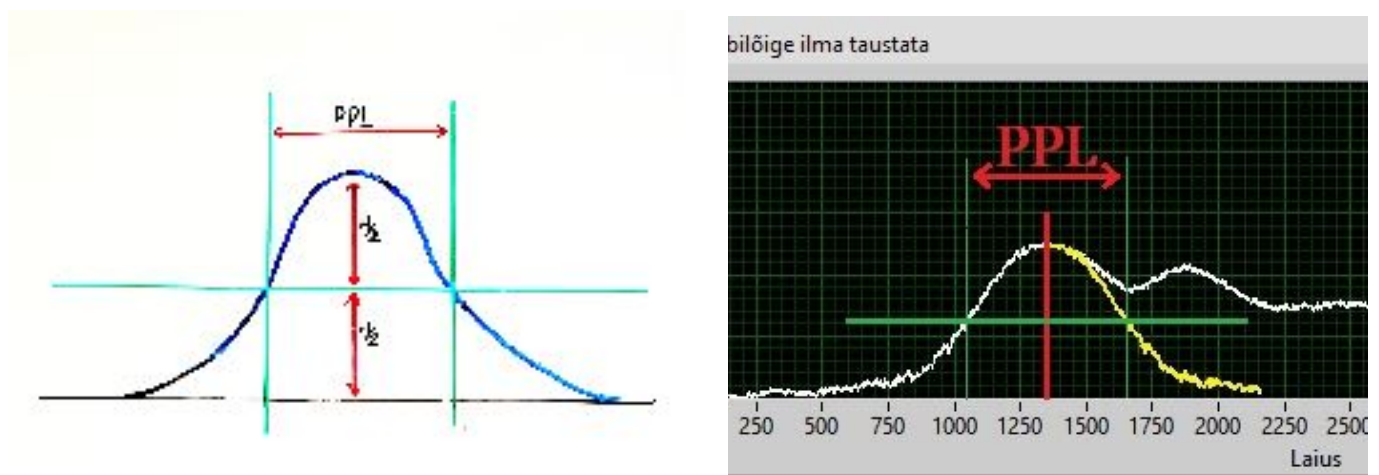
Joonis 4.8. Katsetulemus ja selle keskjoonelt saadud horisontaalne keskmistatud läbilõige (punane ristikülik kujutab läbilõike saamiseks kasutatud foto ala).

4.3.2.2. Poolpaksuslaid

Pihustuse ühtluse ühe hinnava parameetrina kasutati poolpaksuslaidust. Poolpaksuslaidus (ingl. *Full Width at Half Maximum*, FWHM) on parameeter, mida kasutatakse tavaliselt kõvera või funktsiooni muhu laiuse kirjeldamiseks. Selle annab vahemaa kõvera punktide vahel, kus kõvera graafik või funktsioon jõuab pooleni maksimaalsest väärtusest. (joonis 4.9a) [13]

Eeldades, et pihustus püsib ühtlane, peaks pihustatava materjali hulga muutumisel muutuma kõvera eri lõikude kõrgus suhteliselt samal määral. Selle tõttu peaks pärast muutust jääma graafiku kahe punkti kõrguste suhe samaks. Samuti kehtib see haripunkti ja varasema poole haripunkti kõrguse punkti kohta. Seega viimased jäävad samasse punkti ning poolkõrguslaiduse väärtus ei muutu võrreldes varasemaga.

