



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Tartu kolledž

**KANEPIBETOONI NIISKUSTEHNILISED
OMADUSED: SORPTSIOON, VEEIMAVUS JA
VEEAURULÄBIVUS**

**HYGROSCOPIC PERFORMANCE OF HEMPCRETE:
SORPTION, WATER ABSORPTION AND WATER
VAPOUR PERMEABILITY**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Tarmo Koosapoe

Üliõpilaskood: 165242EAEI

Juhendaja: Aime Ruus, dotsent

Tartu 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20...

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Tarmo Koosapoeg (sünnikuupäev: 18.05.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „ Kanepibetooni niiskustehnilised omadused: sorptsioon, veeimavus ja veeauruläbivus“ „Hygroscopic performance of hempcrete: sorption, water absorption and water vapour permeability “, mille juhendaja on Aime Ruus.

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

Tarmo Koosapoeg

13.02.2022

Tartu kolledž
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Tarmo Koosapoeg, 165242EAEI

Õppekava, peeriala: Õppekava – Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendajad: Aime Ruus, dotsent, +372 53 40 28 23

Lõputöö teema:

Kanepibetooni niiskustehnilised omadused: sorptsioon, veeimavus ja veeauruläbivus.

Hygroscopic performance of hempcrete: sorption, water absorption and water vapour permeability.

Lõputöö põhieesmärgid: Uurida kanepibetooni niiskustehnilisi omadusi:

1. veeauru läbivust;
2. veeimavust;
3. sorptsiooni.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade, tutvumine standarditega, katsekehade ettevalmistamine	08.02.21
2.	Katsete läbiviimine	22.03.21
3.	Andmete analüüs, töö vormistamine	12.01.22

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "17" jaanuar 2022 a

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
1.1. Kanepi kasvatamine. Ajalugu	9
1.2. Kanepi taasavastamine	12
1.3. Kanepibetonist üldiselt	14
1.4. Kanepibetooni Ajalugu	16
1.4.1 Kanepibetooni standardimine. Prantsusmaa	19
1.4.2 Suurbritannia ja kanepibetooni levik	20
1.5 Kanepibetooni kui materjali omadused	21
1.5.1 Veeaurujuhtivus ja vastupidavus	21
1.5.2 Head struktuursed omadused	21
1.5.3 Taimemürkideta kasvatatud/loodusesõbralik	22
1.5.4 Materjali soojusjuhtivuslikud omadused	23
1.5.5 Tuleohutus	24
2.1 Kanepibetooni koostis	25
2.2 Kanepibetooni kasutamine seinas,laes, jne	27
2.2.1 Seintes	27
2.2.2 Põrandad	31
2.2.3 KATUS	33
2.2.4 Aknad ja viimistlus	34
2.2.5 Muud kasutusala	35
2.3 Kanepibetooni paigaldamine	36
2.3.1. Valamine ja tampimine	36
2.3.2. Pihustamine	37
2.3.3. Kanepibetooni plokid ja paneelid	39
3. MATERJAL JA METOODIKA	43

3.1	katsekehade ettevalmistus, karboniseerimisprotsess	43
3.2.	Kivistunud mördi kapillaarse veeimavuse koefitsendi määramine	46
3.3	Veeauru läbivuse määramine – Tassi meetod	52
3.4	Hügrokoopse sorptsiooni määramine	55
4.	TULEMUSED	57
4.1	Kapillaarse veeimavus koefitsendi määramine	57
4.2	Veeauru läbilaskvus	59
4.3	Sorptsioon ja desorptsioon	61
5.	KATSETE TULEMUSTE ARUTELU JA JÄRELDUSED	63
	KOKKUVÕTE	64
	SUMMARY	66
	KASUTATUD KIRJANDUS	68
	LISAD	73
	LISA 1 Veeimavuse katse algandmed, veeimavuse kaaluandmed 10 minuti, 90 minuti ja 24h pärast (g)	73
	Lisa 2 Veeauru läbivuse katsekehade algandmed ja andmed perioodil 10.02 kuni 12.02 (g)	74
	LISA 3 Veeauru läbivuse katsekehade algandmed ja andmed perioodil 13.02 kuni 15.02 (g)	75
	Lisa 4 Veeauru läbivuse katsekehade algandmed ja andmed perioodil 16.02 kuni 18.02 (g)	76
	Lisa 5 Sorptsiooni katsekehade kaal kuivatatult, peale katse algust 30% ja 50% niiskustingimuse juures (g)	78
	Lisa 6 Sorptsiooni katsekehade kaal (g) katsetingimustes 75% ja 95%	79
	Lisa 7 Katsekehade desorptsioon (g)	80

SISSEJUHATUS

Kanepibetoon on looduslik ehitusmaterjal, mis on viimastel aastatel muutunud paljudes Euroopa riikides populaarsemaks [1]. Seda põhjusega, et vähendada kasvuhoonegaaside, sealhulgas CO₂ hulka alla 1990 aasta taseme [2]. Ehitussektor Ühendkuningriigis on vastutav 56,7% CO₂ paiskamisega atmosfääri [2]. Ehitusmaterjalide tootmine on sellest ligi 9% [2]. Kanepibetoonipõhiseid ehitusmaterjale kasutatakse mittekandvate seinte, viimistluskrohvide ja põranda/katuse soojustusmaterjalina [1].

Selles lõputöös keskendutakse kanepibetoonile, mida peetakse ka süsiniknegatiivseks ehitusmaterjaliks. Eesmärgiks on uurida kanepibetooni niiskustehnilisi omadusi. Töö on osa kanepibetooni uuringust, kus eesmärgiks oli maakivimüüri seestpoolt soojustamise võimalusi uurida.

Katseobjekt, milleks on Mooste vallas asuv tall-tõllakuur, on ehitatud ringmüüri piiratud majanduskompleksi ühe hoonena. Selle täpset ehitusaega ei teata, kuid selleks pakutakse 19. sajandit. Arvatakse, et objekt ehitati varem kui kompleksi teised hooned.[3]

Maakivimüüri hoone seespoolne soojustamine võib olla keerukas ja kaasa tuua soovimatuid niiskusprobleeme, mida uuriti Markus Pau magistritöös "Pärandit hoides ja sünteesides: maakivimüüride seespoolne soojustamine kanepibetooniga Mooste mõisa tall-tõllakuuri näitel", kus soojustamisel kasutati kahe erineva fraktsiooniga kanepibetooni ning leiti, et suhteliselt madala sisetemperatuuriga (10-12 °C) laoruumis oli peale ühte aastat (jaanuarikuus) õhuniiskus materjalis kõrge ja hallituse oht suur.[4]

Jane Raametsa [5] poolt teostati uuring, kus katsetati kaheksat kanepibetoonist ja samapalju põhupaneelist katsekeha. Esimese nädala jooksul niiskusel 75% ei tuvastatud hallitust ühelgi katsekehal. 80% RH juures tuvastati hallitus kahel kanepibetooni katsekehal ja neljal põhupaneelist katsekehal. Kolmanda nädala lõpuks (RH=85%) tuvastati hallitus veel kolmel kanepibetoonist katsekehal ning neljal põhupaneelist katsekehal. Neljanda nädala lõpuks (RH=90%) olid hallitusega kaetud ka kõik kolm testkambrisse jäänud kanepibetoonist katsekehad, millest järeldati, et kriitiline niiskus mõlema materjali puhul oli 80%.[5]

Põhupaneelidel identifitseeritud hallitusseened kuulusid perekondadesse *Aspergillus*, *Alternaria*, *Cladosporium* ja *Penicillium*. Kanepibetoonist katsekehadelt

identifitseeritud hallituseened kuulusid perekondadesse *Aspergillus, Cladosporium, Fusarium* ja *Penicillium*. [5]

Kõik uuringud on ette kantudehitusfüüsika konverentsi IBPC2021, mis toimus 25.-27 augustil 2021 Kopenhaagenis ja publitseeritud vastavas kogumikus. [6]

Tihti küsitakse: "Miks kasutada kanepit tavalise põhu, puidukiu vms asemel?" Vastus on väga lihtne: muud lubja ja veega segatud tselluloosmaterjalid tekitavad märja soga, samas kui kanep on sitke ja seob end tugevaks komposiidiks.[7]

Kanepibetooni teatakse ka inglisekeelses teaduskirjanduses kui "*hemp concrete*" või "*hemprete*", mis on otsetõlgitud eesti keelde. Sellest võib tekkida segadus, sest tavaliselt mõeldakse betooni all mineraalsel täiteainel põhinevat segu, millel on piisav survetugevus, et seda kasutada kandvate seinte ehitamiseks. Kanepibetooni puhul see aga ei kehti, seda kasutakse eelkõige kandvate (enamasti puidust) sõrestike täitmiseks, sest sellel puuduvad betoonile sarnased füüsikalised omadused.[4]

Käesoleva magistritöö teema sõnastati koostöös autori ning tema juhendajaga Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžist, kelleks oli dotsent Aime Ruus. Töö katsed ehk praktiline osa viidi läbi Tartu kolledži laboriruumides. Töö eesmärk oli uurida kanepibetooni kui materjali omadusi laboritingimustes.

Katseteks vajalikud katsekehad valmistati Markus Pau poolt, tema (Viljandi Kultuuriakadeemia) magistritöö raames.

Käesolevas magistritöös tutvustatakse viidatud allikate põhjal kanepibetooni ajalugu, omadusi ja erinevaid kasutamise viise.

Kanepibetooniga tehti 3 erinevat katset. Katsed aitavad meil paremini mõista, mis toimub nii kanepibetooni sees kui pinnal, kui seda paigaldada erinevatesse kasutustingimustesse.

Autor soovib tänada Markus Paud, prof. Targo Kalameest, Jane Raametsa, Mattias Põldaru.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Kanepi kasvatamine. Ajalugu

Harilik kanepitaim, *Cannabis sativa*, on üks varasemaid registreeritud kodupõldudel kasvatatud taimi. Kanepitaime kasvatamisest on tõendeid alates Neoliitikumi ehk noorema kiviaja ajastust. Kanepikasvatuse pika ajaloo jooksul on seda kasutatud kanepi seemnete, õlide, vaigu, toidu, kütuse jms valmistamiseks, samuti kasutatud meditsiini ja kosmeetika valdkonnas. Kanepi kiude kasutati vastupidavate riiete, nõõride ja sitkete kangaste (nt purjeriie) valmistamiseks. Kanepi viljaliha kasutati ka paberi tootmiseks.[8]

Arvatakse, et taim on pärit Hiinast. Kanepi kasvatamine levis läbi India järk-järgult lääne poole, Lähis-Idasse, Aafrikasse ja Vahemere maadesse, kus see moodustas olulise osa seda kasvatanud rahva toimetulekust ja kultuurist. Säilinud on kirjutised Egiptuse, Kreeka ja Rooma arhiivides, mis näitavad, kui oluline oli kanepitaim nende tsivilisatsioonide elustiilile, kaubandusele ja laienemisele.[8]

Kanepi kasvatamine Euroopas jätkus läbi modernse ajaloo, tõendeid selle kasutamisest on leitud Suurbritannias ja ka Saksid poolt, kes kaasasid selle ka oma meditsiini. Hilisemad Inglismaa kuningad edendasid kanepi kasvatamist, mitte ainult igapäevaseks kasutamiseks lina ja nõõri näol, aga ka laevastiku arendamiseks. Kanepist valmistati laevadele tugevaid purjeriideid ja taglaseid, mistõttu oli Briti laevastik dominantne antud valdkonnas. Saareriigina oli Inglismaale väga oluline nende laevastik ning seetõttu võttis kuningas Henry VIII vastu seaduse, mis kohustas talunike kasvatama kanepit.[9]

Kanepikasvatuse ja töötlemise pikka ajalugu on tänapäeval Suurbritannias näha läbi säilinud kanepi ja lina tööstusharude arhitektuuri (vt joonis 1) [8].



Joonis 1 The Ropewalk – pikk hoone, kus kanepi- ja linakiud välja venitati ning nõõriks ja kõieks kedrati [10]

Läbi ajaloo on kanepit kasutatud religioossetel tseremooniatel. Nüüdisajal kasutatakse kanepit vaba aja veetmise narkootikumina tänu oma lõõgastavale ja kergelt psühhoaktiivsele toimele. Selline kanepi või marihuaana kasutamine põhjustas 20. saj alguskümnenditel taime kasvatamise ja omamise keelustamise enamikes lääneriikides. Kanepi keeld kehtib ka tänapäeval laialdaselt, välja arvatud mõnes üksikus riigis, näiteks Hispaania ja Portugal, kus väikesed kogused on lubatud.[8]

Kanep on eriti kõrge saagikusega põllukultuur[11]. USA Põllumajandusministeeriumi uuring näitas, et kogu maailma saagikus jäi 2,5–8,7 tonni kuiva põhku aakri ehk (6,25-21,75 t hektari) kohta [12]. Seda võrreldakse soodsalt nisuõlgede saagikusega 1,25–2,5 tonni aakri (3,125-6,25 t hektari) kohta [13]. Arvestades ühest põllukultuurist saadava biomassi kogust, ei anna ükski teine taim nii suurt mahtu kui kanep. Kanepitaime kasvatatakse tavaliselt kas tugevate kiudude või seemnete saamiseks (harva mõlema jaoks samal ajal) [11]. Kummagi kanepitootmise tüübi puhul ei ole kanepiluu esmatähtis ja seda peetakse kõrvalsaaduseks [11]. Kanepiluu on teatav turuväärtus loomade allapanuna ja seda saab

pressida kütusegraanuliteks [11]. Suuremahuline kanepitootmine tekitaks isolatsiooniturule palju kanepiluud soojustuseks, samal ajal kui tootjad pakuvad taime muid saadusi esmastele turgudele kiudainete või seemnetena.[11]

