

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

Ioonset 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	6
Töös kasutatavad väljendid	7
1. Sissejuhatus	8
2. Ülevaade	9
2.1 ülevaade pehmerobotikast	9
2.2 ülevaade tehislihastest	10
2.3 painduvad elektrilise kaksikkihi superkondensaatorid / ioonsed mahtuvuslikud laminaadid	10
2.3.1. Membraan	11
2.3.2. Elektroodid	11
2.3.2.1. CPC elektroodimaterjalina	11
2.3.2.2. Süsiniksuspensioon elektroodimaterjali tootmiseks	12
2.3.3. Kiht-kihilt valmistamise meetod	13
2.3.4 Otsene koostemeetod	13
2.3.5. Tekstiilarmeeringuga ioonsed ja mahtuvuslikud laminaadid	13
2. 4. Püstolpihustiga värvimine	14
2.4.1 Pihustusmetoodikad	14
2.4.1.2. Suruõhuga pihustamine	15
2.4.1.2.1. Madala rõhu pihustamine	15
2.4.1.3. Õhuvaba pihustamine	15
2.4.1.4. Elektrostaatiline pihustamine	16
2.4.2 Sadenemise/Värvi lagunemise vältimine	16

2.4.2.1. Paagi sisene segamine	16
2.4.2.2. Tsirkulatsioon	17
3. Eesmärk	18
3.1 Eeltingimused	18
3.2. Töö eesmärgi püstitus	19
4. Metoodika	20
4.1. Masina ülesehitus	20
4.1.1. Pihusti	22
4.1.2. Tsirkulatsioon	22
4.1.3. Suruõhk	25
4.1.4. Kuivatamine pärast pihustamist	26
4.2. Pihustamine	26
4.2.1. Digitaalne kontroll	26
4.2.2. Pihustumuster	26
4.2.3. Pihustatav materjal	29
4.2.4. Substraat	29
4.3. Süsteemi karakteriseerimine	30
4.3.1. Katsete ülesehitus	30
4.3.2. Katsetulemuste analüüs	31
4.3.2.1. Analüüsitava graafiku saavutamine	31
4.3.2.2. Poolkõrguslaid	33
4.3.2.3. Haripunktide kõrgus	34
4.3.2.4. Mõõtmiste eesmärk	35
5. Tulemused ja arutelu	36
5.1. Tsirkulatsioon	36

5.2. Optimaalsete parameetrite leidmine	37
5.3. Katseseeriade analüüs	38
5.3.2. Pihustuskoguse hulga püsivus	38
5.3.2. Poolkõrguslaius	38
5.3.3. Ühe katse ulatuses raja harja kõrguse muutus	39
5.4. Arutelu	40
5.4.1. Süsteemi piirangud	40
5.4.2. Erinevate lahustega pihustamine	41
5.4.3. Tsirkulatsioonsegamise hinnang	41
5.4.4. Kasutatava automaatse pihustuspüstoli hinnang	43
6. Järeldused	44
7. Kokkuvõte	45
8. Lisad	46
Lisa 1	46
Lisa 2	48
9. Viited	50

Töös kasutatavad lühendid

CNC	ingl <i>Computer Numeric Control</i> , arvprogrammjuhtimine
CPC	ingl <i>Carbon-Polymer Composite</i> , süsinik-polümeer komposiit
EAP	ingl <i>Electroactive Polymer</i> , elektroaktiivne polümeer
EMIM-Otf	ingl <i>1-ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate</i> , 1-etüül-3-metüül imidasoolium trifluorometaansulfonaat
HFP	ingl <i>Hexafluoropropylene</i> , heksafluoropropüleen
ICL	ingl <i>Ionic Capacitive Laminate</i> , ioonne mahtuvuslik laminaat
MP	ingl <i>4-methyl-2-pentanone</i> , 4-metüül-2-pentanoon
PVdF	ingl <i>Polyvinylidene fluoride</i> , polüvinüülideen floriid
PVdF-HFP	ingl <i>Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)</i> , polü-(vinülideendifluoriid-koheksafluoropropüleen)

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 edasimineki raskesti saadava ja sageli madala kvaliteediga materjali taha.

Seni käsitööna tehtud suure arengupotentsiaaliga ioonsete mahtuvuslike laminaatide tootmise metoodika puhul nähakse võimalust automatiseerida. Sellel eesmärgil pannakse kokku prototüüpne süsteem, mis peaks kannatama materjali tootmiseks kasutatava sadenemisaldist süsiniksuspensiooni ilma selle lahuses sulamata ja ummistumata. Lahendusena suspensiooni torudesse sadenemise probleemile nähakse töölahuse tsirkuleerimisest. Katsetades leitakse sobivad parameetrid protsessi töötamiseks, et jõuda lähemale loodetavale eesmärgile - ühtlase suspensiooni kihi pihustamiseni, mis võimaldaks hakata pehmeid tehislihaseid tootma. Üles seatud süsteem ja leitud lahendused vajavad katsetamist ja hindamist, et kas nad on sel kujul võimalised 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 kõvadest 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 pehmerboteid, mis suudaks oma füüsilise paindlikkusega taluda ja hakkama saada harjumatu 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].

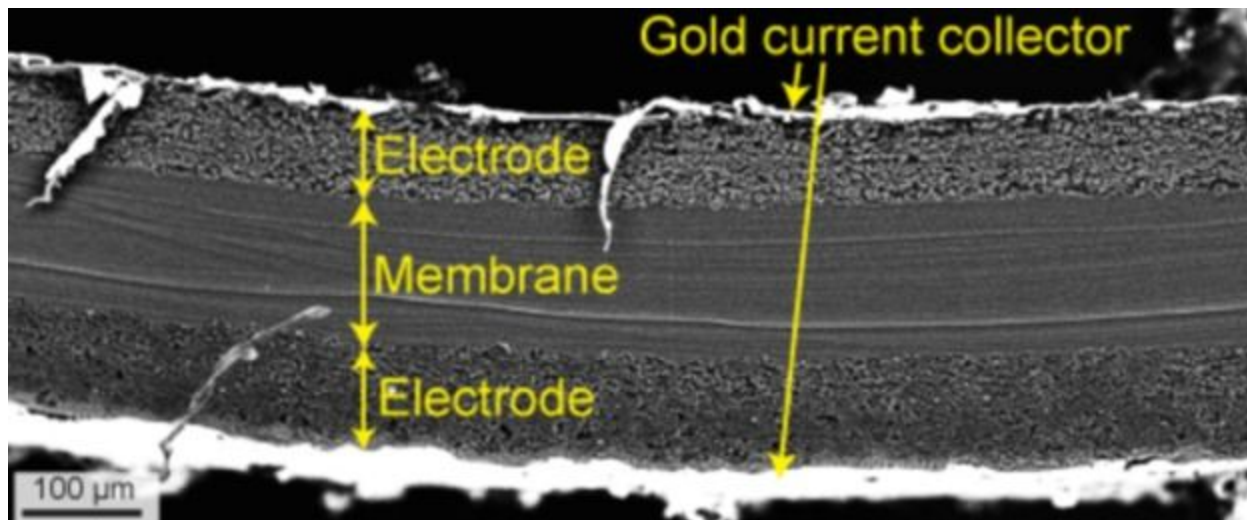
2.2 ülevaade tehislihastest

Üheks looduses rohkelt liikumiseks ja liigutamiseks kasutatavaks organiks on lihas, mis kujutab endast ühtset kompakset struktuuri, mis on võimeline oma kuju muutma kokku tõmmates, paisudes või keerdudes 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 mahtuvuslikud laminaadid

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

Ioonsete mahtuvuslike laminaatide valmistamisel lehtmaterjalina on need elektrodidele pinge 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

2.3.1. Membraan

Elektrilise kaksikkihi superkondensaatori membraan kujutab endast ioonjuhtivat kuid mitte elektronjuhtivat poorset polümeerkihti.