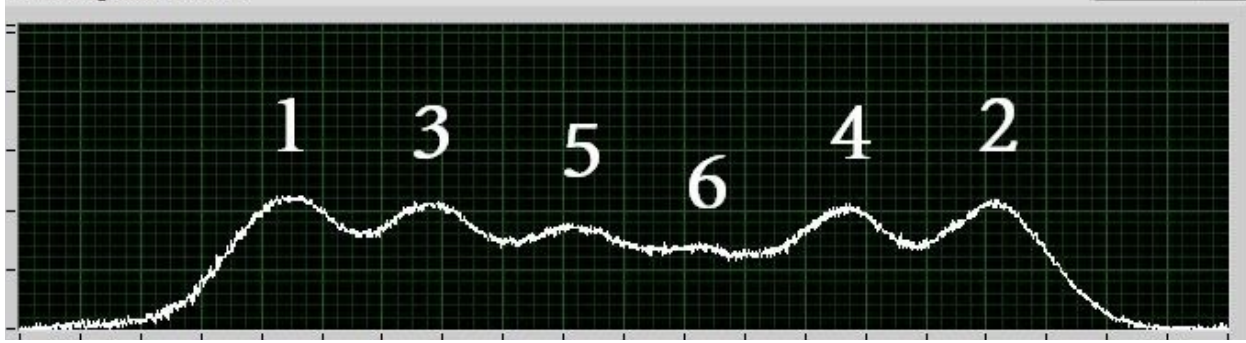
Katsete koostamisel arvestati rajavahega, mille puhul kõrvalraja ülekate raja haripunktis on praktiliselt mitteamestav. Sama ei saa see-eest öelda teise rajaga külgneva kõvera nõlva kohta. Seetõttu on poolkõrguslaiuse otseselt leitav vaid servmistelt radadelt, kus välisnõlvalt võib raja sümmeetrilisuse eeldusel peegeldada teisele poole haripunkti. Nii on saavutatav kaks poole maksimumi kõrguse punkti ning leitav poolkõrguslaius (joonis 4.9b). Katsete ja seeriade vahelise ühtluse võrdlemiseks võeti poolkõrguslaiused katsetulemustel vasakpoolsest serva rajalt eelmainitud loogika baasil. Saadud tulemused jagati läbi leitud piksli laiuse tihedusega (24 pikslilaiust/mm) standardseteks ühikuteks teisendamisel.



Joonis 4.9. Poolpaksuslaius (a) ja selle leidmine katsetulemuse graafikult (b); PPL - poolpaksuslaius, H - haripunkti kõrgus.

4.3.2.3. Haripunktide kõrgus

Pihustuse ühtluse hindamiseks ühe katse ulatuses mõõdeti korraga ühel katsel raja haripunktide kõrgused. Vastavad tulemused järjestati vastavalt pihustamise järjekorrale pihusti liikumisel spiraalis (joonised 4.6b, 4.8). Nii hinnati igast seeriast üks katse, mille puhul toimus pihustamine visuaalselt terve katse ulatuses.



Joonis 4.10. Raja haripunktide kõrguse hindamise järjekord.

4.3.2.4. Mõõtmiste eesmärk

Haripunkti kõrgus pihustusrajal annab suhtelise pihustatud materjali hulga, mida saab hinnata katsete lõikes.

Pihustusraja poolpaksuslause leidmine ja selle võrdlus haripunkti kõrgusega võimaldab hinnata pihustatu hajuvuse konstantsust sarnaste haripunkti kõrguste ja seega ka hulkade juures. Samuti annab see võimaluse hinnata potentsiaalse korrelatsiooni eksisteerimist pihustatava hulga ja hajumise vahel.

Ühe katse ulatuses haripunktide mõõtmine, saadud tulemuste järjestamise pihustamise momendi järgi ning eri katsete vahel võrdlemine võimaldab vaadelda pihustatava materjali hulga muutuse konstantsust ühe järjestikuse pihustuse jooksul.

5. Tulemused ja arutelu

5.1. Tsirkulatsioon

Kasutades süsteemis oleva vedelikuna destilleeritud vett, toimis tsirkulatsioonisüsteem mõlema pumba puhul probleemideta. Samuti ei omanud mõju paagi rõhu lisamine ning pihustamine ning ka tsirkulatsioon ei paistnud mõjutavat pihusti intensiivsust.

Atsetooni kasutusega kütuse lisamise pump töötas esimese katsetuse käigus probleemideta, kuid peale pausi järgmisel katsetuskorral selgus pumba plastikkomponentide paisumisest atsetooni toimel tekkinud takistus pumba mehhanismi töös. Selle tagajärjel muutus vastav pump töökõlbmatuks. Samas peristaltilise pumba töö oli ka atsetooni puhul probleemideta.

Süsiniksuspensiooni süsteemi lisamisel süsteemi peristaltilise pumba võimekus ei langenud. Katsetuste käigus voolikute ja paagi seintel arvestatavat süsiniku sadenemist ei märgatud ning süsteemi kohene pesu atsetooniga elimineeris sellegi. Ainus koht, kus oli sadenemist märgata, oli pihusti pea.