1.2. Kanepi taasavastamine

Kanepi kui narkootikumi keelustamise kahetsusväärne kõrvalmõju on olnud igasuguse kanepikasvatamise keelustamine ja sellest tulenev kättesaamatus lääne ühiskondadele. 1928. aastal keelustati kanepitaimede kasvatamine Ühendkuningriigis. Alates 1930. aastast on nähtud palju vaeva, et arendada sorti, mis sisaldab vähe tetrahüdrokannabiooli ehk THC-d (peamine psühhoaktiivne komponent kanepitaimes). Selle ettevõtmise edu tähendab, et juba paar aastakümnet on vähese THC sisaldusega või üldse mitte sisaldav tööstuslik kanepi taim laialdaselt kättesaadav.[8]

Termin "tööstuskanep" viitab *Cannabis sativa* sordile, mis on aretatud sisaldama alla 1 protsendi THC-d, samas kui narkootikumiks kasvatamisel oleks THC 3-15 protsenti või sõltuvalt kasvatusmeetodist isegi rohkem. Alates 1990. aastast on alla 0,3 protsendi THC-d sisaldavad sordid legaliseeritud Suurbritannias, Saksamaal, Austrias ja Šveitsis. Kanada ja Austraalia legaliseerisid kanepitootmise 1998. aastal. Teistes riikides, nagu Hiina, Venemaa ja Ungari pole kanepitootmine olnud kunagi keelatud.[14]

Kuna tööstuskanep on väljanägemiselt identne tavakanepiga on Suurbritannias selle kasvatamiseks vaja valitsuselt spetsiaalset luba. Alates 1990. aastate algusest on üha rohkem inimesi ja organisatsioone kogu läänemaailmas hakanud kanepitaimet uuesti omaks võtma, uurides seda kui looduslikku ja jätkusuutlikku materjali. Kanepil kui materjalil on suur kaubanduslik, tööstuslik, põllumajanduslik ja keskkondlik potentsiaal. Tabelis 1 on toodud mõningaid näiteid selle taime laialdasest kasutamisest.[8]

Tabel 1 Kanepi kaubanduslik kasutamine tänapäeval [8]

Taimeosa		Kasutusala
terve taim		kütus kateldele biomassi pürolüüsi lähteaine
vars	Luu	paber, papp, pakendi täiteaine (pehmendus) ehitus (kanepiplokk või betoon, sise ja välisviimistlus) loomade aseme materjal, multš, seenekompost
	kiud(koores)	kvaliteetsed vastupidavad riided, kotid, kingad, nõör, köis, võrk presendid, vaibad, geotekstiil, kiududega tugevdatud plastmass ehitus (soojustus, välis ja siseviimistlus), pahteldamine piduri ja sidurikate
lehed		loomade aseme materjal linnutoit, seemed Seenekompost
seemned	terved/ jahvatatud	toit, sealhulgas proteiinirohke jahu Linnutoit loomatoit (pressitud seemnekook)
	eraldatud õli	toit (salatiõli, margariin ja toidulisandid) õlivärvid, lahustid, lakid, mootorsae õlid tindid, kitt, biodiesel
rakuvedelik		abrasiivsed vedelikud

Kuigi kanepitaim ei suuda lahendada kõiki läänemaailma probleeme, on selle uuesti kasutusele võtmine hindamatu tulevikus, kus on oluline võõrutada maailma sõltuvust fossiilkütustest.[8]

Nagu ka teised taimed, neelab kanep oma kasvufaasis fotosünteesi teel atmosfäärist CO₂, püüdes selle luu sisse ka terve ehitise eluea vältel. 1 hektar kanepit neelab oma kasvu ajal 4 korda rohkem CO₂ kui samal alal puit.[15]

Tabel 2 CO₂ bilanss kanepibetooni puhul [15]

1 m ³ kanepibetooni sein	
110 kg kanepiluud	202 kg CO ₂ Neeldub
220 kg lubi sideainet	94 kg CO ₂ Eraldub
Kokkuvõtte väikese maja kohta	108 kg CO ₂ Neeldub

Tabelis 2 ei ole arvestatud lubisideaine karboniseerumise käigus neeldunud CO₂. Karboniseerumist uuriti röntgenpulberdifraktsiooniga ja leiti, et 240 päeva pärast oli

karboniseerunud ainult 25 cm pikkuse ploki välimine (0-2 cm) kiht, mis on umbes 50% sideaine massist. CO₂ kinnipüüdmine oli hinnanguliselt 7g 1kg sideaine kohta, kui sideaine sisaldas ainult dolomiitlupja. Kui sideaine sisaldas ka tsementi, siis oli 12 g 1kg sideaine kohta. Lagerblad tutvustas valemit CO₂ omastamise arvutamiseks terve eluea kohta. [16]

1.3. Kanepibetoonist üldiselt

Kanepibetoon on ainulaadne ehitusmaterjal, mis koosneb biokiust (kanepikiust või kanepiluust) ja mineraalsest sideainest (lubi). Need koostisained segatakse kokku veega ja niisutatud sideaine katab kõik kanepitükkide osakesed. Lubjast sideaine ja vee vahel toimub keemiline reaktsioon, mille tulemusena sideaine tardub ja kivineb ning osakesed liimitakse kokku. Üldiselt võiks seda nimetada "seotud tselluloosist isolatsiooniks".[11]

Kui sideaine on tardunud ja hiljem kivinenud ning kogu lisavesi on segust välja kuivanud, on tulemuseks kanepibetoon. Erinevalt paljudest ehituskomposiitidest (nagu betoon, mört ja krohv) ei ole kanepibetooni sideaine mõeldud täitma kõiki kanepiosakeste vahelisi tühimikke, vaid ainult katma ning kleepima kanepiluu osakesi omavahel ja ning tekitama suurte pooridega (tühimikud) materjali. Kanepibetoonisegul on lõppsegus tavaliselt suur tühimiku protsent.[11]

Hempcrete'il on terve rida häid soojus-, konstruktsiooni- ja niiskust taluvaid omadusi, mis muudavad hoone suurepäraseks isolatsioonimaterjaliks. Olenevalt kirjeldatud koostisest saab kanepibetooni kasutada katuse-, seina-, põranda või vahelisolatsioonina. [11]

Arutelu kanepibetoonist muudab keeruliseks asjaolu, et biokomposiidi kõigil koostisosal võib olla mitmesuguseid tüüpe ja omadusi ning neid saab segule lisada erinevates vahekordades.[11]

Kanepibetooni puhul tekib tihti küsimus, miks kanepi asemel ei kasutata puiduhaket, hõbemuru, džuuti või muud taimset kiudu. Sellised küsimused viitavad tavaliselt sellele, et küsijal on kanepi suhtes eelarvamus, kuna see on seotud kanepi endaga. Muude alternatiividega tehtud katsed pole olnud kuigi edukad, kuna taimsetel kiududel puudub kanepi tugevus ja niiskustaluvus. Mõned tsemendi ja puiduhakke tooted on küll olemas, kuid need ei anna kanepi ja lubja komposiidi isoleerivaid omadusi.[17]

Kanepibetooni valmistamise koostisosad ei ole levinud ehitusmaterjalid ja seetõttu ei tule neile kasuks teiste isolatsioonivõimaluste või nende toorainete hindade langus. Isegi enne laialdast turul saadavust ja sellega kaasnevat kulude vähenemist, on kanepibetooni hind võrreldav muude soojustusvõimalustega, tuues nende võimaluste ees eeliseid muul viisil.[11]

Ehitustööstuses ei näe väga palju "uusi" materjale. Elu- ja ärihoonete soojustamiseks kasutatud materjalid on aastakümneid jäänud samaks ning enamikul esineb keskkonnanja/või tervisemõju. Kui inimesed hakkavad hooned paremini soojustama, et vähendada nende energiavajadust, kasvab selleks vajaliku soojustusmaterjali maht järsult. Ökoloogiliselt ja majanduslikult on mõttekas täita see maht materjalidega, mis on igal aastal taastuvad, vähese keskkonnamõjuga ja ideaalis pärinevad jäätmevoogudest või muude protsesside kõrvalsaadustest. Kanepibetoon vastab kõigile neile olulistele kriteeriumidele ja on paljuski võrreldav levinumate soojustusmaterjalidega isolatsioonimaterjalidega.[11]

1.4. Kanepibetooni Ajalugu

Tsivilisatsioonid on kanepit aastatuhandeid kasvanud ja laiaulatuslikult kasutanud, seetõttu on tõenäoline, et kanepit on varasemalt ka ehitusmaterjalina hoonetes kasutatud. Tõendeid on sellest, et kanepiga ehitamist ei alustatud 20. sajandil ja et korralikult hooldatud kanepihooned võivad kesta sajandeid. Jaapani Nagano prefektuuris Miasa külas asub ajalooline kanepimaja, mis on ehitatud 1698. aastal ja on tänapäevani heas korras. Maja on lisatud ka Jaapani rahvuspärandi nimistusse.[8]



Joonis 2 Nakamura perekonna elukoht[18]

Hempcrete töötati välja Prantsusmaal 1980. aastate keskel. Keskaegsetese puitkarkasshoonetele oli vaja paremat isolatsioonimaterjali, mis asendaks varasemalt kasutatavaid kõrsi ja savivõõpa, seetõttu hakati katsetama erinevate materjalide sobivust. Euroopas kasvas sõjajärgsel ajal teadlikkus ulatuslikest kahjustustest, mida puitkarkasshoonetele põhjustati remontides tavalise portlandtsemendiga. Portlandtsemendi kasutamine auru läbilaskvate maa- ja lubimörtide ning looduslike tsementide asendamiseks ajaloolistes hoonetes takistas hoone tarindeid hingamast, mis tõi omakorda kaasa niiskuse

kinnihoidmise seinas ja see kahjustas puitraame. Seetõttu otsiti asendajat, mis mitte ainult säilitaks hoone konstruktsiooni auru läbilaskvat olemust, vaid pakuks ka soojustust.[8]

Ehitajad hakkasid kasutama mitmesuguseid ajaloolisi ehitusmeetodeid (päikese kuivatatud tellised, rammitud pinnas jne) ja uuendama neid "kaasaegsete" komponentide ja tehnika abil (mehaaniliselt stabiliseeritud pinnas ehk MSE, putsolaani sideainete kasutamine jne).[19]

Charles Rasetti kavandas 1985. aasta paiku kanepiõlgede (või kanepiluu) ühendamist mineraalse sideainega, et luua tõlviku moodne variant. Esines ka teine käsitöönduslik lähenemine kanepibetonile, mille algatajaks on Yves Kühn, kes töötas välja põllumajandustoomaterjalist ehitamise protseduuri (Canosmose'i protseduur), et ehitada hooneid kasutades kanepit kõigis maja elementides.[19]

Erinevate ehituslike katsete tulemusena selgus, et kanepiluu ja mineraalse maatriksi kombineerimisel valmistatud kanepibetooni saab kasutada seinte ehitamiseks, mille soojustehnilised omadused on head. Konstruktsioonitasandil on aga kasulik siduda kanepibetoonitäidis karkassiga, mis on võimeline vastu võtma vertikaalsuunas koormust ja hoone toetamist. Kõige sagedamini valitakse puitkonstruktsioon. Praegu uuritakse mitmeid raudbetoonkonstruktsioonide (betoonseinad või talad-sambad) kasutamisel põhinevaid arendusi.[19]

Tänapäevani kasutatakse kanepibetooni rakendamiseks traditsioonilisi tehnikaid (raketisse valamine, nagu seda tehakse betooni või traditsioonilise rammitud pinnasega) või tehnikaid, mis põhinevad uuenduslike ehitusvõtete kasutusele võtmisel (vibro tihendamine ehitusploki valmistamiseks, kohapeal seina pihustamine, jne). Olenevalt kanepibetooni kasutusviisist – seinas (vertikaalne täidis), katusel või põrandal – pakuvad selle ala professionaalid erinevat tüüpi kanepibetooni.[19] Töö kirjutamise ajal sellist teenust pakkuvaid professionaale Eestis ei leidu.

Selgus, et tugevast tselluloosist kanepitaime vars on väga vastupidav (võimeline ilma lagunemata tsükliliselt niiskuma-kuivama peaaegu lõputult) ja seetõttu on ideaalne täitematerjal lubimörtidele. Tänu kanepivarre rakustruktuurile ja seina sees olevate üksikute kanepitükkide loodud maatriksstruktuurile koos lubjasideaine omadustega on kanepibetoonseinale hea võime niiskust imada ja eraldada. Kuna kanepiseina sisse jääb valamisel palju õhupilusid (nii kanepis endas kui ka valatud materjalis oleva kanepi maatriksi sees), on see üllatavalt hea isolatsioonimaterjal ja lubja sideaine lisatav tihedus annab valmis materjalile hea koguse termilist massi. Peaaegu kohe, kui see tehnika ajalooliste hoonete remondiks välja töötati, hakati katsetama selle kasutamist jätkusuutlikes uusehitises ja leidsid, et see sobib ka niimoodi rakendamiseks.[8]

Kanepibetooni kasutamine on järk-järgult levinud, kõigepealt Euroopas ja siis kogu maailmas, ning inimeste arv, kes seda kasutavad, nii uusehitistes kui ka vanemate hoonete remondis, kasvab jätkuvalt.[8]

1.4.1 Kanepibetooni standardimine. Prantsusmaa

Prantsusmaa kanepiehitussektoris tegutsejad (ühendus *Construire en Chanvre*) on alates 1998. aastast töötanud selle nimel, et edendada kanepi kasutamist ehituses teadlikkuse tõstmise, koolituste, teadus- ja arendustegevuse ning standardimise kaudu. Arengu jätkumise tagamiseks ilmnes peagi vajadus registreerida kanepipõhised ehitustooted ehitussektorit reguleerivates standardites.[19]

Pidades silmas kasvavat nõudlust renoveerimise, restaureerimise ja kanepimaterjali sisaldavate uute ehitiste järele, oli vaja luua ehitusettevõtetele seadusandlus, mis aitaks inimesi kindlustusjuhtumite osas ja annaks neile sellega garantii. Seetõttu otsustasid kanepiehituse spetsialistid 2004. aastal koostada kutseeeskirjad kanepipõhiste betoonide ja mörtide kasutamiseks. Algselt ainult teostusele pühendatud dokument sai peagi laiaulatuslikuks kvaliteediraamistikuks, mis käsitleb lisaks realiseerimisele ka tooraine kvaliteeti, projekteerimist ja ettevõtete väljaõpet.[19]