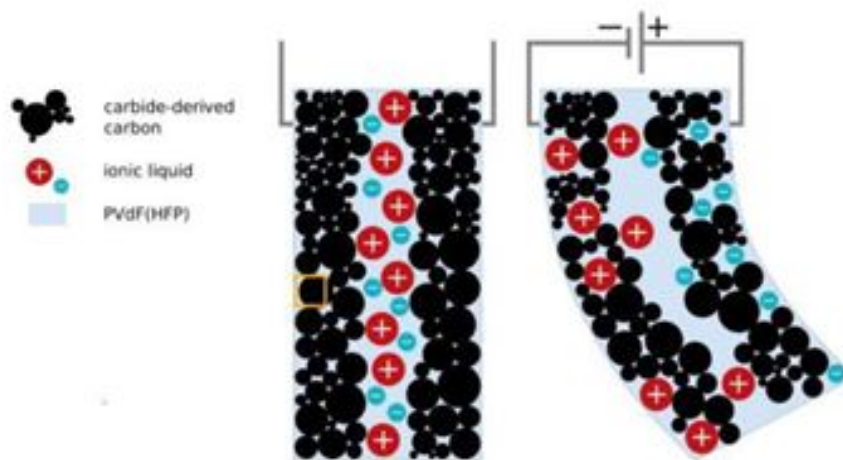
2.3.2. Elektroodid

Elektroodid kujutavad ICL puhul endast suure eripinnaga elektron- ja ioonjuhtivat materjali kihti.

2.3.2.1. CPC elektroodimaterjalina

CPC on levinud elektroodimaterjal, mis kujutab endast komposiiti pulbrilisest süsinikust, polümeerist ning vedelast elektrolüüdist. ICL-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 (Joonis 2.3). Kasutatava ioonvedeliku

kationide ja anioonide suuruse erinevuse tõttu paisuvad poorsed süsinikelektroodid erinevalt ning sellest tulenevalt laminaat paindub. [6]



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

CPC elektroodidega laminaatide valmistamiseks kasutatakse peamiselt kaht meetodit. Esimese meetodi puhul valmistatakse esmalt kõik kihid eraldi ja seejärel kuumpressitakse kihid kokku üheks laminaadiks - kiht-kihilt meetod [8]. Teise meetodi puhul valmistatakse membraan ette ja kantakse elektroodid membraanile pihustamise teel - otsene koostemeetod. [9]

2.3.2.2. Süsiniksuspensioon elektroodimaterjali tootmiseks

Tartu Ülikooli Intelligentsete Materjalide ja Süsteemide laboris on toodetud CPC elektroode peamiselt pihustamise teel, kasutades pihustatava materjalina nanopoorse süsiniku osakeste suspensiooni. Üheks parimaid tulemusi andnud vastava suspensiooni valmistamiseks lahustatakse esmalt 2 g PVdF-HFP' (Sigma-Aldrich) 24 ml MP (Alfa Aesar) (osa A). Seejärel segati kokku 2 g süsiniku tahma (BP2000, Cabot) (20–50 nm osakeste suurusega) ja 2 g EMIM-Otf' 10 ml MP sisse(osa B). Osade A ja B kokku segamise järel lisati veel 10 ml MP [10]

2.3.3. Kiht-kihilt valmistamise meetod

Üheks ICL koostemeetodiks on kiht-kihilt valmistamine. Selleks valmistatakse enne eraldi elektroodi ja membraani kihid, mis pressitakse üksteisega kuumpressiga kokku. [11] Pressimise puudulike tingimuste korral - madala temperatuur, rõhk ja liiga lühikese pressimisaeg - kaasnevad probleemid, mis väljenduvad elektroodi ja membraanikihi puudulikus seostumises ja hilisemas delamineerumises. [12]

2.3.4 Otsene koostemeetod

Otsese koostemeetodi puhul toimub elektroodi membraanile kandmine pihustamise teel, mille käigus elektroodi suspensioon pihustatakse või pintseldatakse kiht kihi haaval mõlemale poole polümeerset membraani. Iga kihi pealekandmise järel see kuivatatakse, mille käigus lenduvad lahendid aurustuvad ning seejärel kantakse peale uus kiht elektroodi suspensiooni. Lahendi tungimisel eelnevalt pihustatud ja kuivatatud polümeeri sisaldavasse kihti saavutatakse kõigi kihtide omavaheline maksimaalne seostumine ja välistatakse komposiidi hilisem delamineerumine. Vastava meetodika üheks probleemiks on leitud, et membraan võib kippuda elektroodi suspensiooni lahendiga märgudes krussi tõmbuma, mis rikub järgmiste kihtide ühtluse. [13]

2.3.5. Tekstiilarmeeringuga ioonsed ja mahtuvuslikud laminaadid

Armeeritud tekstiilist membraan tõstab otsese koostemeetodi produktiivsust. Armeeritud tekstiili kasutamisel sarrusena kasvab suuremate koguste valmistamisel valmistusprotsessi korratavus, samuti on välistatud lühise teke elektroodide vahel. Kui teised meetodid võimaldavad luua suhteliselt väikesi ühtlase struktuuriga laboratoorseid koguseid, siis tekstiilarmeeringu meetodil on valmistatud laminaate diameetriga ligikaudu 15 cm (rakisena kasutatud käsitöö tikkimisraami) tänu nii valmistatud membraani ühtlusele, kuid vastavat suurusjärku ei peeta kindlasti mõõtmete piiiriks. Kuigi tekstiilarmeeringul on rakendus vaid

ehituse faasis, siis ei ole täheldatud sellel toimet elektromehaanilistele omadustele. Väljatöötud meetod võimaldab pihustamisega head kontrolli membraani ja elektrootide 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. 4. Püstolpihustiga värvimine

Vedela materjaliga pinnale ühtlase kihi saavutamiseks on üheks paindlikuks võimaluseks pihustamine. Tööstuses kasutatakse sageli pinna lahusega katmiseks automaatne suruõhul töötava püstolpihustit. [14] Kasutades arvuti juhitud kontrollprogrammi on võimalik erinevate püstolpihustite mudelite erinevate konfiguratsioonide juures pihustumustri laiuseks saavutada mõnest millimeetrist paarikümne sentimeetrini [14] ning värvitava kihi läbimõõduks saavutada suurusjärg 10 mikromeetrit [15].

2.4.1 Pihustusmetoodikad

Vedela materjali kandmiseks pinnale kasutatakse ühe meetodina pihustamist. Selleks atomiseeritakse vedelik tilgakesteks ja tagatakse nende jõudmine pinnale tilgakestele antud hooga. Materjali pinna katvuse ulatuse ja joa kuju määrab pihustamiseks kasutatava seadme, pihusti, otsiku kuju ja pihusti töömetoodikast. Pihustusmetoodikaid eristab lisaks eelmainitule ka pihustatava materjali kadu keskkonda ja atomiseerimisel tekkivate piiskade suurus.