Peale arvestatavat hulka katsetusi atsetooni ja süsiniksuspensiooniga peristaltiline pump takerdus. Põhjuseks leiti pumba kambrisse imbunud atsetooni poolt geeljaks massiks sulatatud kambri seina materjali poolt pumba rullikute vahele voolamine. Rullik vajab välja löikamist ja kambrit läbiv silikoonvoolik vajab kahjustumise tõttu vahetust, kuid pumba töö taastati. Samal põhjusel seiskus pump ka mõni aeg hiljem ning lahendus oli identne. Mõlemal korral vajab pumba kambri sein silumist ja lisatava materjaliga täitmist ning pumba voolutugevus vähenes.

5.2. Optimaalsete parameetrite leidmine

Andres Punningu esialgsete katsete käigus selgusid piirangud:

- püstoli pihustuskontrolli rõhuks sobib suvaline rõhk nii kaua kui see on natuke üle 4,0 bar;
- pihustusrõhuks on 1,0 bar palju kui soovida hinnata pihustatu paksust;
- paagi rõhk on meie tingimustel suhteliselt ebaoluline, kuid natuke tasub seda siiski peale lasta vedeliku normaalselt paagist voolamiseks;
- pihusti nõela piiraja nupp panna 12 nõksu - vastaval nupul puudub skaala ning ainukesed kaks vaadeldavat parameetrit on nõela kinni muljumise moment ning keeramisel tuntav nupu nõksatuste kaupa liikumine - peale, kuna see on madalaim tase, kus nõel kindlalt korralikult avaneb.

Pihustuse kontrollrõhu puhul võeti selle jaoks kasutavaks väärtuseks miinimumist 10 % suurem 4,4 bar.

Katsetuste käigus selgus, et destilleeritud vee puhul läheb koopia paberi neelamisvõime ülemine piir 0,3 - 0,4 bar pihustusrõhu juurest. Samas atsetoonile ja MP-le see tunda ei anna, set õhutatud tingimuste korral need aurustuvad praktiliselt koheselt paberi pinnalt. Süsiniksuspensiooniga kippus madalatel rõhkudel pihusti pea kiiresti ummistuma. Aksepteeritav pihustusrõhk leiti 0,6 bar juures.

Paagi rõhku kontrolliva manomeetri skaala esimene mõõdetava väärtuse järgi valiti paagi rõhuks 0,2 bar.

Pihusti nõela piiraja nupu reguleerimisel prooviti varasema 12 nõksu ümbrust, kuid leiti olemas olev väärtus töötavat. Samas oli tänu ebamääraselt tunnetatava alumisele punktile tõenäoliselt arvestatav kõikumine.

Tagamaks süsteemi ühtlase tulemuse fikseeriti sissetulev suruõhk kõigist teistest väärtustest mõne võrra suurema 5,5 bar peale.

Nii saadi optimaalseteks pihustutingimusteks:

- väljast sisse tulev rõhk 5,5 bar
- Pihustuse kontrollrõhk 4,4 bar
- pihustusrõhk 0,6 bar
- paagi rõhk 0,2 bar
- pihusti nõela avatavus 12 nõksu

5.3. Katseseeriade analüüs

Katseseeriad lõppesid eranditult pihusti pea ummistusega. Seda toetas nii tsirkulatsiooni jätkumine läbi pumba (vaadeldav tumeda töölahuse liikumisel osaliselt läbipaistvates tsirkulatsioonivoolikutest) ja süsteemis välja pumbatud töölahuse jäägi hulga visuaalsel analüüsil ning süsteemi sisestatud pesulahuse samadel tingimustel pihustamise katsetusega.

Vaadeldes saadud graafikuid keskmistatud läbilõigetest selgub, et valitud rajavahe ei olnud piisav arvestatava ülekatvusala saamiseks - kahe harja vahelise "oru" põhi on üle poole harjade enese kõrgusest (joonis 4.8).