Professionaalsete reeglite (*Règles Professionnelles*) varajane versioon loodi osana projektist, mida juhtisid Prantsusmaa peamised põllumajandus- ja ehitusvaldkonnas tegutsejad (*Ministère de l'Agriculture, Ministère de l'Ecologie, Fédération Nationale des producteurs de chanvre, Fédération Française du Bâtiment et Construire en Chanvre*). Ekspertide komisjon, kuhu kuulusid ehitusspetsialistid (käsitöölised, arhitektid, õppebürood), teadlased (ENTPE, CEBTP), tööstusettevõtjad ja järelevalvebüroo (APAVE), vastutasid nelja võrdlusdokumendi koostamise eest, et kirjeldada kanepipõhiste betoonide ja mörtide õigeid kasutusviise neljas erinevas rakenduses:

- seinte ehitamine kanepibetoonist;
- krohvimine;
- kanepibetooniga soojustatud põrandad;
- kanepibetooniga soojustatud katused.[19]

Need reeglid, mis esitati *Agence Qualité Construction*'i C2P-le (*Commission Prevention Produits – Commission for Product Prevention*), võeti aastatel 2007–2009 vastu eksperimentaalsete kutseeeskirjadena.[19]

2010. aastal asutas ühingu *Construire en Chanvre* läbivaatamiskomisjoni, et koostada kutseeeskirjade teine versioon, et see versioon kantaks lõplikult C2P rohelist nimekirja. 2011. aasta lõpus C2P-le esitatud kanepipõhise betooni ja mördi ehituses kasutamise kutseeeskirjade versioon 2 võeti vastu 2012. aasta jaanuaris. Need eeskirjad on tänapäeval viitedokumendiks, millele tugineb iga ettevõtte, kes soovib kanepipõhiseid betoone või mörte kasutada.[19]

1.4.2 Suurbritannia ja kanepibetooni levik

Suurbritannias on praeguseks kanepibetooniga ehitatud väga palju nii äri- kui ka eluhooneid. Märkimisväärne kanepibetooni ärikasutuse kasv oli seotud "Renewable House" programmiga, mida rahastas Ühendkuningriigi valitsus ajavahemikul 2007–2010. Selle kava raames said paljud arendajad riiklikust rahastamisest erineva rahalise summa, et kasutada looduslikke ja taastuvaid materjale sotsiaalmajade ehitamiseks, mille tulemuseks oli umbes 200 kodu ehitamine. Kaheteistkümnest rahastatud projektist kasutas soojustusmaterjalina kanepibetooni seitse. Programmil olid kindlasti oma väljakutsed ja paljud elluviidud projektid kannatasid mingil määral selle tõttu, et töövõtjatele anti kasutamiseks uusi materjale. Üldised tulemused olid siiski julgustavad ja ei tekkinud probleeme, mis viitaksid sellele, et kanepibetoon koos muude looduslike materjalidega ei võiks olla osa arenevas ehitustööstuses.[8]



Joonis 3 Kanepibetoonist elamu Suurbritannias (Pole seotud Renewable House programmiga) [20]

1.5 Kanepibetooni kui materjali omadused

1.5.1 Veeaurujuhtivus ja vastupidavus

Kanepibetoon on ainulaadne taimsetest kiududest soojustusmaterjalide (tselluloos, puidukiud, põhupakk, põhk/savi, puuvill) hulgas, kuna see suudab säilitada kuju ja struktuuri niisketes tingimustes. Nagu kõik taimse kiudmaterjaliga isolatsioonmaterjalid, suudab kanepiluu oma poorse struktuuri tõttu säilitada palju niiskust, niiskus võetakse väliskeskkonnast taimekiudude suurele sisepinnale ja imendub rakustruktuuri. Selline niiskuse salvestusmaht on väga kasulik, võimaldades materjalil niiskust omastada ja vabastada, kui asjaolud seda võimaldavad.[11]

Prantsusmaal läbiviidud uuring näitas, et 1 kuupmeeter kanepibetooni suudab siduda kuni 596 kilogrammi veeauru, mis tagab säilitusmahu püsiva suhtelise õhuniiskuse 93% juures, ilma et see ületaks materjali võimet niiskust vastu võtta [21].

Kanepibetooni eelis teiste taimsete kiudmaterjalide ja tavapärase isolatsioonitüüpide ees peitub lubja kui sideaine omadustes. Kustutatud lubjal on kõrge pH ja see on oma olemuselt antimikroobne ja seenevastane. Lubjasegu loob iga kanepitüki ümber pinna, mis takistab hallituse teket isegi siis, kui niiskuse ja temperatuuri tingimused võivad põhjustada hallituse tekkimist muudel isolatsioonimaterjalidel. See vastupidavus niiskusele või isegi veele muudab kanepibetooni isolatsioonimaterjalide hulgas ainulaadseks ja soovitavaks valikuks nii külmas kui ka kuumas kliimas ja kõikjal, kus niiskustase on kõrge.[11]

1.5.2 Head struktuursed omadused

Kanepibetooni tihedus võimaldab sellel täita hoones väikest struktuurilist rolli – erinevalt vatist, lahtistest täidistest ja pihustatud isolatsioonimaterjalidest. Kanepibetoonist isolatsioonil ei ole võimet konstruktiivselt täielikult katusekoormust taluda, kuid see valatakse ümber tavapärase seinaraami või topeltnaastude raami, mis võib aidata vältida naastude paindumist või paindumist koormuse all, suurendades seeläbi koormust, mida iga karkassi liige võib kanda.[11]

Kanadas Queeni ülikoolis tehtud katsed näitasid, et 5×15 cm puitpost, mille vahele on valatud 313 kg/m³ kanepibetooni, suudab taluda kolm kuni neli korda suuremat survekoormust kui standardne puitpost, kuna kanepibetoon vähendab paindumist nõrgema telje suunas.[22] Kanepibetoonist isolatsiooni jäikus ja selle tekstureeritud pind seina

esiküljel on suurepärane alus krohviviimistluse jaoks, ilma et oleks vaja kasutada võrku või muid sideaineid[11].

Lisaks soojusfüüsikalistele kriteeriumidele on olemas mehaanilised koormuspiirangud, mida ei tohiks ületada, et vältida konstruktiivseid probleeme. Minimaalne survetugevus ja jäikus tabelis 3 on välja pakutud lähtuvalt materjali kasutusotstarbest.[22]

Tabel 3 Elastsusmooduli ja survetugevuse miinimumväärtused [19]

	ELASTSUSMOODUL (MPa)	SURVETUGEVUS
põrand	>15 MPa	>0,3 MPa
seinad	>15 MPa	>0,2 MPa
vahelagi/katus	>3 MPa	>0,05 MPa
krohv	>20 MPa	

1.5.3 Taimemürkideta kasvatatud/loodusesõbralik

Kanepibetoon on loodusesõbralik materjal [11]. Põllumajanduslikus tootmises kasutatakse kanepi puhul palju vähem pestitsiide ja herbitsiide kui teiste teravilja- või kiukultuuride puhul, tekitades põldudel toksiinide kasutamise tõttu palju vähem keskkonnakahju [12]. Põllukultuur nõuab aga väetist, millel võib olla negatiivne mõju ökosüsteemile [11]. Saagikoristus ja töötlemine toimub ilma soojust ja kemikaale kasutamata [11].

Põhiliseks keskkonnamõjude allikaks toodi välja tooraine tootmisfaas, kuid toorainete transport ja sideaine segu koostis võib oluliselt tulemusi mõjutada. Sellegipoolest on üldine heitebilanss väga soodne: tänu biogeensele CO₂ omastamisele kanepi kasvu ajal ja CO₂ omastamisele karboniseerumise teel.[1]

Kui kanepibetoon on seinas on täielikult kõvenenud ja kuivanud, siis ei eralda see sisekeskkonda gaase ega eralda toksiine. Lubi on antimikroobne ja seenevastane ning üldiselt arvatakse, et materjal ei avalda sisekeskkonnale halba mõju. Materjali suurepäraseid niiskustaluvusvõimed võivad vähendada hoone liigniiske või liigkuivuse, parandades sisekliimat.[11]

1.5.4 Materjali soojusjuhtivuslikud omadused

Kanepibetoon on soojustusmaterjal ja seetõttu on selle soojusnäitajad olulised. Üks peamisi raskusi kanepibetooni kasutuselevõtul ehitustööstuses on materjali soojustehniliste väärtuste kvantifitseerimise osas valitsev ebamäärasus. Põhjalik kirjanduse ülevaade toob välja 19 kanepibetooni uuringut, mis viidi läbi teadusasutustes üle maailma. Nende katsetega leitud soojustustakistuste väärtused on väga erinevad, alates R-1,25 tolli kohta kuni R-2,3 tolli kohta madala (200 kg/m³) kuni keskmise (400 kg/m³) tihedusega seinaisolatsioonisegude puhul. Isegi sama tihedusega segud erinevad katsetulemustes. Selleks, et täita miinimumkoodinõuet R-24, on võimalik et seinad ei peagi olema nii sügavad. Näiteks 19 tolli(488mm) sügavuse seinaga asemel võib ehitada 10,5 tollise(266mm) seinaga, kuna ka sellega on nõuded täidetud.[11]

R - väärtus (soojustakistus) näitab, kui hästi isolatsioonimaterjal takistab soojusvoogu. Soojustakituse põhiühik kirjeldatud uuringus oli ft²*°F*h/BTU [23]. Ümberteisendatult on 1 ft²*°F*h/BTU = 0,176 m²K/W [24].

Tabel 3 kanepibetooni soojus väärtused [11]

Kanepibetooni tihedus	R-väärtus tolli kohta (ft ² *°F*h/BTU)	Soojuserijuhtivus W/(m.K)
Kergsegu:150-250kg/m ³	R-1.8 kuni R-2.4	0.06 kuni 0.08
Keskmise tihedusega segu: 250-350 kg/m ³	R-1.44 kuni R-1.19	0.08 kuni 0.1 W/(m.K)
Raske segu 350-500 kg/m ³	R-1.03 kuni R-1.44	0.1 kuni 0.14 W/(m.K)

Mitmed kohapealsed testid näidanud, et kanepibetoonseinte tegelik soojustõhusus on tunduvalt parem, kui R-väärtused näitavad. Kanepibetooni mõned omadused on soojustusmaterjalide hulgas ainulaadsed. Nagu üks väga põhjalik kanepibetooni hügrotermiliste omaduste test ütleb: "Kanepilubja suhteliselt madal soojusjuhtivus koos faasinihke, faasimuutuste efektide, kõrge sisemise soojusmugavuse, madala algse energiaülekanne kiiruse, passiivse niiskuse reguleerimise ja väiksema energiavajadusega ventilatsioonile, aitavad kaasa energiatarbimise vähendamisele".[2]

1.5.5 Tuleohutus

Kanepibetooni tulepüsivuse hindamise kohta võib leida standardset katsemetoodikat järgimata läbi viidud katseid, kus leeklambi leek on suunatud kanepibetooninäidistele. Materjalidest nähtub, et iga kanepitüki ümber olev lubisideaine kiht lisab mineraalse katte taimsele materjalile, andes kõrge leegikindluse. Väärrib märkimist, et kanepibetoonis ohtlike keemiliste ainete puudumine tähendab, et väikeses koguses tekkivas suitsus ei ole ülitoksilisi ühendeid nagu seda on naftakeemilistes seinte soojustusmaterjalides põlemisel.[11]

2.1 Kanepibetooni koostis

Sarnaselt traditsioonilisele tsementsideainega betoonile käsitletakse ka kanepibetoonil puhul kahte faasi (vedel - betoonisegu), mida iseloomustab piisav voolavus, mis tagab lihtsa paigaldamise (valamine või pihustamine), ja kivinenud olek, mis on tingitud kasutatava mineraalse sideaine võimalikust kõvenemisest ja kuivamisest.[19]

Kanepibetooni platsil tsemendisegistis segades on eelistatav moodustada sideaine ja kogu veega pasta ning seejärel järk-järgult lisada kanepiluu. Üldiselt märgitakse, et liiga pikk segamine võib põhjustada kanepiklompide moodustumist, mis on iseloomulik mittesegunemisele (nähtus, mis on tavalisem kiudkanepi puhul) või liiga kõrge õhusisalduse korral. Seejärel omandab kanepibetoon vahutamise mõjul märkimisväärse voolavuse. Siiski võivad sellised segud vormimisel oma kaalu all väga märgatavalt vajuda.[19]

Seega saadakse kanepibetoon mineraalse sideaine, kanepiluu ja vee segamisel. Mineraalseks sideaineks võib olla kustutamata lubi või tavalisemalt kombineeritud sideaine, mis ühendab hüdrauilisi ühendeid (hüdrauilised lubjad, tsemendid jne) ja putsolaanühendeid (potsolaanid, metakaoliin) lubjaga.[19]

Kanepiluu

Kanepiluu on kanepitaime puitunud tuum [11]. Tavaliselt hangitakse seda kanepikiu tootjatelt pärast seda, kui väärtuslik kanepikiud on kanepivarre välisküljelt eemaldatud, jättes kanepiluu kõrvalsaaduseks [11]. Kanepibetooni komposiidis on järgmised võimalikud variatsioonid: kanepiluu suurus ja liigitus ning maht ja pikkus [11]. Kanepiluu täidab lihtsat täitematerjali rolli, st "inertset" komponenti [19]. Kuid selle võime vett imada ja kiirus, millega see seda teeb, mõjutab segu voolavust ja selle voolavuse stabiilsust [19].