2.4.1.2. Suruõhuga pihustamine

Klassikaline vedeliku pihustamise metoodika kasutab puhast kuiva suruõhku nii vedeliku atomiseerimiseks kui ka pihustatavale pinnale kandmiseks. Kõrge rõhu all suruõhu tekitatud

pihustusjuga on hästi kontrollitav ja pihustusmustrina on võimalik kasutada nii peenikest täppi kui mitmekümne sentrimeetribimõõduga ringe või ellipsoide. Samas on kõrge rõhk tekitab rohkelt turbolentsust, mis põhjustab arvestatava osa materjali kadu pihustusjoa suunast kõrvale ümbritsevasse keskkonda. [17]

2.4.1.2.1. Madala rõhu pihustamine

Kõrge rõhu üheks materjalisäästvamaks alternatiiviks on kasutada suurema hulga madalama rõhu meetodikat (ingl. *High volume low pressure*, HVLP). See võimaldab rõhkudega alla 0,7 bar saada sarnase pihustusmuistri hariliku pihustamise meetodikaga. Miinusena on vastava meetodika puhul leitud vedelikule selle kättesaamiseks eraldi rõhu tekitamise vajadus, kui paak asub allpool pihustit, ja atomiseeritud piiskade varieeruv suurus. [16]

Samuti madalat rõhku kasutav madala rõhu madala hulga (ingl. *low pressure low volume*, LPLV) meetodika puhul atomiseeritakse lapik peenike vedelikujuga eelnevatest arvestatavalt väiksema õhuhulga poolt. Kuigi tegemist on hästi kontrollitava ja materjalisäästliku variandiga, suudab see korralikult atomiseerida vaid lahjendatud või madala viskoossusega vedelikke. [17]

2.4.1.3. Õhuvaba pihustamine

Õhuvaba pihustamise puhul, nagu nimigi ütleb, ei kasutata pihustamiseks suruõhku. Selleks pressitakse pihustatav vedelik kõrge rõhu (40 - 280 bar) all läbi väikese otsiku. Nii atomiseerimisega saadud pisikesed tilgad kanduvad substraadile jääk hoo toimele. Väljuva vedeliku hulk on kontrollitav otsiku augu suuruse, vedelikule avaldatava surve ja selle viskoossusega ning pihustatava joa ning otsiku augu kujust.

Suurimaks plussiks on õhuvabal pihustamisel suur pihustamiskiirus. Lisaks esineb sellega suhteliselt väike substraadilt tagasipõrge. Eelnevad võimaldavad seda rakendada süvistatud pindade katmiseks ja vähem kontrollitud tingimustes intensiivse katte saavutamiseks.

Peamiseks puudujäägiks õhuvabal pihustamisel on atomiseerimisel saadavate tilkade suured mõõtmed, mis ei võimalda sellega peenkatmist läbi viia. [17]

2.4.1.4. Elektrostaatiline pihustamine

Elektrostaatilise pihustamise meetodika võimaldab vähendada materjali kulu, laadides atomiseeritud osakesed kõrge pingega. Pihustist väljudes laetakse selleks vedeliku osakesed mõne tuhande kuni 100000 V suuruse staatilise laenguga ning pihustatav pind maandatakse. See tagab suurema hulga lendu lastud osakeste sihile jõudmise, kuid võimaldab lisandväärtusena algsest pihustusjoa suunast mitte haaratavaid pindu nagu külgi, tagumist ja õõnsusi. Elektrostaatilist laadimist saab rakendada olenemata pihustusjoa tekitamise meetodikast ning selle rakendamise paindlikkus võimaldab ka olemasolevaid pihustusseadmeid kergesti ümber kohandada. [18,19]

2.4.2 Sadenemise/Värvi lagunemise vältimine

Vältimaks vedelike segude, suspensioonide ja kolloidide komponentideks jagunemist ja vähendada selle omadusi mõjutavate keskkondade kokkupuute mõju on nii pikemalt kestva pihustusprotsessi ajal kui ka seisakuteks pihustusüsteemi paagis ja torudes kasulik läbi viia vedelike segamist.

2.4.2.1. Paagi sisene segamine

Paagis kui suuremas, üldjuhul fikseeritud kuju ja asetusega, pihustatava vedeliku hoidlas, kus vedelik püsib enamuse pihustusprotsessi ajast, on mõttekas luua eraldiseisev segamismehaanika. Võimalikuks lahenduseks sellele on paagis paiknevad ümber oma telje keerlevad tiivikud või labad [14], mis hoiavad oma tegevusega vedelikku liikumas.

2.4.2.2. Tsirkulatsioon

Kogu pihustussüsteemi vedeliku läbitavat osa kattev tsirkulatsioonisüsteem aitab hoida vedeliku stabiilsena ka kohtades, kus muu meetodika ei oleks rakendatav või praktiline. See kujutab endast kinnist ringi, kuhu kuuluvad paak, ühendusteed paagist pihustini, pihusti materjali võtu ala või mehhanism ning tagasivoolu ühendused pihustist tagasi paaki, vedelikku ajab süsteemis ringi sinna ühendatud pump. Et tagada vedeliku ühtlane kättesaadavus pihustile, on tarvilik kontrollida vedelikule avalduvat rõhku kontrollmehhanismiga. [20]

3. Eesmärk

Varasemalt on kasutatud ICL-i elektroodimaterjali süsiniksuspensiooni pihustamiseks käsitsi kontrollitud aerograafi ja HVLP püstolit. 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.

Esialgusel 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.