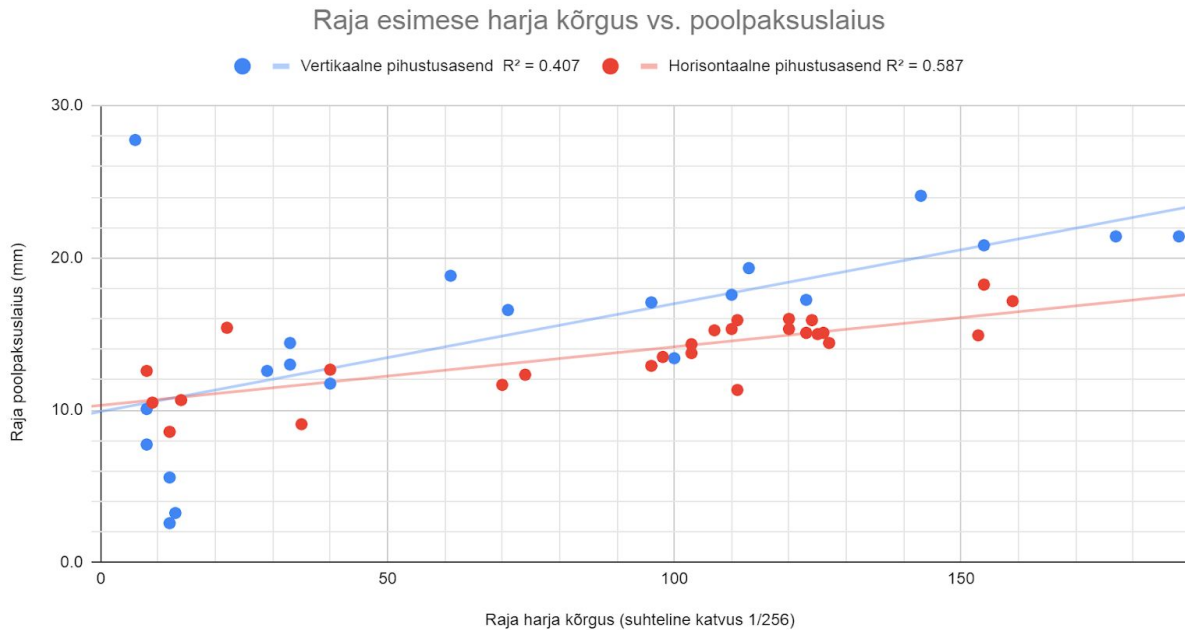
5.3.2. Pihustuskoguse hulga püsivus

Katsetulemustelt mõõdetud esimese raja harja kõrgused jagunesid horisontaalse pihustusasendi korral suhteliselt laiali. Samas vertikaalse asendi juures leidis küll ka hajumist, kuid ligi pooled tulemustest koondusid vahemikku 90 - 130. (Joonis 5.1.)

5.3.2. Poolpaksuslaid

Lähtudes seeriade katsetulemustelt mõõdetud esimese raja poolpaksuslaidustest, sai tõdeda, et vertikaalse kui ka horisontaalsel pihustamisel kipub raja harja kõrguse suurenemisel

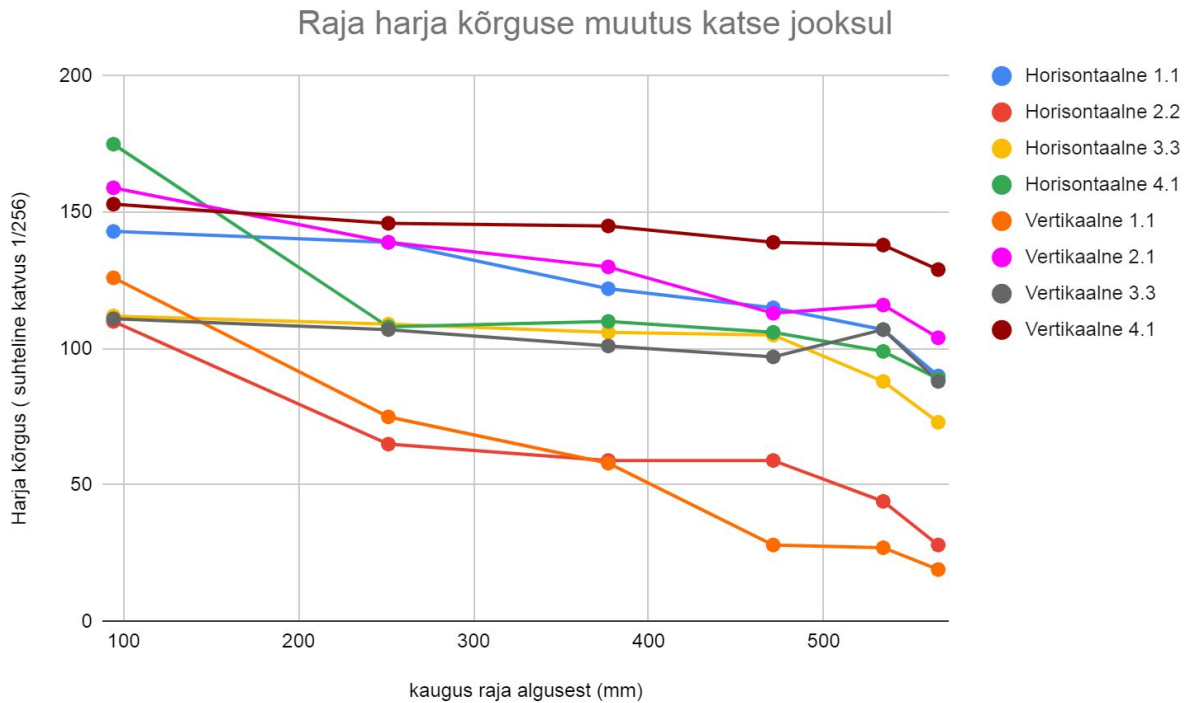
poolpaksuslaidus suureneva ning seda mõnevõrra rohkem horisontaalse pihustusasendi korral (Joonis 5.1).