Mõned kasutajad arvavad, et ökoloogilisem on kasutada kogu kanepitaime ilma kiudu eemaldamata. See on aga ekslik lähenemine, kuna kiud on palju väärtuslikum tuhandel muul otstarbel nagu tekstiil, paber, köis ja isolatsioonitekid. Samuti hoiavad kiud palju rohkem vett kui kanepiluu, mis tekitab lõppkomposiidis vähem õhutaskuid, vähendades seeläbi isolatsiooni väärtust.[7]

Lubisideaine

Lubi on olnud ehituses oluline sideaine aastatuhandeid, peamiselt mördi ja krohvi retseptides. Lupja on erinevat tüüpi ja sideaine tegemisel võib lisada mitmesuguseid lisandeid. Need lisandid mõjutavad kanepibetoonisegu, selle tardumisaega, tugevust ja vastupidavust. Erinevate tootjate poolt on spetsiaalselt kanepibetoonis kasutamiseks

valmistatud lubi sideainet ja on olemas retseptid lubi sideaine valmistamiseks eraldi koostisosadest.[11]

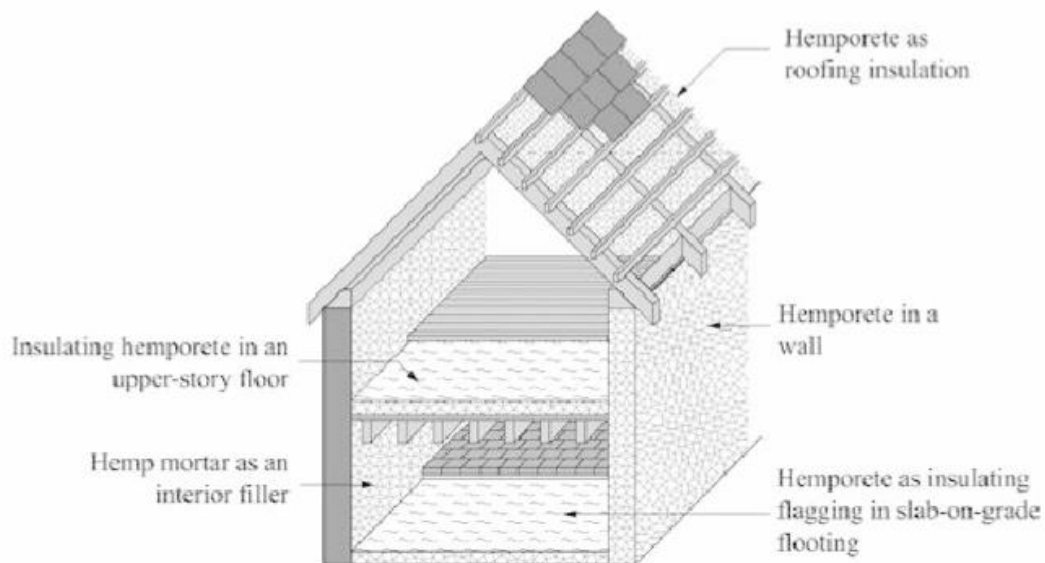
Sideaine aluseks võib olla kustutatud lubi, looduslik kustutamata lubi või nende kahe segu. Mõnel juhul lisatakse kivistumisprotsessi kiirendamiseks ja mehaanilise vastupidavuse parandamiseks väike osa tsementi ja/või putsolaani sideainet. Kustutamata lubi on valmistatud puhtast lubjakivist ja tardub karboniseerimisprotsessi käigus CO₂ neeldumise kaudu. Kustutatud lubi on valmistatud savilisanditega lubjakivist (silikaadid ja aluminaadid) ja kivistub reaktsioonil veega. Need protsessid muudavad segud lõpptoodeteks, mis on tahked, kuid kerged, vastupidavad ja heade isolatsiooniomadustega.[1]

Kuiv, pulbriline lubisideaine võib segamisel tekitada palju tolmu ja on väga söövitav. Kõik, kes käitlevad kuivi koostisosi ja töötavad segumasina ümber, peavad kandma piisavat hingamiskaitset. Märjana on lubja sideaine nahka kergelt söövitav, seega on vajalikud kummikindad ja täielikult kaetud nahk.[11]

Vesi

Kanepibetoonisegule lisatud vee maht mõjutab tulemusi oluliselt, isegi kui luu ja lubja kogust kontrollitakse [11]. Kanepiluu on äärmiselt poorne, võimeline imama vett koguses, mis on palju suurem kui hea kanepibetoonisegu jaoks vajalik [11]. Liiga palju vett segus võib põhjustada suuremat tihedust, probleeme lubi sideaine tardumisega ja kanepibetooni liiga pikka kuivamisega [11]. Suurema võimsusega betoonisegisti kasutamine võimaldab kuivas olekus kanepi- ja sideainet segada ning seejärel segu piserdades märjaks teha [11]. Seda tüüpi segamisega saadakse ühtlase segu või betoontooded, mis sisaldavad suhteliselt vähe vett [19]. Selliste betoonide vormimine on sageli seotud tihendamisega, et tagada materjali hea sidusus [19]. Veeimavus kanepi shivi poolt võib kiiresti mõjutada nende segude reoloogilisi omadusi [19]. Seetõttu on abiks lühike töötlemisaeg, mida on lihtsam tagada monteerimistöökohas [19].

2.2 Kanepibetooni kasutamine seinas,laes, jne



Joonis 4 kanepibetooni kasutamine seinas, laes, põrandates [19]

2.2.1 Seintes

Kanepibetooni tihedusega vahemikus 250–350 kg/(m³) saab kasutada välisseinte soojustamiseks enamiku madala kõrgusega (kuni kolmekorruseliste) ehitustööde puhul [11]. Soojusjuhtivus on ligikaudu 0,1 W/(m.K) (0% suhtelise õhuniiskuse juures) [19]. Seinte jaoks on vaja konstruktsioonikomponente – enamasti puitkarkassi, mis vastab tugevuse nõuetele [11]. Kanepibetoonist soojustus on seinakonstruktsiooni täidis mis on moodustatud konstruktsioonikarkassi välis-/siseküljel või selle vahel (joonis 5) [11]. Mõnikord ehitatakse seinad osalise raketisega, sel juhul saab seinte täitmiseks kasutada vähem tihedat kanepibetooni nagu pannakse katustele [19].

Insener saab kasutada mitmesuguste tugevuskatsete andmeid, et määrata kindlaks, kui palju ja mismoodi kanepibetooni kasutamine konstruktsioonraami tugevdab. Karkassi mõõtmeid võib olla võimalik vähendada ja/või karkassi vahekaugust võib olla võimalik saematerjali säästmiseks suurendada. Seda, kas kanepibetoon sobib seinaisolatsiooniks suuremate projektide ja/või muude ehitiste jaoks, saab otsustada vastava projekteerimiskogemuse ja kompetentsiga spetsialistid. Paneele on kasutatud ka suuremates, kuni kuuekorruselistes projektides kardinaseinana.[11]



Joonis 5 Kanepibetooni paigaldamine seinä [11]

Seina ehitamine Raketise abil

Sarnaselt traditsioonilise betooni valamise meetodile saab ka kanepibetooni puhul kasutada eelvalmistatud raketisi ehk teisisõnu vorme, mis määravad ära valatava objekti kuju. Vormpaneelid või vormid võivad olla 16 mm paksused vineerplaadid. Need on piisavalt jäigad, et värske kanepibetoon valamisel rõhu mõjul liiga tugevasti ei deformeeruks. Neid paneele saab paigal hoida lihtsalt kinnitades need hoone kandekonstruktsiooni (puitkarkassi) külge: piisab neljast kruvist 1 m² kohta, et plaadid püsiksid oma kohal. 60 cm kõrgused vormipaneelid pannakse paika siis, kui kanepibetoon on neisse valamiseks valmis.[19]



Joonis 6 Markus Pau poolt rajatud kanepibetooni näidissein [25]

Täidis tehakse hoolikalt ühtlaste kihtidena, mille paksus on umbes kakskümmend sentimeetrit. Peale igat kihti tehakse kerge kokkusurumine raketise servade ja puitsõrestiku juurest. See kokkusurumine on vajalik pinna hea homogeensuse saavutamiseks ja segu nõuetekohaseks tihendamiseks. Materjali liigne tihendamine aeglustab pinna sees kuivamist ja kõvenemist. Raketis on soovitatav eemaldada lühikese aja jooksul pärast valamist – ideaaljuhul ühe päeva jooksul –, et hõlbustada karboniseerumise algust.[19]

Ehitusvuugi vältimiseks tuleb niipea, kui sideaine tardumine on piisavalt edenenud, vuugipinnad üle määrada sideaine ja vee seguga. Mõistlik on eelistada horisontaalseid liitekohti ja kui valamine lõpetatakse vertikaalsel joonel, on kasulik materjali ümber kujundada, et suurendada kontaktpinda kaldlõike võrra.[19]

Kasti täitmine võib toimuda käsitsi, aga ka valades kanepibetooni toru või pihustusotsiku abil. Need viimased tehnikad on pidevad ja aitavad tagada toote hea homogeensuse. Tampimise operatsioon on siiski vajalik.[19]

2.2.2 Põrandad

Plaadi alune isolatsioon

Harvemini esinev kui seintes ja katusel kasutades, saab põrandaplaatide all isolatsiooniks kasutada kanepibetooni tihedusega 375–500 kg/m³[8]. Soojuserijuhtivus ligikaudu 0,12 W/(m.K) (0% suhtelise niiskuse juures) [11].

Käsitsi või mehhaniseeritud protsessi puhul on kanepibetooni paigaldamise protseduur põrandakatte jaoks sama. Materjal valatakse vastavalt paigaldusreeglitele selleks ettevalmistatud pindadele. Laotamine tasandatakse reha abil, surutakse mõõdukalt kokku kogu põranda pinnale ja tasandatakse. Mootoriga ujuk tagab tasase, korralikult tihendatud pinna. Kui kanepibetoon on paksem kui 15 cm, on soovitatav laotada see kahe eraldi kihina, mis asetatakse kahepäevase vahega, et hõlbustada materjali kõvenemist kogu selle paksuse ulatuses.[11]



Joonis 7 Kanepibetoon põrandas[20]

Kandevõime muutub vahemikus 1,1–2,0 MPa, mis sobib paljude põrandaplaatide kandmiseks. Plaadi isolatsiooni suurem tihedus alandab soojuslikku väärtust vahemikus R-1 kuni 1,5 tolli kohta. Põrandaalune isolatsioon nõuab tavaliselt madalamaid R-väärtusi kui sein ja katuse isolatsioon, kuna maa ja hoone temperatuuride erinevus on soojem ja

ühtlasem, võrreldes hoone ja välisõhu temperatuuridega. Põranda all kasutatav kanepibetoon tuleb asetada stabiilsele, hästi kuivendatud alusele ning pinnase ja isolatsiooni vahele tuleb paigaldada aurutõke.[11]

2.2.3 KATUS

Katuseisolatsioonimaterjalina kasutatav kanepibetoon on väga väikese sideainesisaldusega (tavaliselt 100–120 kg sideainet m³ kohta) ja selle näivtihedus on umbes 200–250 kg/m³ ning soojuserijuhtivus umbes 0,06 W/(mK) (0% suhtelise niiskuse juures) [19]. Materjali saab kasutada külma pööningu puhul lahtise isolatsioonina vahelae peal või kergelt tampida võlv-, viilkatuse sõlmedesse [11]. Kuna kanepibetoon on raskem kui enamik tavalisi katuseisolatsioonimaterjale, tuleb teha vastavad arvutused tagamaks, et katuse karkassi ja lae materjalid on kavandatud kandma lisakoormust.[11]

Vanade hoonete restaureerimise või renoveerimise korral pannakse madala sideainesisaldusega kanepibetoon katuse soojustamiseks tavaliselt katusekatte täieliku ümberehitamisega(välja vahetamisega). Kõikidel juhtudel tehakse uusehitises või olemasolevas hoones katuseõõne täitmine enne katte paigaldamist. Peale katuse katte paigaldamist on katuse all toimingut keeruline teostada ja täiuslikku isolatsiooni tulemust ei garanteerita.[19]

Alustuseks paigaldatakse raketis katusekarkassi, kambrite või muude konstruktsioonide alla, et valatud kanepibetoon püsima jääks. Kanepibetooni valamine väljastpoolt võimaldab täita kõik tühimikud ja tagab seega võimalikult täieliku täitmise. Kanepibetooni saab paigaldada pihustades või valades, kasutades tõsteseadet – konveierilinti, koppa, hüdrauliliselt tõsteseadet, kraanat või muud kõrghoonele kohandatud tööriista. Pärast täitmist tehakse ujukiga väga kerge tihendamine, et saada stabiilne pind ilma settimiseta. Vastavalt kehtivatele eeskirjadele tuleb paigaldada vihmakaitse, mis tagab õhutiheduse ja kaitse katusele võimaliku tilkumise eest. Seda tüüpi rakenduste puhul pööratakse erilist tähelepanu segudele ja sobivale veesisaldusele, et vältida äravoolu ja konstruktsioonidetailide kokkupuudet liigse niiskusega.[19]

Katuseisolatsioonina on kanepibetooni eeliseks see, et see peletab kahjureid ega vaju aja jooksul. Samuti on materjal palju vastupidavam niiskusele kui tavalised isolatsioonid. Arvestades, et enamikul hoonetel esineb eluea jooksul mitmeid katuselekkeid, võib niiskuskindel isolatsioon pakkuda olulist vastupidavust.[11]

2.2.4 Aknad ja viimistlus

Kanepibetooni kasutamine akende viimistlusel ei ole laialt levinud, kuid töö autor on leidnud kirjandusest mitmeid edukaid rakendusi ja näeb seda materjali potentsiaalselt väärtusliku kasutusvõimalusena (joonis 8). Kanepibetoonisegu, mis sisaldab paar protsenti kanepikiudu, kasutatakse aknaplokkide ja raamide vahelise tasandusruumi täitmiseks, muu soojustusvahendi või paisuva pihustusvahu asendamiseks. Seejärel saab akent tavapäraselt trimmida või vormida kanepibetooni, et luua aknale välis- ja/või siseviimistlus. See loob ainulaadse esteetilise võimaluse, moodustades akende ümber õhukindla tihendi ilma naftakeemiatoodeteid kasutamata.[11]



Joonis 8 akende viimistlus kanepibetooniga [11]

2.2.5 Muud kasutusala

Juhul kui olemasolev sein vajab lisasoojustust, võib kanepibetooni kasutada suurema või väiksema paksusega kihina, kantuna seina välisküljele. Kanepibetooniga krohvimist peetakse pigem "soojusisolatsiooni remondiks" – eriti kui seda kasutatakse käsitsi. Sideainet on vaja suuremas koguses, et segu kleepuks kellu küljest seina külge. Järelikult on nende krohvisegude soojusomadused vähem soodsad kui seinte ja katusekatete jaoks mõeldud kanepibetoonidel. Vastupidiselt käsitsi pealekandmisele, saab pihustades krohvisegule sarnased omadused, nagu oleks seina paigaldatud. Neid segusid võib kanda ka ebatasastele pindadele, kus see neid tasandab, täites seega rohkem esteetilist kui praktilist rolli.[19]

2.3 Kanepibetooni paigaldamine

2.3.1. Valamine ja tampimine

Kanepibetoonist võib valmistada seinaelemente (ehitusplokkide või kokkupandavaid elemente) eeltöötlemistöökojas või ehitusplatsidel käsitsi või mehhaniseeritud paigalduseks [19].