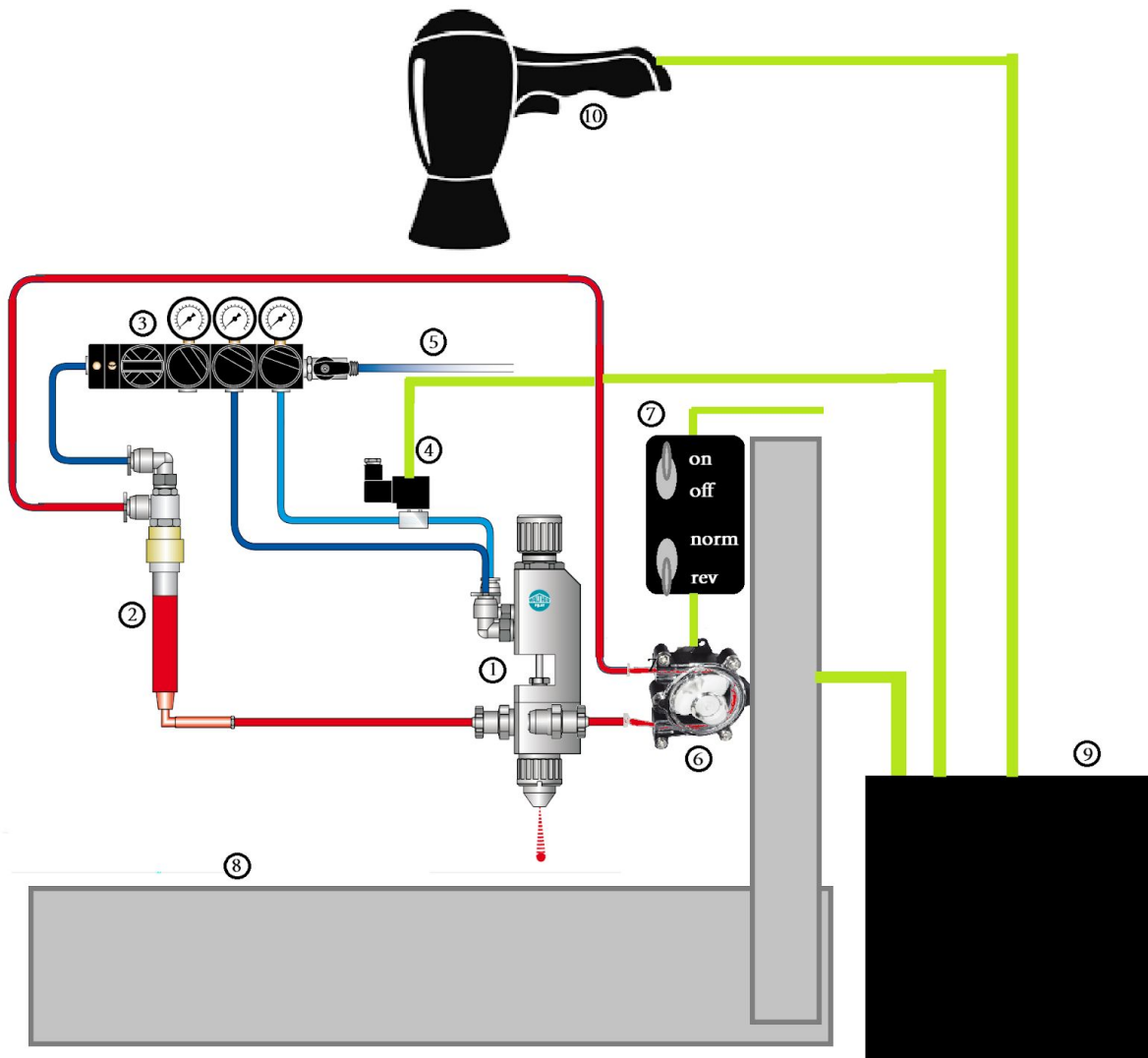
3.2. Töö eesmärgi püstitus

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 kavatakse arendada meetodika CNC kontrollitult ühtlase ja korratava pihustustulemuse saavutamiseks ilma suurte materjali kadudeta keskkonda. Meetodika hindamiseks viiakse läbi praktilised katseseeriad ja nende tulemust analüüsitakse graafiliselt substraadi pinna suhtelise katvuse alusel. Saadud tulemuste põhjal antakse hinnang kasutatud funktsionaalsete elementide sobivusele antud rolli ja analüüsitakse 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. [21] (lisa 2) (Joonis 4.2)

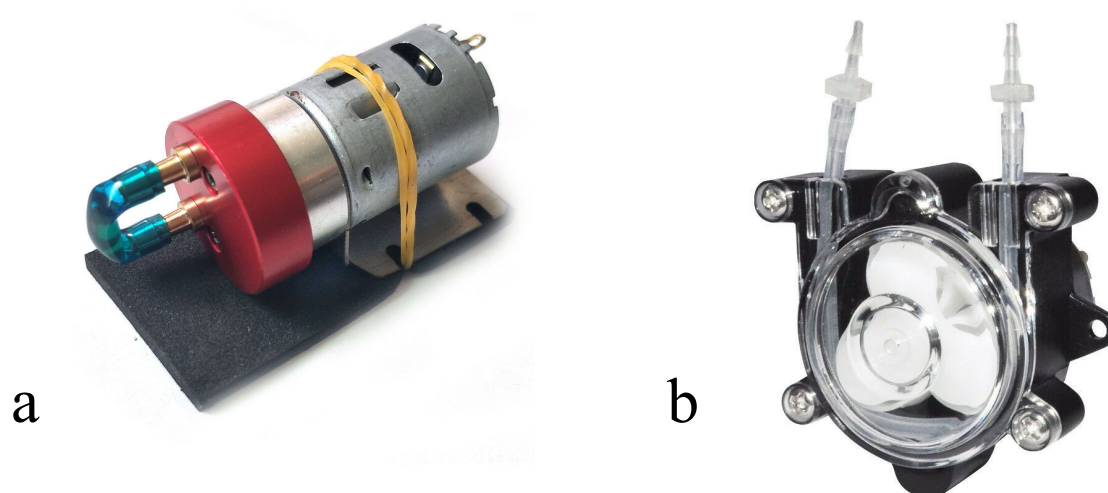


Joonis 4.2. Automaatne pihustipüstol Wagner Pilot GA9010 Marking. [21]

4.1.2. Tsirkulatsioon

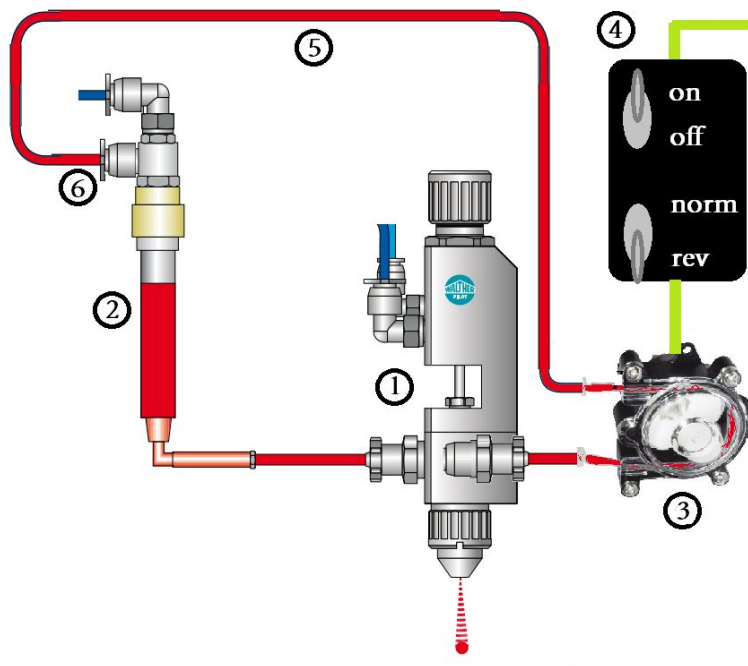
Kogu töölahuse pidevaks segamiseks tsirkulatsiooni teel oli vaja luua vooluringlus terve vedeliku süsteemi ulatuses: paagist pihusti kambrisse, sealt pumpa ning pumbast tagasi paaki. Kasutatav pihusti on disainitud võimeliseks ühilduma tsirkulatsioonisüsteemi oma mitme sisendiga pihustuskambrisse erinevatest 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 ja selle keemiliselt sarnaste omadustega atsetooni kindel.

Kütusepump oma suhteliselt hea keemilise vastupidavusega leiti olevaks üheks sobivaks lahenduseks. Et enamus sise põlemismootoritega 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 piisavalt stabiilse 2x4 mõõdus silikoonvooliku ulatusse, mis lisaboonusena on kergesti vahetatav. Mõlemad pumbad kasutasid 6V alalist toitepinget.