Joonis 5.1. Kõigi katsetulemuste pihustusraja esimese harja kõrguse seos poolpaksuslaidusega.

5.3.3. Ühe katse ulatuses raja harja kõrguse muutus

Kuna pseudospiraalis pihustades sisse poole liikudes läbib pihusti iga kaarega järjest lühema tee ja selleks kuluva aja, siis mõõtetulemustest saadud graafikult raja lõikudest adekvaatsema ülevaate saamiseks on kasulik välja arvutada iga raja läbilõike asukoht raja alguse suhtes teades pseudospiraali loomise loogikat (joonis 5.2). Kõigi vaadeldud katsete puhul on näha langev tendents ning kolmel juhul esineb järsem kukkumine peale algust. Ka tundub toimuvat üldiselt tugevam langus pihustuse lõpu osas, kuid see võib olla mõjutatud vaadeldava ala sattumisest pihustusraja lõpu servale.



Joonis 5.2. Raja harja kõrguse muutus katse jooksul keskmistatud läbilõike haripunktide baasil.

5.4. Arutelu

5.4.1. Süsteemi piirangud

Süsteem vee ja atsetooni kindel, arvestatava visuaalse kvaliteediga pihustamine võimalik. Kuigi tulemused puhaste vedelikega on paljulubavad, on katsete korratavus madal. Nimelt on soovitud tulemusi pakkuva pihustatava rõhk suhteliselt madal, 0,4 - 0,6 bar skaalal 0,1 - 6,0 bar ning positiivse tulemuse saavutamiseks vajalik vahemik muutub suhteliselt palju väliste mõjurite tulemusel (näiteks puhastamisel uuesti kokku panemine). Ka kipub kohati nii madal rõhk langema avanemisel 0,1 ümbruses, mis lisab ebatäpsust mõõtmistulemusse. Vastavat viga on võimalik minimaliseerida sättides pihustusrõhk paika pihustamise ajal, mida saab aktiveerida ohutult ja mugavalt manuaalselt käsureale vastava koodi sisestamisega.

5.4.2. Erinevate lahustega pihustamine

Destilleeritud vee baasil tehtud lahustega saavutati empiirilisel ühtlased tulemused. Kuid arvestatava vee hulga tõttu paber märgus ning selle tagajärjel tekkinud pundumine deformeeris varasemalt siledat paberit, mis muutis tulemuste eksaktse analüüsi raskendatuks. Et elimineerida vee negatiivne mõju, asendati lahuse alus atsetooniga ja roheline tindiga loodi piimjas kolloidlahus. Vastava lahusega saavutati sarnased tulemused, kuid ilma paberi kahjuta. Samas tõdeti kolloidlahuses aja jooksul tindi värvaine välja kristalliseerumist ja sadenemist, mis tsirkulatsioonist hoolimata hakkas ummistama pihusti pead.

A. Punningu poolt kasutatud zelaatiinilahus oli küll suletud tingimustel ja lühiajaliselt ka pihustatult visuaalselt hästi eristatav, kaob vastav efekt tänu äädikhappe kiirele aurustumisele ning edasine pihustamise katvuse hindamine värvuse baasil on raskendatud (vajaks happega põhjalikku niisutamist, mis võib kahjustada esialgset tulemust ning lisab raskusastme), mille tõttu selle jätkuv kasutus ei õigustanud ennast.