Kohapeal valatud kanepibetoon tähendab kanepisegu segamist kohapeal ja valamist vertikaaltugedele paigutatud vormi või raketistest valmistatud vormidesse, et moodustada seinad, põrand või katus täpselt sellises asendis nagu nad hoonesse jäävadki. Raketis võib olla ajutine või alaline.[8]

Kohapeal valatud kanepibetooni käsitsi paigutamine viitab füüsilisele tööle, kõigepealt et viia segistist sinna, kuhu seda vaja on ja seejärel asetada kanepibetoon raketise tekitatud tühimikku. Paigutusprotsess tuleb läbi viia hoolikalt, et tagada nii valmismaterjali kvaliteet kui ka teatud soovitud omadused. Kanepibetooni käsitsi transportimiseks kasutatakse suuri vanne või ämbreid, kuna see on suhteliselt kerge materjal.[8]

Kuna kanepibetoon on mittekandev materjal, valatakse see alati ümber konstruktsiooniraami, mis on hoone peamine kandev element. See on tavaliselt, kuid mitte alati, puidust ehitatud. See reegel kehtib olenemata sellest, kas seda kasutatakse uue maja ehitamisel või maja restaureerimise kontekstis. Uusehitistes on tavaline meetod ehitada okaspuidust lihtne karkass ja matta see kanepiseina keskele, kuid raami saab muuta nii, et see vastaks disaini erinevatele detailidele nii sise kui välisküljel.[8]

kanepi varretükkide ja sideaine segamist veega saab teha mitmesuguste mehaaniliste segistitega, sõltuvalt vajalikust kogusest, vajalikust kiirusest, pealekandmisviisist ja ehitusplatsile juurdepääsetavusest [8].

Seina- ja põrandarakendustes vajab materjal mõningast käsitsi tampimist, et tagada segu hea sidumine ja terviklikkus. Siiski võib tampimise hulk lõppmaterjali tihedust oluliselt mõjutada, isegi kui kõik segusuhted on identsed. Tiheduse kõikumised võivad soojuslikkust oluliselt mõjutada, seega on see oluline muutuja, mida kontrollida.[11]

Kanepibetooni käsitsi valamine võimaldab lihtsasti kontrollida valmistoote kvaliteeti. Kui paigaldamisega on seotud mitu inimest, siis on vajalik hoopis jälgida ühesuguseid töövõtteid.. Käsitsi paigaldatud ja kohapeal valatud kanepibetooni madalatehnoloogiline ja praktiline olemus meeldib isehitajatele, olgu siis üksikisikutele või rühmadele, kellel on aega kulude vähendamiseks oma tööjõud ehitusprotsessile pühendada.[8]

Kanepibetoonil lastakse järgmise paari nädala jooksul järk-järgult kuivada, kuni see on piisavalt kuiv, et viimistluskihte saab hakata peale kandma [8].

2.3.2. Pihustamine

Nagu kõigil teistel asjadel, on ka *hempcrete* pihustamisel oma eelised ja puudused. Uusi võimalusi masinate kasutamiseks ja uusi seadmeid meetodi täiustamiseks arendatakse pidevalt. Kanepibetooni pihustamine järgib üldjoontes sama tehnikat, mis käsitsi paigutatud kanepibetoon. Erinevus on selles, et tegemist on täielikult mehhaniseeritud protsessiga ja konstruktsioonis esinevad mõned väikesed muudatused. Kanepitükid on peenem klass kui see, mida kasutatakse kanepibetooni käsitsi asetamiseks, kuna leiti, et pikemaid kui 20 mm tükke sisaldav segu blokeeris pihustusmasina vooliku.[8]

Pihustamisega pealekandmiseks piisab ühest raketise pinnast [19]. Kanepibetoon pihustatakse ajutisele või jäävale raketisele (mis jääb konstruktsiooni sisse alles) või olemasolevale seinale (renoveerimise eesmärgil) [19]. Vältimaks raketise eemaldamisel värsket kanepibetooni mahatõmbumist, asetatakse plaatidele enne pihustamist polütaankile [19]. Kuna pihustusmasin ei saa nurkade taha väga hästi pritsida, on selle pealekandmismeetodi maksimaalseks kasutamiseks vajalik avatud, hõlpsasti ligipääsetav raam [8].



Joonis 9 kanepibetooni pihustamine[26]

Suruõhuvoolu tõttu pihustatakse kanepibetoon vastu laudu/raketist, moodustades seinu. Värske kanepibetooni hea püsivuse tagamiseks müüri ehitamise ajal on eelistatav laotada see horisontaalsete kihtidena lineaarsete ridadena, mitte katta vertikaalsete kihtidega. Seetõttu rakendatakse horisontaalsete kihtidena, mille kõrgus on alla 20 cm ja mis kantakse kogu loodavale seinuosale. Pihustamine on pidev ja kogu sein luuakse ühe käiguga, alt üles. See kõrgelt mehaniseeritud tehnika on üsna kiire (kanepibetoonseina puhul umbes 6 m³ tunnis), kuid see nõuab selle kasutamiseks koolituse läbinud töötajaid.[19]

Ehitajate jaoks, kes soovivad ise tööd teha, pole pihustatud kanepibetoon tegelikult valik. Pihustamismeetodi jaoks kasutatav kallis masin ei ole iseehitajale kättesaadav, sest masinat ei ole võimalik päeva või nädala kaupa rentida ja pealegi arenevad masina kasutamiseks vajalikud oskused välja aja jooksul. Pihustiga pealekandmine võib siiski vähendada kohapeal vajalike inimeste arvu, eriti kanepibetooni paigaldamisel suuremahuliste ehitiste puhul. Arvestama peab kapitali väljaminekuga ning masina puhastamiseks, transportimiseks, hooldamiseks ja parandamiseks kulutatud aja ja rahaga.[8]

2.3.3. Kanepibetooni plokid ja paneelid

Suurbritannias katsetatakse kanepibetoonpaneelide ja -plokkide valmistamisega [11]. Tootmisruumis valmistatud ja kuivatatud paneelid või plokid transporditakse objektile ja paigaldatakse [11]. Plokid pannakse kokku töökojas vormimise või vibropressimise teel [19]. Viimasel juhul on protseduur üsna sarnane betoonplokkide valmistamisega [19]. Üsna kuiv segu valatakse vormi kohale asetatud doseerimispunktrisse [19]. Seejärel lastakse materjal vormi ja tihendatakse üsna tugevalt, võib-olla koos vormi vibratsiooniga [19]. Plokk eemaldatakse peaaegu kohe [19]. Vormidetailide kasutamine võimaldab saada üsna keeruka ristlõikega plokkide [19]. Selliseks vormimiseks saadakse segu kas slusheriga (pideva juurdevoolu tagav Bivise segisti) või betoonisegistiga [19]. Kanepibetoonplokkide puuduseks on see, et plokkide kokkuliimimiseks on vaja mingit mörtil, mis pikendab paigaldusaega ja tekitab külmasildu, kus mört tagab madalama soojusjuhuse üle seina kui kanepibetoon [11]. Katseliselt on kasutatud hambaga/soonega plokkide, et vähendada või kõrvaldada vajadus täislaiuses mördivuugi järele.[11]



Joonis 10 William's den Laste peomaja kanepiplokkidest UK [27]



Joonis 11 William's Den valminuna [27]

Kanepibetooni plokid laotakse tavaliselt külgi niisutades ja seotakse omavahel õhukese hüdraulilise lubjast ja liivast koosneva mördiga. Nad laotakse nii, et termiline sild (tuntud ka kui külmasild - külmasild on isolatsioonikihis olev vahe, mis võimaldab soojusel sellest mööda minna) oleks minimaalne mördi vuukide välimise ja siseseina vahel. Plokke saab lõigata hõlpsalt käsisaega, mis on kasulik nende tihedaks kinnitamiseks konstruktsiooniraami ümber, kuid ehitamise kiiruse parandamiseks ja raiskamise minimeerimiseks tuleks raam kavandada plokki suuruse järgi või vastupidi.[8]

Esmapilgul võivad plokid olla kanepibetooni kasutamise parim viis, eriti kui arvestada kuivatamist kohapeal. Plokkide valamisel, mida laotakse mördiga on aga põhimõtteline ebaefektiivsus, sest tehases on plokki valmistamiseks vaja segistit ja raketist ning seejärel peavad enne täielikku läbima mitmed erinevad protsessid. Seina valamine kohapeal on kulutõhusam.[8]

Peamised argumendid plokkide vastu on järgmised:

- Selleks et saada piisava struktuurse terviklikkusega/tugevusega plokid, et need püsiksid terved peale valmistamise, ladustamise ja transportimise, tuleb

kanepisegusegu tihedust suurendada võrreldes kohapeal valatud kanepibetooniga.

See soojapidamise omadusi halvemaks, kuid see suurendab soojusmassi.[8]

- Plokid tuleb asetada mördiga, mida pannakse küll õhuke kiht, võib tekitada seinu kaudu külmasildu.[8]
- Kanepibetooni survetugevus ei ole piisav, et neid plokkide saaks kandva seinana kasutada katuse koormuse toetamiseks, nagu saab seda teha betoonplokkidega, nii et kuigi nad on piisavalt tugevad oma kaalu kandmiseks, tuleb need siiski konstruktsiooniraami ümber asetada.[8]

Need kolm tegurit koos asjaoluga, et plokid on kallimad ja potentsiaalselt suurema energia vajadusega, et neid toota, tähendavad, et kanepibetooniga ehitamisel eelistatakse tavaliselt kohapeal valamist.[8]

On püütud valada suurema survetugevusega "struktuurseid" kanepibetooni plokkide, mis suudavad vastu võtta survetugevuse taset, kuid need pole tegelikult otstarbekad, sest tugevuse tagamiseks vajalik suurenenud tihedus tähendab, et soojusisolatsiooni väärtus on oluliselt vähenenud. Sellised konstruktsiooniplokid võivad olla kõige sobivamad siseseinte jaoks, kus suurema tiheduse saavutamine on soovitatav, et tagada hoones suurem soojusmass või parem ruumi akustika.[8]

Kanepibetoonipaneelid on Ühendkuningriigis kasutatud piiratud ulatuses. Kanepibetoon vormitakse puitkarkassiks ning karkass ja soojustus paigaldatakse hoone välisküljele, mähkides tavaliselt konstruktsiooniposti ja tala karkassi. Kanepibetooni eelvalu eemaldab ehitusgraafikust kuivamise/kõvenemise aja, kuna materjalid saavad krohvimiseks või plakeerimiseks valmis kohe pärast paigaldamist. Mõlemal monteeritava kanepibetooni vormil on märkimisväärne potentsiaal aidata kanepibetooni tuua tavalistesse ehitusrakendustesse.[11]

Paneelid, mis koosnevad puitkarkassist, sisseehitatud isolatsioonikihist ja hingavast aurukontrollikihist, toodetakse ja kuivatatakse tehases, seejärel tarnitakse ja monteeritakse kohapeal. Erinevalt plokkidest pole monteerimisetapis mörtil vaja, mis tähendab, et enne viimistluse rakendamist pole vaja selle kuivamist oodata.[8]

Kanepibetooni paneelid on kahte tüüpi. Mõlema tüübi puhul isolatsioonikiht on tavaliselt kanepikiust "tekk", mis annab neile madalama U-väärtuse (parem isolatsioonivõime) kui valatud kanepibetoon sama seinu paksuse korral. See on areng, mille taga on turunõudlus madalamate u-väärtuste järele. Looduslikust kiust isolatsioonimaterjalil on parem üldine soojuslik toime kui kanepibetoonil.[8]

Konstrukttiivne paneel(*Hembuild*) - Puitkarkassi elemendid on projekteeritud nii, et kohapeal kokku ühendades moodustavad paneelid hoone struktuuri, samuti isolatsiooni ja õhukindla

termilise ümbrise (Hoonesisene termiline mass). Need paneelid sobivad ühe kuni kolmekorruseliste hoonete jaoks ja sobivad ilmselt kõige paremini suurte elamute, koolide ja ärihoonete jaoks.[8]

Mittekonstruktiivne paneel - *Hemclad* paneelidel on identne ülesehitus, välja arvatud see, et puitelemendid ei ole konstruktiivsed. Selle asemel ühendatakse need kokku, et toimida eraldi vooderdusena tugiraami ümber, mis on sageli valmistatud liimpuidust, terasest või betoonist. Need paneelid sobivad oma kulude ja ulatuse tõttu peamiselt äri- või tööstushoonete rajamiseks, kuid neid on kasutatud ka elamute tammekarkassi ümber. Mõlemat tüüpi paneele saab valmistada ja tarnida eritellimusel ning neid tarnitakse u-väärtuste vahemikus, sõltuvalt kliendi nõudmistest.[8]

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1 katsekehade ettevalmistus, karboniseerimisprotsess

Kanepibetonisegu retseptid suure luu(jämeda) ja väikese luu(peene) jaoks olid järgnevad: 4 liitrit kanepiluud, 1,5 ja 1 liiter vett ning 1 liiter lubjapastat [28]. Suurte kanepiluude fraktsioonid olid pikkusega 15-30 mm ja väikestel 10-15 mm. Kanepibetonisegude tootmist kirjeldavad täpsemalt Pau jt [28]. Materjali saab kasutada sisekrohvi või massiivse seinana, Pau jt [28] uurisid võimalusi selle kasutamiseks seestpoolt soojustusena. Valmistati (Moostes, Markua Pau poolt) kahte tüüpi näidiseid: kettad $d=103$ mm, kõrgus 25 mm ja prismad $40*40*160$ mm. Alguses hoiti katsekehasid 3 kuud temperatuuril $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhtelises õhuniiskuses $RH=70-80\%$, seejärel päikese eest kaitstult paviljonis. Kuue kuu pärast saabusid proovid hästi ventileeritavasse kontoriruumi ja saabumisel testiti neid fenoolftaleiiniga (1%).