Joonis 4.3. Kasutatud mudellennuki kütusepump (a) [22] ja peristaltiline doseerimispump (b) [23]

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.

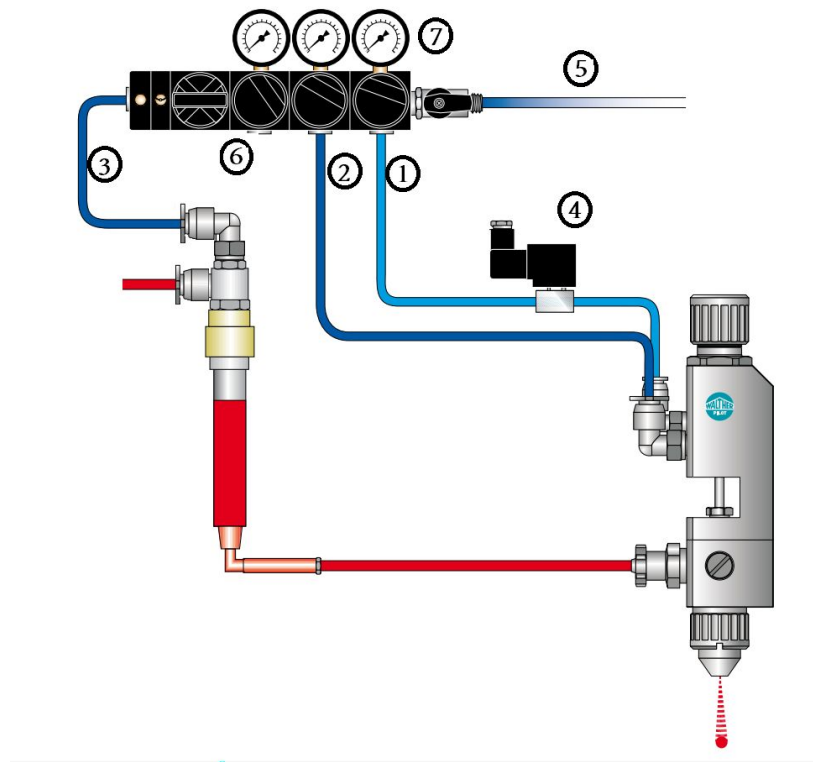


Joonis 4.4. Pihusti tsirkulatsioonisüsteem; 1 - pihusti, 2 - pihustatava materjali paak, 3 - pump, 4 - pumba lülitikarp, 5 - teflonist voolik, 6 - kiirliitmik

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 toimet. 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.

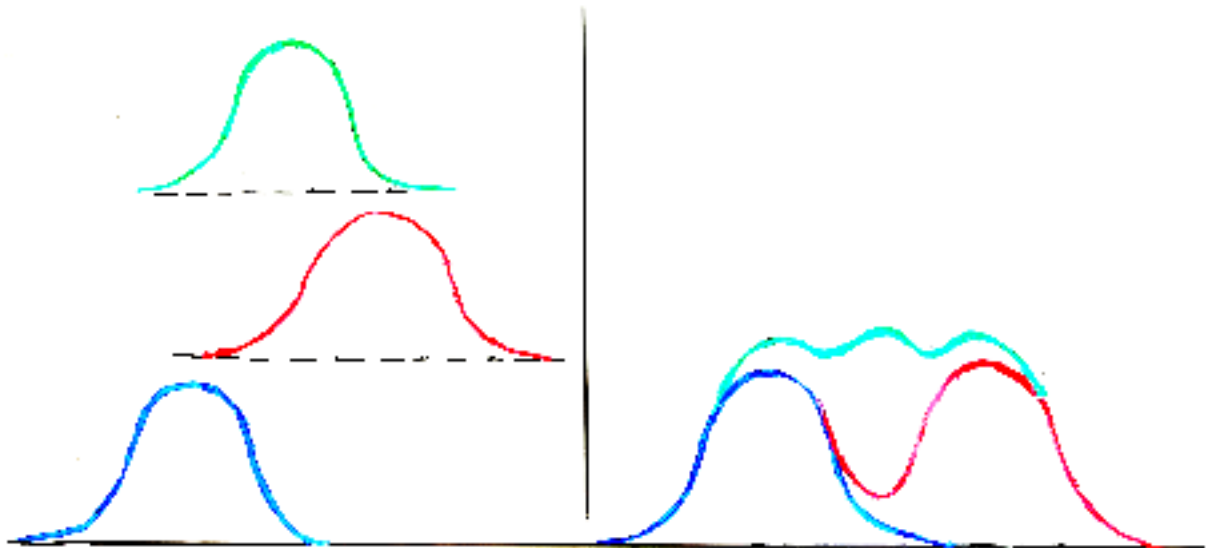
4.2.1. Digitaalne kontroll

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 muustrilise liikumisega pihustamisjoaga ühtlase katvusega ala, kuhu jõuaks võimalikult suur osa pihustatavast materjalist. Arvestades kasutatavast pihustist pihustatud materjali joa koonusjat kuju, võib eeldada pihusti ühtlasel liikumisel pihustamisel tekkiva pihustatud materjali raja läbilõikel materjali hulga kõverale vastavat jaotust. Vastava ebäühtluse tasandamiseks lõpp-produkti vaates leiti ühe meetodina pihustamise radade nihutamist kihi kaupa, tagades ühes ala punktis erinevate kihtidelt erinev raja läbilõikekõvera osa, teise meetodina rakendada osalist ülekatvust juba sama kihi radade ulatuses (joonis 4.6).



Joonis 4.6. Üldise ühtluse suurendamine radade osalise ülekatvusega, Vasakul kujutatud eraldi pihustuskihtide materjali distributsiooni ühe kihi lõikes, paremal nende kihtide materjali distributsioon üldisest materjalist, kui need on kantud ülekatvusega ühele substraadile.

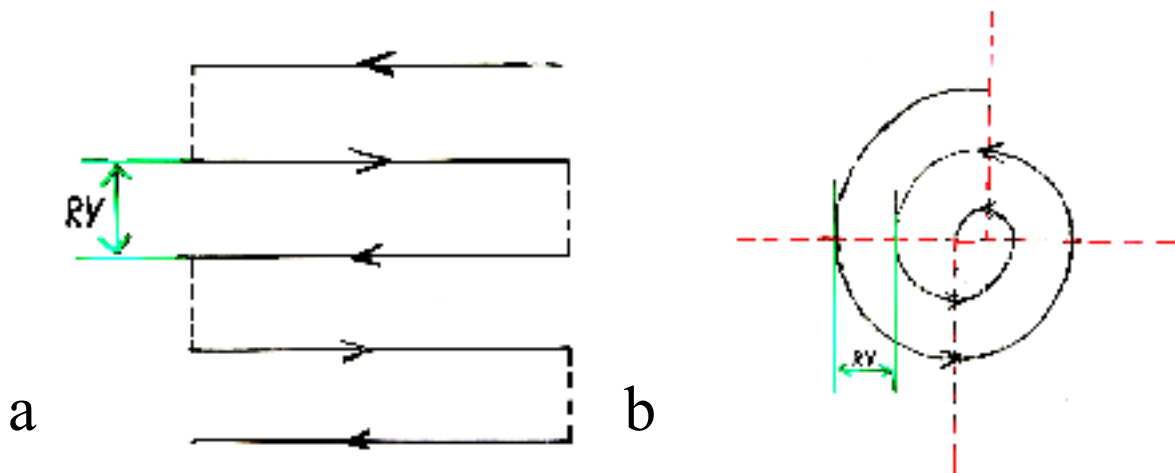
Eelnevale tuginedes otsustati kasutada pihustumustreid, mis kujutavad endast pihusti ühtlast liikumist pidevalt pihustades radadel, mis asuvad üksteisest teatava vahemaa kaugusel. Esmalt katsetati paralleelseid jooni, mille puhul ühelt joonelt teisele liikumisel katkestati pihustamine ja