MP baasil süsiniksuspensiooniga ei saavutatud ühtlast tihedat pihustamist terves ulatuses, vaid ainult lühikesi löike (pikkusega kuni ~ 5 cm)). Tehtud katsetuste käigus ebakonstantse aja jooksul pihusti pea ummistus sademe/tiheda geeliga ning vajas puhastamist. Suurem lahjendus lubas saavutada suhteliselt ühtlase pihustusraja ühe pihustuskäigu ulatuses, kuid pihustatu intensiivsus langes jätkuvalt ajas. Siiski see võimaldas läbi viia katseseeriad pihusti hindamiseks sellele tekitatud tingimustes.

5.4.3. Tsirkulatsioonsegamise hinnang

Varasemalt on kasutatud ioonsete mahtuvuslike laminaatide elektrodimaterjali süsiniksuspensiooni pihustamiseks kasutatud käsitsi kontrollitud aerograafi, mille pihustatav materjal hoiustati aerograafi külge kinnitatud suhteliselt väikese mahutavusega mahutis. Pihustamise protseduuri käigus lisatakse mahutisse väike kogus eelnevalt magnetsegajal ja

ultrahelisondiga segatud pihustatavat suspensiooni [2]. Vastava materjaliga viiakse läbi üks/mitu pihustamist, millele järgnevalt/mille vahel, pihusti puhastati atsetooniga. Nii on tagatud pihustatava materjali paagis viibimiseks ja potentsiaalseks sadenemiseks minimaalne aeg. Samas tekitab pihustamise protsess paagis materjali liikumise, võttes seejuures mahuti põhjast materjali võtmisega ära alumistest kihtidest settima hakkava suspensiooni osa, pikendades kasutatavat aega. Ka oletatakse inimkäe mootorsetel ebatäpsustel ja naturaalsel vibreerimisel olevat materjali paagis loksutamise segav funktsioon. Luues sarnasusi eeltoodule, siis tsirkulatsioonisüsteem simuleerib töötades pihusti pidevat pihustamist, tõmmates paagist pihustuskambrisse ning eemaldab sealt jälle materjali tagasi paaki. Et aga pihustuskambrist toimuv väljavool ei ole selle kõige alumisemast punktist ning pihusti pea on kujult kitsas õõnsus üldisest materjali voolurajast kõrval, on täheldatud sinna materjali sadenemist tsirkuleerimisest hoolimata, avaldades tsirkuleeritud süsteemi peale pausi katse alustamisel katsetulemuse alguses lühiajalise intensiivsema süsiniku hulga lõiguse. Samuti võib see olla üks tegur pihustuseeriade käigus kogetud pihustatava aine hulga jooksvas vähenemises.

Lisaks kasutatavale tsirkulatsioonile sai materjali segamiseks sekundaarsete või paralleelsete variantidena mõeldud paagi ja voolikute ultrasonilist segamist läbi seinu ning paagis oleva töölahuse segamist mehaaniliselt või suruõhuga. Ultrasoniline segamine oleks kindlasti intensiivsem meetod kui tsirkulatsioon. Kuna selle rakendamine pihustipüstolile võib tekitada täpsete mehaaniliste liikuvate elementide kulumist ja kahjustamist, siis ultrasonilise segamise puhul peaks vältima paagi jäika kinnitamist pihustile, mis on hetkel rakendatav praktika. Et kõik need keskenduvad paagile ning sellele kinnituvatele voolikutele, milles osas on seni olnud tsirkulatsioon piisav lahendus, pole nende rakendamiseks olemasolevasse süsteemi samme astunud.

5.4.4. Kasutatava automaatse pihustuspüstoli hinnang

Katsetulemuste analüüsist selgub, et nii seeria jooksul kui ka ühe katse sees toimub pihustatava ainehulga vähenemine. Siinkohal pidev tsirkulatsioon peaks välistama pihustatava materjali kihistumise erineva kontsentratsiooniga kihtideks ning paaki lisatav rõhk peaks vähendama paagi vedelikusamba langusest tekkivat voolutugevuse erinevust. Seega tuleneb see tõenäoliselt pihusti pea jooksvast ummistumisest, mis oli ka kõigi seeriade katkestajaks. Selle leevendamise võimalusteks oleks: süsiniksuspensiooni lahjenduse suurendamine vähendamaks sadenemiseks vaba materjali hulka, nõela suurem avamine võimaldamaks pihustusmaterjali paremat voolu ning pihustrõhu tõstmine suurendamiseks pihusti peas voolu kiirust. Neist esimene vähendaks tehtava pihustuse intensiivsust ning kaks teist suurendaks seda. Sellest tulenevalt võib olla võimalik leida kombinatsioon nende kolme meetme rakendamisest, mis tagaks sadenemise vähenemise pihusti peas, kuid suureneks lahusti kasutamine kogus.