Alates 2020. aasta septembrist kuni 2021. aasta jaanuarini hoiti proove hästi ventileeritavas kontori (labori) ruumis. Katsekehad ei olnud alguses veel karboniseerinud.



Joonis 12 Katsekehad septembris laborisse saabudes, Autor: Aime Ruus

Mittekarboniseerunud tähendab käesolevas uuringus, et proove hoiti hästi ventileeritavas ruumis. Juhuslikult jälgitud CO_2 tasemed kõikusid 400–700 ppm vahel.

Katsetati kahte segu (jäme ja peen), mis jagati kahte rühma: karboniseeritud ja karboniseerimata materjalid ning kokku nelja katserühma: jäme karboniseeritud, jäme, peen karboniseeritud ja peen.

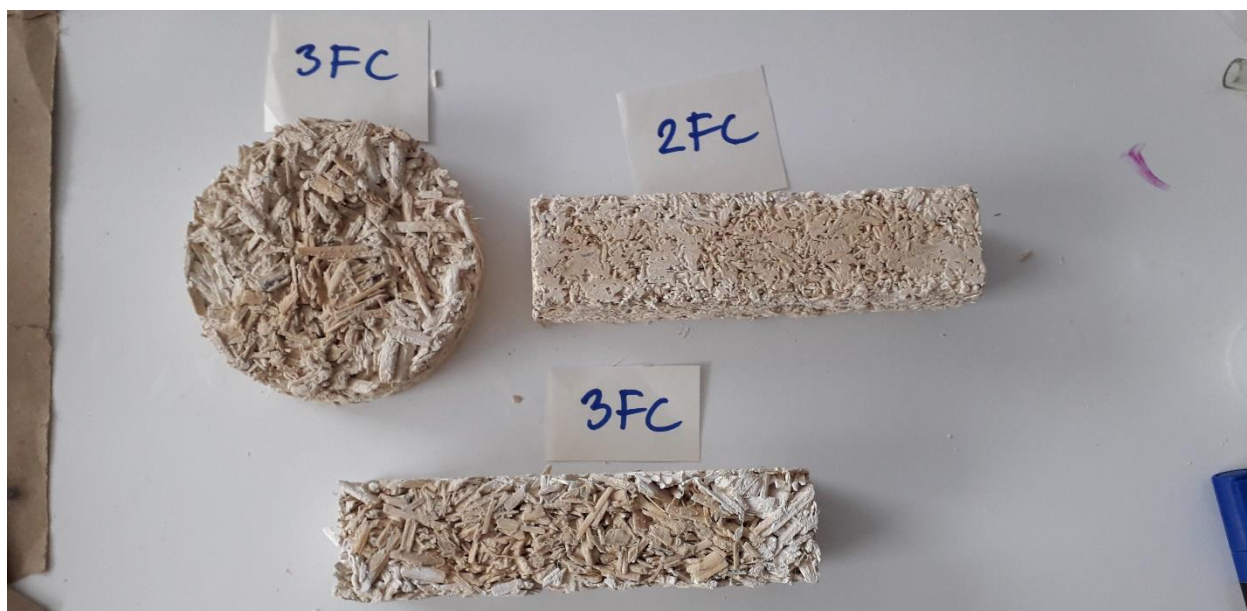
Karboniseerimise forsseerimiseks pandi proovid (õhutiheduse tõttu) tihedalt suletud 25 l plastikust veiniämbrisse ja pärast kaalumist lisati 10l/min CO₂ regulaarselt üheks minutiks, üks kord päevas. Enne järgmist kaalumist jälgiti CO₂ taset, mis ületas 5000 ppm (ülemine väärtus mõõteseadmel KIMO AMI 300, andur SCO2TH). Veeauru juurdepääsu tagamiseks pandi ämbri põhja veidi vett. Testi ajal suurenes RH iga päev – algselt oli RH = 57% ja saavutas RH = 87% 11 päeva pärast. Kuna karboniseerumise parim suhteline õhuniiskus on vahemikus 50–80% [29], siis lõpetati karboniseerumise jälgimine pärast 87% suhtelise õhuniiskuse saavutamist (joonis 13).

Kõigi katsete puhul kasutati kliimakambrit RUMED 4101 mõõtepiirkonnaga 0-60°C täpsusega 0.5 °C ja RH 20-95% täpsusega 2-3% ning kaalu Kern PLT 1200-3A 0.005-1200 g täpsusega 0.001 g.



Joonis 13 Katsekehad, mida on hoitud kliimakambris niiskusel 87% (fenoolftaleiin 1%), Autor: Aime Ruus

Teine rühm läbis kliimakambris jälgimise, et välja selgitada, kas katsekehad suudavad kaalu stabiliseerida. Seda seetõttu, et varasemast oli kogemus, kus karboniseerumata lubikrohviga kehad mass ei stabiliseerunud [30]. Proovid märgistati vastavalt nende töötlusele (1 - number rühmas, F - töödeldud fenoolftaleiiniga, C - karboniseeritud). Mõlemal juhul registreeriti kaalutõus, kuid kuna proovid (eriti jämeda faraktsiooniga) lagunesid kergesti, siis tulemusi siin ei esitata. Pärast karboniseerimist testiti proove uuesti fenoolftaleiiniga ja roosat värvi ei tuvastatud. Ainult kliimakambris hoitud katsekehad muutusid endiselt roosaks. Kuivtiheduse andmed on esitatud tabelis 4. On teatud tendents, et karboniseeritud jämedate katsekehade tihedus on suurem kui karboniseerimata jämedate katsekehade oma.



Joonis 14 Forsseeritud karboniseerumisega katsekehad 1% fenoolftaleiiniga töödeldud, Autor Aime Ruus

Tabel 4 katsekehade kuivtihedus kg/m^3

Katsekehade kuivtihedus		
Katsekeha grupp	Kettad	Prismad
Peen	361	445
Jäme	231	277
Peen Karboniseeritud	362	447
Jäme Karboniseeritud	245	286

3.2.Kivistunud mördi kapillaarse veeimavuse koefitsendi määramine

Veeimavus määrati vastavalt standardile EN 1015-18 [31]. Enne katsetamist kuivatati proovid vastavalt standardile ISO 12570 [32]. Igast rühmast kolm isendit murti kaheks võrdseks osaks. Pikkade tahkude tihendamiseks kasutati hüdroisolatsioonimaterjali Fibergum.

PÕHIMÕTE

Kapillaarse veeimavuse koefitsenti määrati prismakujuliste mördist katsekehadega ettekirjutatud tingimustes atmosfäärirõhul. Konstantse massini kuivatatud katsekeha asetati otsapidi kindlaksmääratud ajaks 5 kuni 10 millimeetri sügavuselt destilleeritud vette ja määratakse massi juurdekasv.

KATSESEADMED

Katse läbiviimiseks kasutati kandikut, mille sügavus oli vähemalt 20 mm. Kandik oli piisavalt suure tasase pinnaga immutavate katsekehade paigutamiseks ning vahenditega konstantse veetaseme hoidmiseks.

Neli tugiklotsi (Käesoleval juhul kasutati plastrestit), mis fikseerivad katsekeha vajaliku asendi minimaalse kontaktpinnaga, tagades vee vaba juurdepääsu katsekeha otsale ja etteantud vettekastmissügavuse.

Katseks kulunud aja mõõtmiseks kasutati stopperit, mis oli gradueeritud sekundites. Katsekehade kaalu mõõtmiseks kasutati kaalu, täpsusega 0,1% katsekeha kuivast kogumassist. Kasutati ka konditsioneerimiskambrit, mis võimaldas hoida suhtelist niiskust $95\% \pm 5\%$ ja $65\% \pm 5\%$.

MATERJALID

Antud katse käigus kasutati destilleeritud vett. Tihendusmaterjalina kasutati Hüdroisolatsioonimaterjali Fibergum, mille sulamistemperatuur oli üle 60 °C.

KATSEKEHADE VALMISTAMINE JA HOIDMINE (kivinemine)

Valmistati kolm EN 1015-11 kohast prismakujulist katsekeha mõõtmetega 160 mm x 40 mm x40 mm. Kõik Katsekehad on valmistatud 18.03.2020 (Markus Pau poolt) paralleelselt sissejuhatuses mainitud seespoolse soojustamisega. Ruumi temperatuur oli 10°C,

õhuniiskus ca 70-80%. Suletud varjuline ruum, sundventilatsiooniga. Selles ruumis olid katsekehad 3 kuud. Seejärel olid katsekehad kogu suve loomuliku ventilatsiooniga varjulises ruumis kuni Tartu kolledži laborisse toomiseni (11. september 2020). Katsekehade neli pikka külge kaeti tihendusmaterjaliga (joonis 15), seejärel murti katsekehad pooleks (joonis 16).



Joonis 15 katsekehade hüdroisoleerimine



Joonis 16 hüdroisloeritud ja poolitatud katsekehad

KONDITSIONEERIMINE

Katsekehad kuivatati konstantse massini kuivatuskapis temperatuuril $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Konstantne mass loeti saavutatuks, kui kuivatamise käigus kahel 24h intervalliga kaalumisel ei ületanud massikadu 0,2% kogumassist.

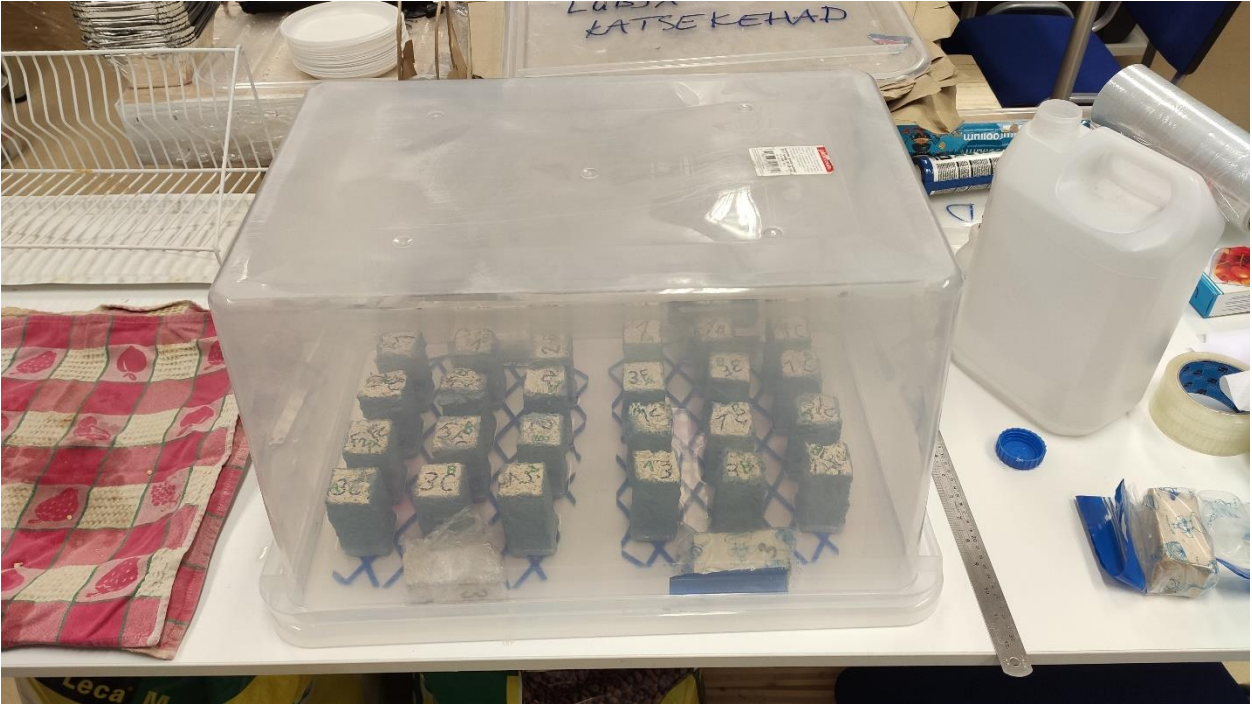
KATSE KÄIK

Katsekehad asetati kandikule, prisma murtud pinnad allpool, toetatult kandiku pinnaga vahet hoidvale plastrestile, nii et katsekeha oleks kogu katse vältel 5 kuni 10 millimeetri sügavusel vees (joonis 17, 18). Tagamaks kareda pinnatekstuuriga katsekehade täielikku märgumist ja vältimaks õhumullide kinnitumist nende alla, hoiti katsekehi vette asetamisel kaldu. Seejärel käivitati stoppeper. Katsekehade kaalumise aegadeks valisime ise 10 minutit, 90 minutit ja 24 tundi. Vee taset hoiti kogu katse vältel konstantsena. Kandik kaeti, vältimaks aurustumist märgadelt katsekehadelt.