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 teoorias 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. Tagamaks, et süsteem kannataks töölahust (MP-1 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. Sellele on vaja leida konsentratsioonivahemik, mille juures on konsentratsioon piisavalt madal, et minimaliseerida kolloidose 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 tekstiilalusele 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 ultrahelisondiga
2. Puhastati süsteem ja täideti paak süstlaga atsetooniga
3. Süsteem suleti, avati suruõhu kraan ja käivitati tsirkulatsioon
4. Tsirkulatsioonil lasti segamatult toimuda vähemalt 5 minutit
5. Seejärel pumbati pesulahuse jäägid süsteemist, pihusti pea eemaldati ja puhastati
6. Pihusti seati töövalmidusse
7. Iga seeria jaoks lisati paaki 15 ml töölahust süstlaga; peale lisamist käivitati koheselt tsirkulatsioon
8. Pihustamisplatvormile asetati substraat
9. Arvutist käivitati pihustusprogramm
10. Programmi lõppedes tõsteti katse substraat pihustusplatvormilt ning jäeti tõmbekappi hingama
11. Edasi kordus alates punktist 8 kuni pihustuse katkemiseni

Katse substraadiks kasutati valget koopiapaberit tänu suhteliselt ühtlasele tekstuurile ning konstantsele valgele toonile. Ülesseadmise katsetustele tuginevalt võeti mustrina kasutusele pseudospiraal, et saada ühe katse jooksul pikk jooksev pihustus rajavahega 20 mm, mis oli eeldatavasti piisav paralleelsete raja lõikude ülekätkuse minimaliseerimiseks (käsklusfail

1006.txt, lisa 1). Seeria pikkust otseselt ei fikseeritud: katseid viidi läbi kuni pihustust enam ei toimunud, kas siis süsteemi ummistumise toimel 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.

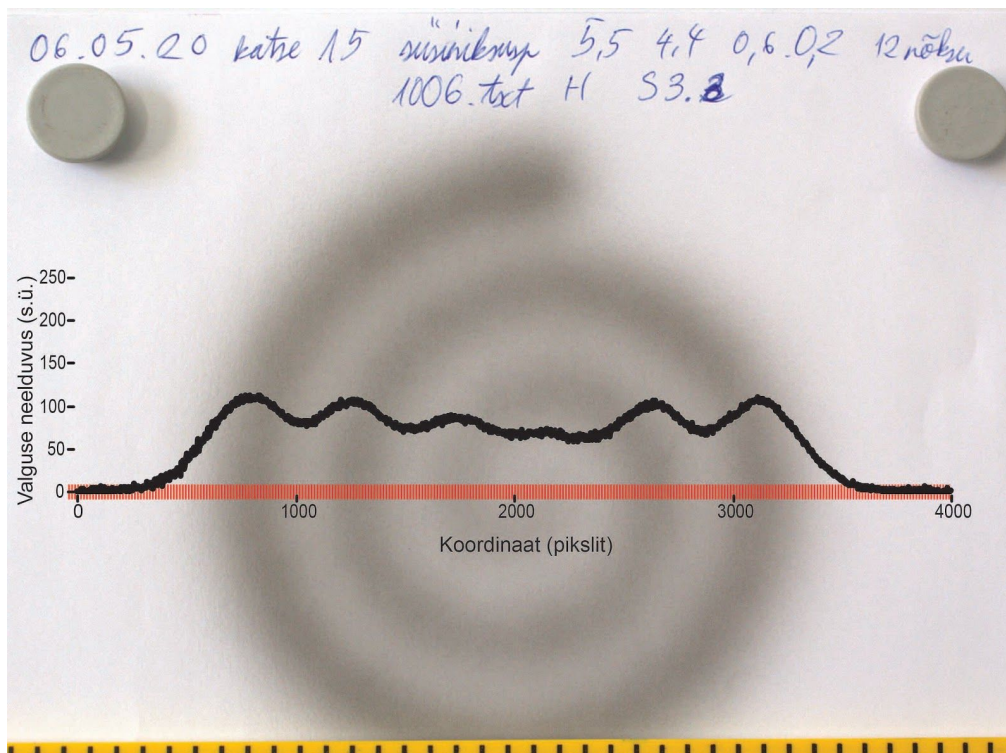
4.3.2.1. Analüüsitava graafiku saavutamine

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 risküliku suurune ala mõõtmetega 4000*50 pikslit horisontaalse asetusega, keskmega spiraali keskmes (joonis 4.8). Vastava ala laius sai valitud, arvestades kasutatava pihustusemustrit 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 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).



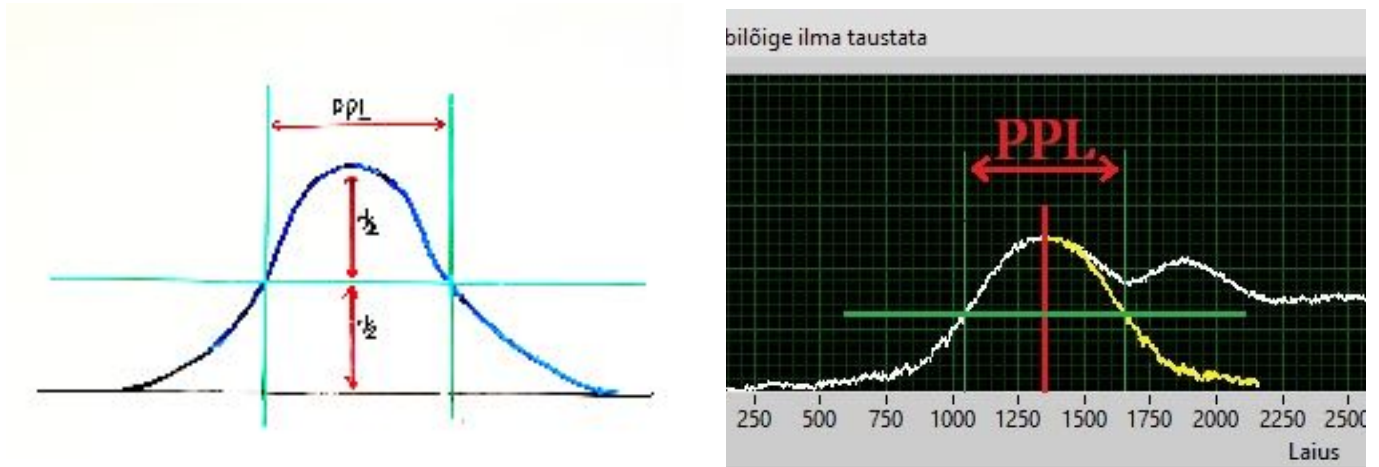
Joonis 4.8. Katsetulemus ja selle keskjoonelt saadud horisontaalne keskmistatud läbilõige (punane ristkülik kujutab läbilõike saamiseks kasutatud foto ala).