Eesmärgina püstitatud suhtelise katvuse hindamise meetodiga hinnatavate tulemuste saamiseks ning peenikese pihustusraja loomiseks leitud optimaalne pihustrõhk oli pihusti tehnilise võimekuse serva alas - vastava meetodika tõttu on pihusti kasutus ebaoptimaalne. Lähtudes pihusti võimekusest, oleks võimalik suurendada pihustuskoonuse katvusala võimaldamaks pihustatavat materjali korraga suuremale alale laiali kanda, millega oleks võimalik optimeerida suurema ainehulgaga saavutada suhtelise katvusega hinnatavat tulemust, seda siis keskkonda mineva materjali kao suurenemise arvelt. Või suurendada praeguse pihustusraja laiuse juurde jäädes pihustatava materjali hulka ning mõõta pihustatud materjali paksust otse. näiteks mikro...

Ühe alternatiivina kasutatud automaatsele püstolpihustile leiti aerograaf, mida on seni edukalt kasutatud süsiniksuspensiooniga töötamiseks [2] ja mis võimaldab peenikese raja pihustamist. Aerograafi üheks peamiseks puuduseks on selle harilik vorm käsitöölise tööriistana, mille tõttu üldjuhul olemasolevad variandid ei ole disainitud ühilduma mehaaniliste lisanditega nagu näiteks vedeliku vooliku ühendused. Eelmainitust hoolimata oleks vastav arendus tehniliselt teostatav.

6. Järeldused

Loodud süsteem on automatiseeritud, suutes peale valmisseedmist läbi viia pihustusprotsessi ilma inimese manuaalse juhtimiseta ning suudab seda samal seadistusel teha korduvalt. Süsteemi töö väljundid siiski varieeruvad automatiseeritusest mitte sõltumatutest tingimustest.

Loodud tsirkulatsioonisüsteem suudab tagada süsiniksuspensiooni sadenemise vältimise süsteemi vedelikuvoolikutes, paagi seintel ning pihustuskambris, erandina pihusti peas. Vastaval lahendusel ei leitud olevat mõju pihustamisele enesele. Tsirkulatsioonisüsteem valminud variant on jätkusuutlik, kuigi vajaks lahendust pihusti pea jaoks. Samuti tasuks soetada nii atsetooni kindla sise- kui ka väliselementidega pump.

Süsiniksuspensiooniga pihustamisel optimaalseid parameetreid kasutades tehtud katseseriatega selgus pihustatava materjali hulga pidev vähenemine nii seeria kui ka ühe katse jooksul kolloidse süsiniku pihusti peasse sadenemise tagajärjel. Selle lahenduseks tasuks veel vähendada süsiniksuspensiooni kontsentratsiooni või muuta pihustustulemuse piiranguid pihusti optimaalsemaks kasutuseks. Alternatiivina oleks vahetada automaatne püstolpihusti aerograafi lahenduse vastu.

7. Kokkuvõte

Ehitati automaatne pihustussüsteem, mis on võimeline eelneva seadistuse järgselt samadel tingimustel viima läbi korduvaid pihustusmustrite täitmisi.

Loodi kogu pihustusmaterjali süsteemis liikumise teed haarav tsirkulatsioonisüsteem.

Leiti antud süsteemiga süsiniksuspensiooni pihustamiseks optimaalsed parameetrid ja arendati välja pihustusmustrid, mis võimaldasid hinnata süsiniksuspensiooni pihustumist suhtelise katvuse baasil. Vastavatel tingimustel viidi läbi katseseeriad, mille tulemustega viidi läbi digitaalne graafiline analüüs.

Saadud tulemuste baasil saab väita, et süsiniksuspensiooni pihustamisel ei saavutatud ühtlust, millega oleks võimalik alustada ICL valmistamisprotsessi.

Lähtudes katsete analüüsi ja vaatluse tulemustest sai antud hinnang süsteemi võtmekomponentide toimimisele ja antud ülevaade potentsiaalsetest arengutest.