Joonis 17 Veeimavuse katse alustamine

Katsekehad võeti kandikult ära 10 minutit peale katse alustamist, pinnal olev vesi pühiti niiske lapiga kiiresti maha, katsekehad kaaluti (M1) ja asetati otsekohe kandikule tagasi. Sama protseduuri ja kaalumist (M2) korrati 90 minuti ja 24 tunni pärast.



Joonis 18 Katsekehad välismuutujate eest kaitstuna

Katsekehad võeti kandikult ära 24 tunni pärast ja kaaluti (M3). Kohe seejärel lõhestati katsekeha pikuti kaheks umbes 80 mm x 40 mm x 20 mm suuruseks osaks. Mõõdeti vee süüvimissügavus katsekeha keskel, paralleelselt 80-millimeetrilise mõõtmega, täpsusega 1mm.

3.3 Veeauru läbivuse määramine – Tassi meetod

Veeauru läbilaskvust testiti vastavalt standardile ISO 12572 [33] viie katsekehaga iga rühma kohta. Katse läbiviimisel kasutati kliimakambri meetodit ja valiti tüüp C (RH=50/93%). Kasutati kliimakambrit Katsekehasid kaaluti regulaarselt 12-tunnise intervalliga. Laboriruumis jälgiti keskkonnaandmeid ja kliimakambri õhutemperatuuri ning suhtelist õhuniiskust.

PÕHIMÕTE

Katsekeha on küljelt tihendatud testimisanuma avatud poolele, mille sees on kas kuivatusaine (dry cup) või siis vesine küllastunud lahus (wet cup). Seejärel asetati komplekt temperatuuri ja niiskusega reguleeritavasse katsekambrisse. Katsekambri ja katsekeha vahelise aururõhu erinevuse tõttu toimus auruvool läbi auru läbilaskva katsekeha. Veeauru ülekandekiiruse püsiseisundis määramiseks kaaluti komplekti perioodiliselt.

SEADMED

Katse jaoks kasutati plastmassist testanumaid, mis on vastupidavad nii korrosioonile kui soolalahustele. Katsekehade mõõtmiseks kasutati nihikut ja joonlauda, täpsusega 0,2mm või $\pm 0,5\%$ ning kaalu täpsusega 0,001g.

Selle jaoks, et tagada konstantset temperatuuri ja õhuniiskust, kasutati kliimakambrit, mis suudab hoida õhuniiskuse $\pm 5\%$ ja temperatuuri $\pm 1K$. Kliimakambri ühtlaste tingimuste tagamiseks tuli õhku segada kiirustel vahemikus 0,2 m/s ja 0,3 m/s

Õhutemperatuuri, suhtelise õhuniiskuse ja õhurõhu mõõtmiseks katsete tegemise ajal kasutati erinevaid sensoreid ja logereid.

KATSEKEHADE KONDITSIONEERIMINE

Enne katse alustamist säilitati katsekehi $23\pm 5^{\circ}C$ juures ja suhtelisel niiskusel $50\pm 5\%$ kuni nende kaal stabiliseerus ning ei muutunud enam kui 5% kogumassist.

KATSEKEHADE ETTEVALMISTAMINE

Katsekeha diameeter mõõdeti täpsusega $\pm 0,5mm$, jämedus täpsusega 0,2 mm. Kuna tegemist oli jäikade materjalidega, siis mõõdeti katsekehi neljast kohast ümber ümbermõõdu. Seejärel kalkuleeriti keskmine läbimõõt.



Joonis 19 Kaalumise difusioonikatsel Autor: Aime Ruus

Katseanumate põhjadesse valmistati küllastatud KNO_3 vesilahus. Vesilahuse miinimumsügavuseks oli 15mm, seda valati igasse testanumasse ja seejärel katsekeha tihendati anuma ülalossasse. Katsekehade tihendamiseks kasutati aurutihedat hermeetikut, millega ei toimunud füüsilisi ega keemilisi muutusi katsetamise ajal. Samuti ei põhjustanud hermeetik füüsilisi ja keemilisi muutusi katsekehadele.

Õhkuvahe katsekeha ja vesilahuse vahel pidi olema (15 ± 5) mm. Õhukihi difusioonitaksituse arvutamiseks oli tarvis teada selle p. Vahe kaugus oli teada millimeetri täpsusega, et arvutada selle takistust.

KATSE KÄIK

Katsekehad asetati testkambrisse ja kaaluti vastavalt neile oodatavatele omadustele kindla intervalliga. Kaalumist teostati hommikul ja õhtul, 12 tunnise vahega (kell 8:30 ja 20:30).

3.4 Hügrokoopse sorptsiooni määramine

Sorptsioonimadusi testiti vastavalt standardile ISO 12571 [34] ja kuivatati vastavalt standardile ISO 12570 [32], igast rühmast neli proovi. Laboriruumis jälgiti keskkonnaandmeid ja kliimakabris õhutemperatuuri ning suhtelist õhuniiskust.

SEADMED

Katsekehade kaalumiseks kasutati kaalu täpsusega 0,001g. Kliimakambrisse panemiseks kasutati katseanumaid, mis ei ima vett ja niiskust. Katsekehade kuivatamiseks konstantse massini kasutati kuivatuskappi vastavalt standardile ISO 12570. Niiskusetappide loomiseks kasutati kliimakambrit, mis hoidis suhtelist õhuniiskust $\pm 5\%$ ja temperatuuri $\pm 2K$ kogu katseala ulatuses.



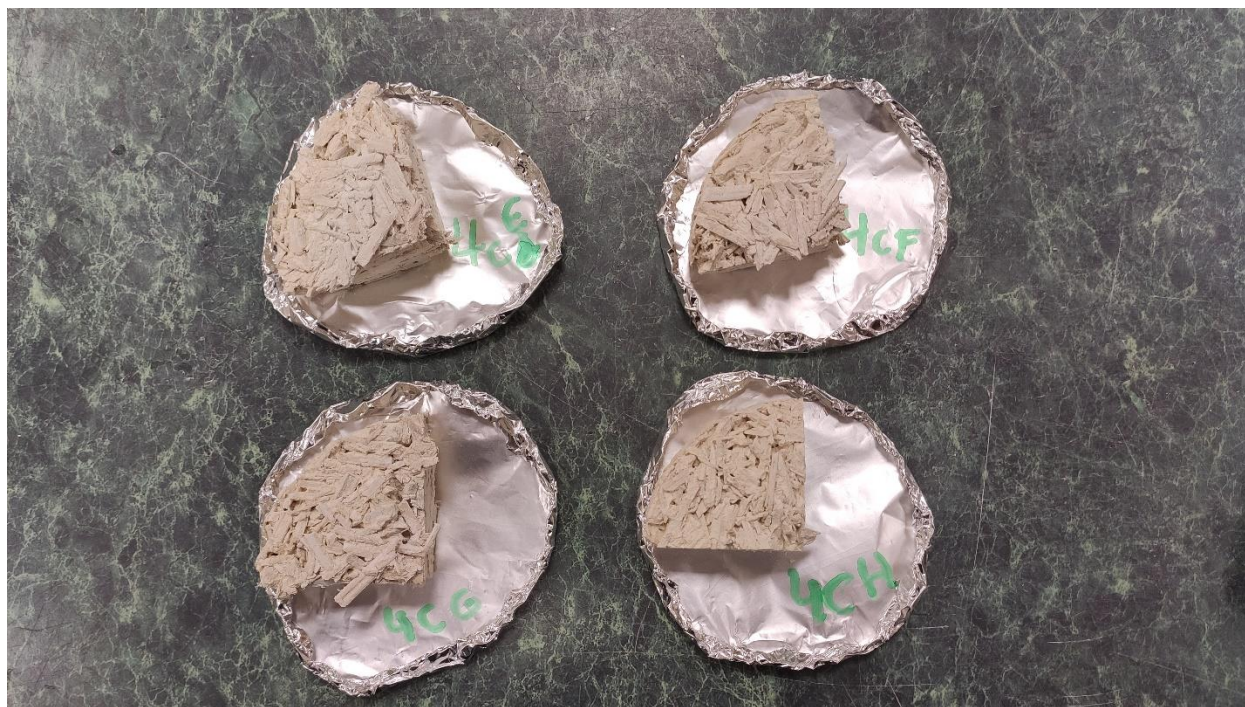
Joonis 20 Sorptsiooni katsekehad

KATSE KÄIK

Sorptsiooni kõver – Enne katse alustamist kuivatati katsekehad konstantse massini. Konstantne mass saavutati kolme järjestikuse kaalumise tulemusena, kui kaalumiste erinevuste summa oli vähem kui 0,1% kogu massist. Kaalumised teostati iga 24 tunni tagant. Säilitades püsiva temperatuuri, pandi katsekehad järjestikku katsekeskkondade seeriesse,

kus suhteline õhuniiskus kasvas järk-järgult. Peale tasakaalu saavutamist igas etapis määrati niiskuse sisaldus. Katsekeha tasakaalus olekut igas etapis näitas katsekeha konstantne mass. Sorptsioonikõvera saamiseks oli minimaalselt vaja 4 niiskuse etappi, vahemikus 30% kuni 95%. Peale iga etapi niiskuse sisalduse leidmist, joonistati sorptsioonikõver.

Desorptsiooni kõver – Desorptsiooni kõverat alustati suhtelisest niiskusest alates 95%. See võis olla ka sorptsiooni kõvera viimane punkt või siis saavutatud sorptsiooniga kuivast katsekehast. Säilitati püsivat temperatuuri ja pandi katsekeha järjestikku katsekeskkondade seeriasse, kus suhteline õhuniiskus kahanes järk-järgult. Niiskusesisaldus leiti kui konstantne mass oli saavutatud. Minimaalselt pidi olema 4 niiskuse etappi (vahemikus 95% kuni 30%), mille lõpus kuivatati katsekeha konstantse massini. Peale niiskusesisalduse leidmist igas etapis, joonistati desorptsioonikõver.



Joonis 21 Sorptsiooni katsekehad

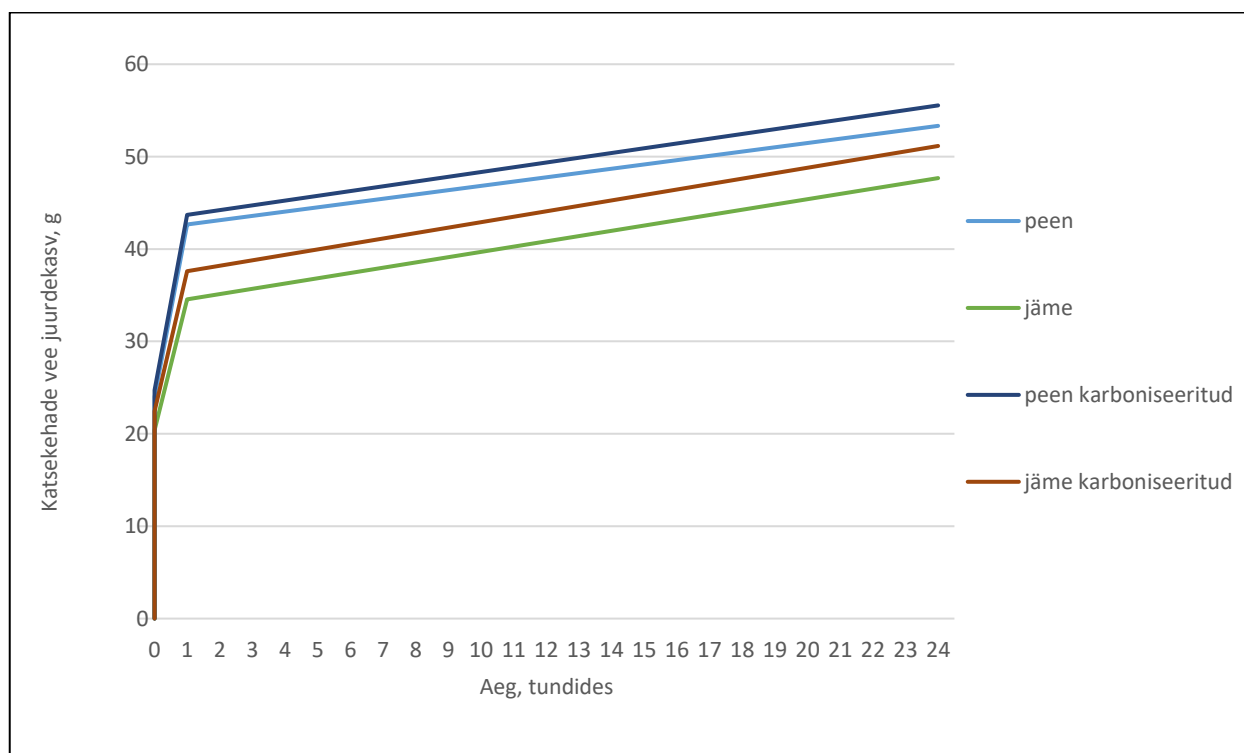
4. TULEMUSED

4.1 Kapillaarse veeimavus koefitsendi määramine

Katsekehad (prismad) kaaluti kuivas olekus, 10min ja 90 minuti pärast ning 24 tundi pärast vettekastmise algust. Murdekohtade tahud olid ekstreemselt ebaühtlased, seega kasteti nad 10mm sügavusse vette. Pinna neeldumistegur 90-10 minuti pärast saadi 1.41-1.90 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0.5})$. 24-tunnise kaalumise järel tehti kindlaks, et proovid olid veega küllastunud (joonis 23, 24). Küllastumise aega ei registreeritud (joonis 22). Sarnased väärtused saadi peene fraktsiooniga ($A_w = 1.86$ ja $1.9 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0.5})$) ja jämeda fraktsiooniga ($A_w = 1.41$ ja $1.45 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0.5})$). Karboniseerumine ei mõjutanud veeimavusomadusi.