4.3.2.2. Poolkõrguslaius

Pihustuse ühtluse ühe hinnava parameetrina kasutati poolkõrguslaiust. Poolkõrguslaius (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) [24]

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 poolkõrguslaiuse väärtus ei muutu võrreldes varasemaga.

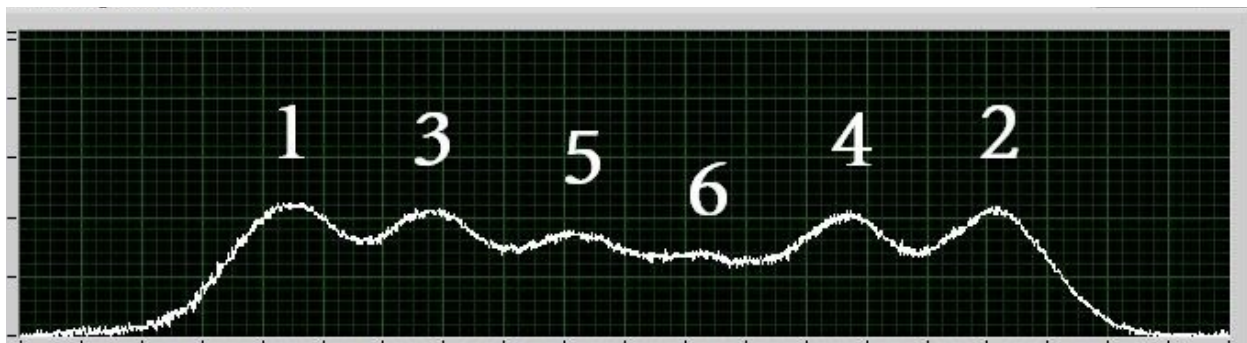
Katsete koostamisel arvestati rajavahega, mille puhul kõrvalraja ülekate raja haripunktis on praktiliselt mitteamestav. Sama ei saa see-eest öelda teise rajaga külgneva kõvera nõlva kohta. Seetõttu on poolkõrguslaiuse otseselt leitav vaid servmistelt radadelt, kus välisõlvalt võib raja sümmeetrilisuse 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 vasakpoolselt serva rajalt eelmainitud loogika baasil. Saadud tulemused jagati läbi leitud piksli laiuse tihedusega (24 pikslilaiust/mm) standardseteks ühikuteks teisendamisel.



Joonis 4.9. Poolkõrguslaius (a) ja selle leidmine katsetulemuse graafikult (b); PPL - poolkõrguslaius, 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 poolkõrguslaiuse 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;

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.

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

Nii saadi optimaalseteks pihustustingimusteks:

- väljast sisse tulev rõhk 5,5 bar
- Pihustuse kontrollrõhk 4,4 bar
- pihustusrõhk 0,6 bar
- paagi rõhk 0,2 bar

5.3. Katseseeriade analüüs

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

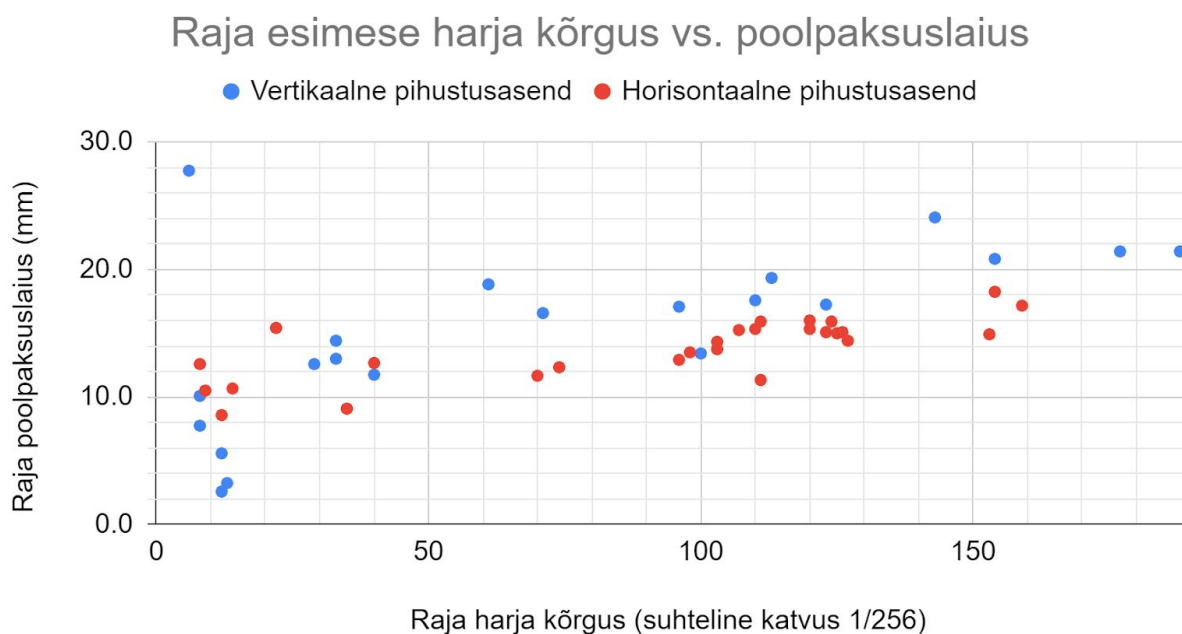
Vaadeldes saadud graafikuid keskmistatud läbilõigetest selgub, et valitud rajavahe ei olnud piisav arvestatava ülekatvusala saamiseks - kahe harja vahelise "oru" põhi on üle poole harjade enese kõrgusest (joonis 4.8).