8. Lisad

Lisa 1

Programm 1006.txt

%

G01

G90

G17

G21

G94

F1200

G01 X0 Y0 Z0

G52 X0 Y0

G01

X50 Y110

M7

G3 X-10 Y50 I50 J50 Z0

G3 X90 Y50 I40 J50 Z0

G3 X10 Y50 I50 J50 Z0

G3 X70 Y50 I40 J50 Z0

G3 X30 Y50 I50 J50 Z0

G3 X50 Y50 I40 J50 Z0

M9

G52 X0 Y0

G01 X48 Y-20

M8

G4 P30

M9

G52 X0 Y0

G01 X0 Y0

G30

%

9. Viited

- [1] Must, I., Kaasik, F., Põldsalu, I., Mihkels, L., Johanson, U., Punning, A. and Aabloo, A., “Ionic and Capacitive Artificial Muscle for Biomimetic Soft Robotics”. *Advanced Engineering Materials*, 2015, **17**: 84-94. doi:10.1002/adem.201400246
- [2] I. Baranova. “Ioonsete mahtuvuslike laminaatide masstootmismeetodi valjatöötamine” Tartu Ülikool, Bakalaureusetöö, 2015
- [3] S. Kim, C. Laschi, B. Trimmer, “Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics”, *Trends in Biotechnology*, **31**, 5, 2013, 287-294 doi: 10.1016/j.tibtech.2013.03.002
- [4] N. G. Cheng et al., "Design and Analysis of a Robust, Low-cost, Highly Articulated manipulator enabled by jamming of granular media," *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, 2012, 4328-4333, doi: 10.1109/ICRA.2012.6225373.
- [5] Mirvakili, S. M. “Niobium nanowire yarns and their application as artificial muscle” (T). University of British Columbia. 2013. <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0071973>
- [6] T. Lulla, „IPMC dünaamiline mudel,“ Tartu Ülikool, Magistritöö, 2013.
- [7] E. Hamburg, „Süsinikelektroodidega ioonpolümeer-metall komposiitmaterjali painde ja jõu vahelise sõltuvuse uurimine,“ Tartu Ülikool, Bakalaureusetöö, 2013.
- [8] J. Torop, T. Sugino, K. Asaka, A. Jänes, E. Lust ja A. Aabloo, „Nanoporous carbide-derived carbon based actuators modified with gold foil: Prospect for fast response and low voltage applications,“ *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, **161**. 629–634

- [9] K. Kruusamäe, F. Kaasik, A. Punning ja A. Aabloo, „Self-sensing ionic electromechanically active actuator with patterned carbon electrodes“, *SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, California, 2013.
- [10] Walther Spritz- und Lackiersysteme GmbH. “Marking Systems”. <http://wsb-benelux.eu/files/catalog/brands/katalog-signieren-210924-en-final.pdf> 02.12.2019, 22:34 (UTC+2).
- [11] S. Luangkularb, S.Prombanpong, V.Tangwarodomnukun, „Material Consumption and Dry Film Thickness in Spray Coating Process“, *Procedia CIRP*. 2014, **17**, 789-794
- [12] Walther Spritz- und Lackiersysteme GmbH. “PILOT GA 9010 Marking”. https://cdn.wagner-group.com/fileadmin/produkte/Industrie/Broschueren/Broschueren_Nass/Applizieren/Product_Data_Sheet_PILOT_GA_9010_Marking_ENG_.pdf 19.05.2020, 02:05 (UTC+2)
- [13] CNC Aluminum 4.8-6.0V Electric Fuel Pump Electric Gear Pump for RC Airplane, ebay.com https://www.ebay.com/itm/CNC-Aluminum-4-8-6-0V-Electric-Fuel-Pump-Electric-Gear-Pump-for-RC-Airplane/263768997712?_trkparms 20.05.2020, 03:55 (UTC+2)
- [14] 6V Dosing Pump Peristaltic Head Aquarium Lab Analytical Liquid, ebay.com <https://www.ebay.com/itm/6V-Dosing-Pump-Peristaltic-Head-Aquarium-Lab-Analytical-Liquid/401830971216?> 20.05.2020, 04:05 (UTC+2)
- [13] Weisstein, Eric W. "Full Width at Half Maximum.". MathWorld--A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/FullWidthatHalfMaximum.html> 18.05.2020, 21:01 (UTC+2).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Magnus Kaldjärv

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

“Pihustiprinter ionsete mahtuvuslike laminaatide tootmiseks”

mille juhendaja on 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'i 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, 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.

Magnus Kaldjärv

20.05.2020