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. Poolkõrguslaid

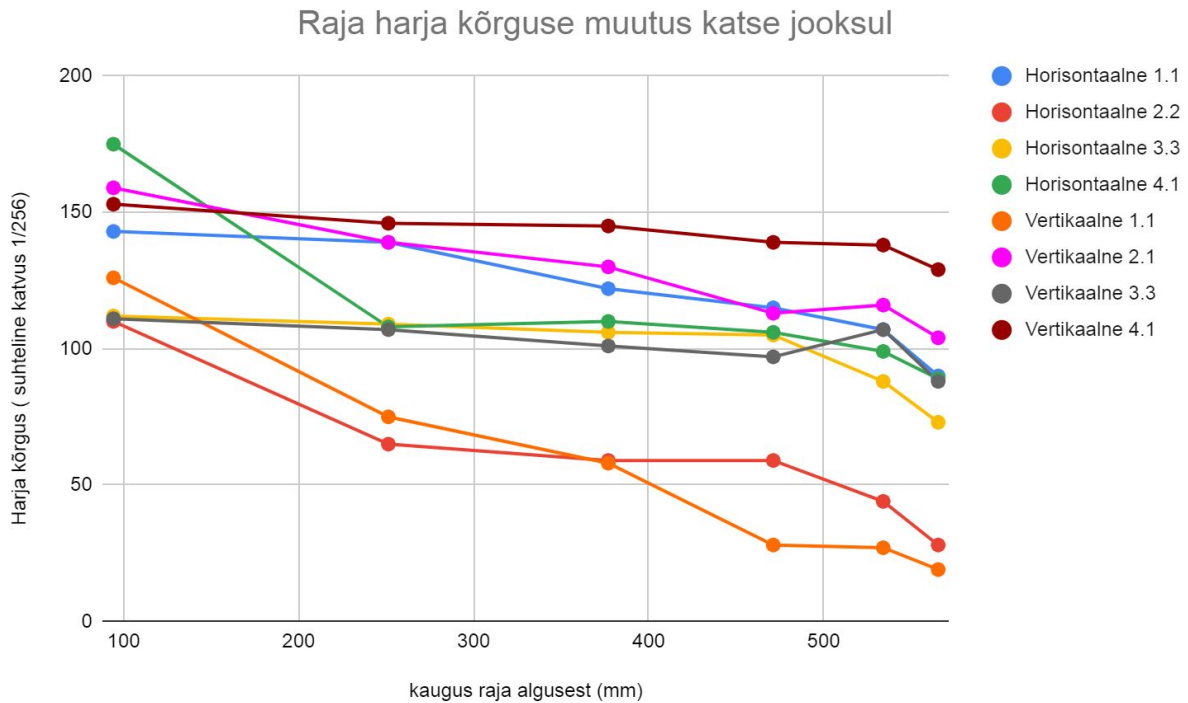
Lähtudes seeriade katsetulemustelt mõõdetud esimese raja poolkõrguslaidustest, sai tõdeda, et vertikaalse kui ka horisontaalsel pihustamisel kipub raja harja kõrguse suurenemisel poolkõrguslaid suurenema ning seda mõnevõrra rohkem horisontaalse pihustusasendi korral (Joonis 5.1).



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

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 zelaatinilahus 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 lõigus. 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 valmisseadmist 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 katseseeriast 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 pihustumustrite täitmisi.

Loodi kogu pihustusmaterjali süsteemis liikumise teed haarav tsirkulatsioonisüsteem.

Leiti antud süsteemiga süsiniksuspensiooni pihustamiseks optimaalsed parameetrid ja arendati välja pihustumustrid, 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

%

pihustipüstolit Wagner Pilot GA9010 Marking andmeleht



PILOT GA 9010 Marking

The **PILOT GA 9010 Marking** is a fully automatic spray gun for spot and line marking. It is suitable for alphanumeric labelling.



Sharp-edged markings are possible with the **PILOT GA 9010 Marking**. Thanks to the extremely short switching times (open, spray, close), it is ideal for use in production processes with short cycle times. Specially designed flushing devices and a robust construction ensure that the PILOT GA 9010 Marking delivers smooth production processes even under the most difficult conditions.

Applications:

- OK and NOK component marking
- Alphanumeric labelling
- Food processing
- Adhesive processing with spot-accurate application



PILOT GA 9010 Marking
Fully automatic spray gun
for spot and line marking



PILOT GA 9010 Marking Membrane
Robust, fully automatic sign-writing gun with membrane instead of needle seal. Especially suitable for processing abrasive or moisture-hardening materials as well as quick-drying paints.



PILOT GA 9010 Marking

Technical data

Features	Values
Dimensions (H x W x D)	29 x 22 x 128 mm
Nozzle sizes available	Ø 0.3 / 0.5 / 0.8 / 1.0 / 1.2 / 1.5 mm
Atomising air connection	2 x M7 - PK 4
Control air connection	2 x M5 - PK 3
Material feed	1 x M5 and 3x 1/8"

Features	Values
Atomising air pressure	0 - 6 bar
Control air pressure	min. 4 bar – max. 6 bar
Material pressure	0 – 6 bar (0.3 – 4 bar MB)
Operating temperature	max. 80 °C (50 °C MB)
Sound pressure	1 bar = 64 dB (A) 6 bar = 83 dB (A)

Typical applications

- Markings following weld seam inspection of sheets and pipes
- Marking of rejects
- OK component marking
- Machine-recognisable marking following leak check
- Labelling as an orientation tool
- Labelling of different construction types with the same appearance
- Production line identification (e.g. cutting and bending lines)

Sign-writing paints

Sign-writing paints are made with a particularly high-quality grind, which means they are less likely to deposit and block the nozzle than coating materials for surface technology. The paints can be used on dry or wet, cold or hot, dark or light, smooth or porous and even oily surfaces. For example, they are used on sheets, pipes, plastics, textiles, glass, stone, wood, paper, ceramic and rubber. All popular colours can be supplied. Special colours or special applications can be provided upon request. Sign-writing colours (e.g.: WPF 1922, WPF0232) are quick-drying, provide good coverage, are oil-resistant, light-fast and waterproof. For clean and sharp-edged marking on a light background, sign-writing ink of type WPT 1800, for example, is recommended.

J. Wagner GmbH
Industrial Solutions
88677 Markdorf (Alemania)
T +49 (0) 7544 505 - 0
F +49 (0) 7544 505 - 200

www.wagner-group.com



WAGNER GROUP

12/2017 - 2392624 - All details, illustrations and specifications are based on the information available at the time of printing. Modifications reserved.

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, „Süsinikelektroodidegaioonpolümeer-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] Uduste, I., Kaasik, F., Johanson, U., Aabloo, A. and Must, I. “An All-Textile Non-muscular Biomimetic Actuator Based on Electrohydrodynamic Swelling”. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020, **8**:408. doi: 10.3389/fbioe.2020.00408
- [11] T. Fukushima, K. Asaka, A. Kosaka, and T. Aida, “Fully plastic actuator through layer-by-layer casting with ionic-liquid-based bucky gel,” *Angewandte Chemie - International Edition*, 2005 vol. **44**, 16: 2410–2413,. doi: doi.org/10.1002/anie.200462318
- [12] I. Põldsalu, “Kuldlehega Modifitseeritud Süsinik -Ioonvedelik- Polümeer,” Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, 2010.
- [13] Akle, B.J., Bennett, M.D., Leo, D.J. et al. “Direct assembly process: a novel fabrication technique for large strain ionic polymer transducers”. *Journal of Materials Science* , 2007; **42**: 7031–7041. doi.org/10.1007/s10853-006-0632-4
- [14] 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).
- [15] S. Luangkularb, S.Prombanpong, V.Tangwarodomnukun, „Material Consumption and Dry Film Thickness in Spray Coating Process“, *Procedia CIRP*. 2014, **17**, 789-794
- [16] Mellette R. R. “High-volume low pressure air spray gun”. *U.S. Patent No. 5064119A*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 1991.
Saadud <https://patents.google.com/patent/US5064119A/en>

- [17] Hund, J. P.. "Spray Application Processes". *Finishers' Management*, 1995. Sept: 14-20.
- [18] Garcowski, T. "Electrostatic air atomization spray coating system". *U.S. Patent No. 4437614A*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 1982.
Saadud <https://patents.google.com/patent/US4437614A/en>
- [19] Tilney, R. "Electrostatic coating processes". *British Journal of Applied Physics*, 1953; **4**: S51–S54. doi:10.1088/0508-3443/4/S2/321/
- [20] Smith, A.A., Wood, N.C., Thomas, M.A. "Paint circulating system and method". *U.S. Patent No. 7828527B2*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 2005.
Saadud <https://patents.google.com/patent/US7828527B2/en>
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 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)
- [24] 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

16.08.2020