Tabel 5 Katsekehade veeimavuse koefitsent $A_w \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0.5})$ ja küllastunud vee sisaldus WC (kg/m^3)

Katsekehade grupp	A_w	WC
Peen	1.86	208
Jäme	1.41	186
Peen Karboniseeritud	1.9	217
Jäme Karboniseeritud	1.45	197



Joonis 22 kapillaarse veeimavuse katse



Joonis 23 veeimavuse katse läbimata ja läbinud katsekeha võrdlus



Joonis 24 Veeimavuskatse läbinud ja poolitatud katsekeha

4.2 Veeauru läbilaskvus

Väikese fraktsiooniga kanepiluudega eksemplarid olid üsna sileda pinnaga, jämedad aga pigem ebatasased. Samuti oli ketaste 2,5 cm paksus üsna väike. Seetõttu olid jämeda luuga rühma andmed suure erinevusega. Karboniseerimata proovid näitasid sarnaseid väärtusi (difusioonitakistustegur $\mu = 3,8$ peene ja $\mu = 4,0$ jämeda puhul, tabel 6) vaatamata tootmistüübile (tabel 2). Suurima μ väärtuse ($\mu=4,4$) andis karboniseeritud jäme ja madalaima ($\mu=3,5$) peenkarboniseeritud materjal. See on tähelepanuväärne, kuna peenel karboniseeritud materjalil oli suurim kuivtihedus.



Joonis 25 Veeauru läbilaskvuse katsekehad peale katse sooritamist

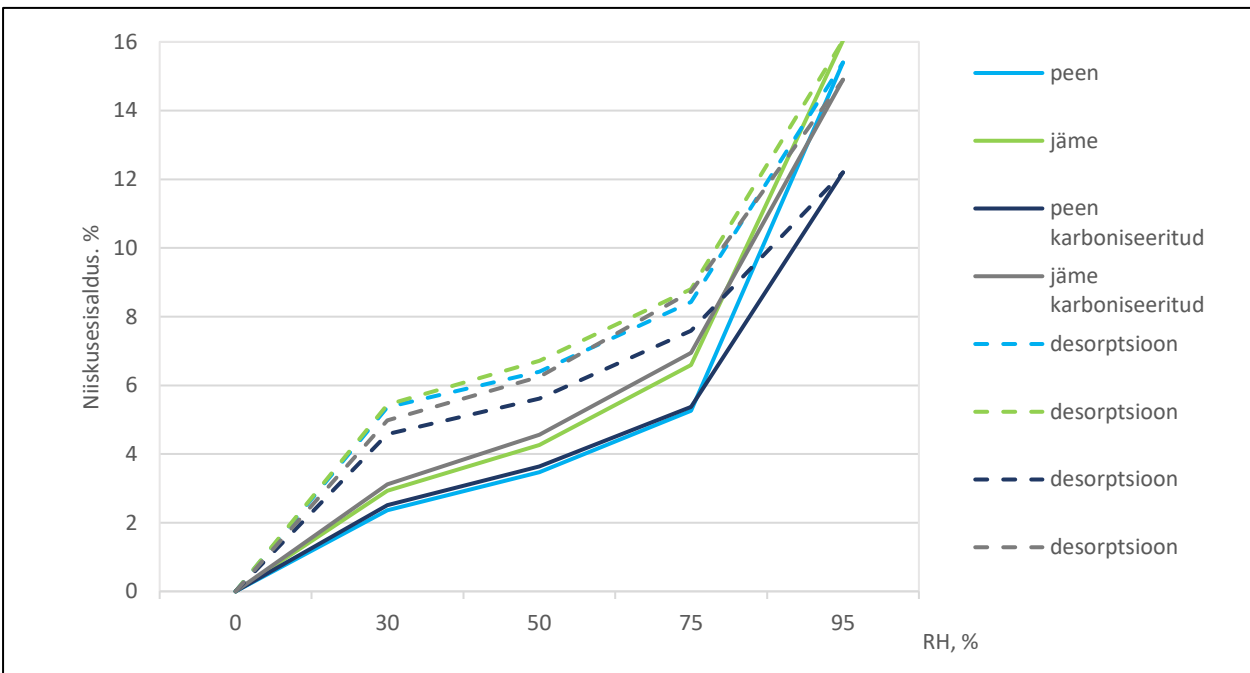
Igatahes olid erinevused väikesed ja neid võib esitada ühe tulemusena $\mu=3-5$ sõltumata kanepiluu suurusest või karbonisatsioonist. Tulemused on võrreldavad Walkeri ja Pavia leitud tulemustega ($\mu=5,42-5,71$, tihedusel $531-627 \text{ kg/m}^3$). Laboriruumi keskkonda jälgiti – keskmine õhutemperatuur oli $20,0$ ($16,9-24,5$) $^{\circ}\text{C}$ ja RH $20,1$ ($13,3-27,9$)%.

Tabel 6 Difusioonitakistustegur μ ja veeaurerijuhtivus δ 10-11 kgm-1s-1 Pa-1

Katsekeha	μ	δ 10⁻¹¹
Peen	3.8	5.1
Jäme	4.0	5.0
Peen Karboniseeritud	3.5	5.5
Jäme Karboniseeritud	4.4	4.4

4.3 Sorptsioon ja desorptsioon

Sorptsiooni puhul hinnati mõõtmispunktideks RH=30, 50, 75 ja 95% (joonis 26). Jämeda fraktsiooniga katsekehad näitasid suhtelise õhuniiskuse RH=50 % juures, MC = 4.3% ja karboniseeritud jämedad katsekehad näitasid RH=50% puhul veel kõrgemat väärtust, MC=4.6%. Peene fraktsiooniga katsekehad andsid tulemuseks MC=3.5-3.6%.



Joonis 26 Katsekehade sorptsioon ja desorptsioon

Ehitusmaterjalide jaoks kriitilisel tasemel (RH=75%) puhul oli karboniseeritud jämedal MC=7.0 % ja jämedal MC=6.6%. Peene materjal esitles vastavalt MC=5.4% ja 5.3%. Madala suhtelise niiskuse tingimustes (RH = 30%) MC = 2.4-3.1%. Kliimakambri kõrgeimal võimalikul tasemel (RH=95%) olid peened ja mõlemad jämedad proovid sarnased (MC=14.9-16.0%), samas kui peeneks karboniseeritud proovid olid selgelt madalamad (MC=12.2%). Desorptsiooni väärtused olid 2-3% kõrgemad tasemetel RH=30% RH = 50% ja RH = 75% korral. Suurimat hüstereesi näitasid peened fraktsiooniga proovid ($\Delta MC = 3\%$ keskmine).

Kaalumisprotsess näitas, et kaalutõus saadi 24 tunni jooksul ja pärast seda oli täidetud ainult stabiliseerimistingimus (kaalutõus alla 0,1% kolme viimase kaalumise jooksul). Kuna tihedused olid erinevad, arvutati peenkehade veeauru sisalduseks kuupmeetri kohta

RH=75% juures $5.4\% \cdot 361 = 19.5 \text{ kg/m}^3$ ja karboniseeritud jämedate puhul $7.0\% \cdot 245 = 17.1 \text{ kg/m}^3$, mis olid üsna sarnased. 50% suhtelise õhuniiskuse juures olid tulemused 12.6 ja 11.3 kg/m^3 . Maksimaalne niiskusesisaldus kuupmeetri kohta suhtelise õhuniiskuse RH=95% juures saadi peenkatsekeha puhul 55.6 kg/m^3 ja jämeda katsekeha puhul 37.1 kg/m^3 .

5. KATSETE TULEMUSTE ARUTELU JA JÄRELDUSED

Iga tootjat tuleks julgustada välja selgitama oma toodangu tegelikud omadused. Kirjandusest võib leida savikrohvi, mille sorptsiooniomadused erinesid kuni 20 korda [35]. Käesolevast uuringust kogutud andmed olid veeauru läbilaskvus, veeimavusomadused ja veeauru sorptsiooni näitajad. Soojuserijuhtivus arvutati tiheduse alusel ja kontrolliti testimisega Mattias Põldaru poolt [36]. Veeauru läbilaskvus ja soojuserijuhtivus on osa lihtsast 1D difusiooniarvutusest.

Tõenäoliselt annab kanepibetooni kasutamisest suurima efekti see, kui planeeritakse siseruumide soojustamine selle heade sorptsiooniomaduste ja soojusjuhtivuse tõttu. Kui siseruumides kasutatakse isolatsiooniks näiteks 10 cm paksust kanepibetooni ja selle veeauru difusioonikoefitsient on $\mu=3,5$, näitab see kondensatsiooniprobleemide tõenäosust $S_d=0,3-0,4$ m. Selgus, et RH=50% juures oli veeauru sisaldus kohta 11,3-12,6 kg/m³ ja RH=75% juures 17,1-19,5 kg/m³.

Paralleelselt läbi viidud uuringutest tuli välja, et kanebetooni kriitiline niiskus on 80% (Jane katse) ja maakivimüüri seespoolisel soojustamisel (Markuse katse) esinesid tõsised niiskusprobleemid. Iga planeeritav lahendus tuleb põhjalikult läbi analüüsida toetudes katseliselt määratud materjaliomadustele.

Head sorptsiooniomadused viitavad headele niiskuse puhverdusomadustele, mis võimaldavad vähendada siseruumide suhtelise õhuniiskuse tippe. 10 cm paksuse ja 50-75% suhtelise õhuniiskuse kõikumisega võib adsorbeeritud veeauru olla 590-690 g/m², mis teeb kihist tähelepanuväärse reservuaari.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti kanepibetooni niiskustehnilisi omadusi. Arvestades läbi viidud katseid ja tulemusi on algselt püstitatud eesmärgid täidetud. Enne esimese katse sooritamist tuli katsekehadele veel tegeleda, kuna osa neist tuli karboniseerida. Samuti tuli neid korraks kliimakambris jälgida, kuna juhendajal oli varasem kogemus karboniseerumata lubikrohvi keha massi mittestabiliseerumisega. Esimene katse oli kivistunud mördi kapillaarse veeimavuse koefitsendi määramine. Katse põhimõte oli, et külgedelt hüdroisoleeritud ja konstantse massini kuivatatud katsekehad asetati kindlaks määratud ajaks 5 kuni 10 millimeetri sügavuselt destilleeritud vette ja määrati nende massi juurdekasv. Teine katse oli veeauru läbivuse määramine tassi meetodil. Katse lihtsustatud põhimõte oli, et katsekeha koos anumaga, mille põhjas oli kindel hulk KNO_3 lahust, moodustas suletud ruumi, millest läbi katsekeha minna sai vaid aur. Katsekehi ümbritses kliimakamber. Kolmas katse oli hügrokoopse sorptsiooni määramine. Katsekehad kuivatati ning kasutades kliimakambrit loodi erinevaid niiskusetappe. Katsetes järgiti standardeid: EVS-EN 1015-18:2005 (Müürimörtide katsemeetodid. Osa 18: Kivistunud mördi kapillaarse veeimavuse koefitsendi määramine.)[31], EVS-EN ISO 12572:2016 (*Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method.*)[33] ja EVS-EN ISO 12571:2021 (*Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties.*) [34].

Kapillaarse veeimavuse katsekehade poolitamisel tekkinud tahud olid ekstreemselt ebaühtlased, seega kasteti nad 10 mm sügavusse vette. 10-90 minuti tulemuste abil saadi pinna neeldumistegur $1,41-1,90 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0.5})$. Peale 24 tunnist kaalumist lõigati katsekehad keskelt pooleks ning tehti kindlaks, et proovid olid veega küllastunud. Täpset küllastumise aega ei leitud. Peene fraktsiooni puhul saadi väärtusteks $A_w = 1.86$ ja $1.9 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0.5})$. Jämeda fraktsiooni puhul leiti väärtuseks $A_w = 1.41$ ja $1.45 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0.5})$. Lisaks selgus tulemustest see, et karboniseerumine ei mõjutanud veeimavusomadusi.

Veeauru läbilaskvuse katse jaoks valmistas autor olemasolevatest kanepibetooni rõngastest 20 katsekeha. Väikese fraktsiooniga kanepibetooni katsekehad osutusid palju siledamateks ja seega usaldusväärsemateks tulemuste poolest. Jämedad katsekehad olid natuke ebatasased. Karboniseerimata katsekehade puhul saadi sarnaseid väärtusi ($\mu = 3,8$ peene ja $\mu = 4,0$ jämeda puhul) olenemata tootmistüübist. Suurima väärtuse ($\mu=4,4$) andis karboniseeritud jäme ja madalaima väärtuse ($\mu=3,5$) andis peenkarboniseeritud

kanepibetooni katsekeha. Tähelepanuväärne on see selle poolest, et peenkarboniseeritud materjalil on suurim kuivtihedus.

Sorptsiooni katse jaoks leiti, et ühtlase vahega mõõtmispunktid võiksid olla RH=30, 50, 75 ja 95%. Madala suhtelise niiskuse RH=30% juures olid tulemused MC= 2.4 – 3.1% vahemikus. Ehitusmaterjalide jaoks kriitilisel tasemel (RH=75%) puhul oli karboniseeritud jämedal MC=7.0% ja jämedal MC=6.6%. Peenel fraktsioonil oli vastavalt MC=5.4% ja 5.3%. 50% suhtelise õhuniiskuse juures näitasid jämeda fraktsiooniga katsekehad MC=4.3% ja karboniseeritud jämedad MC=4.6%. Sama õhuniiskuse juures olid peene fraktsiooni tulemused MC=3.5-3.6%. Kõige kõrgema kliimakambris testitud niiskuse RH=95% juures jäid peened ja mõlemad jämedad fraktsioonid sarnasesse vahemikku (MC=14.9-16.0%). 95% õhuniiskuse juures osutusid peened karboniseeritud katsekehad tulemuste analüüsil selgelt madalamaks (MC=12.2%). Desorptsiooni käigus olid RH=30%, RH=50% ja RH=75% puhul väärtused 2-3% kõrgemad. Kuna tihedused olid erinevad, arvutati peenkehade niiskusesisalduseks kuupmeetri kohta RH=50% juures $3.5\% \cdot 361 = 12.6 \text{ kg/m}^3$ ja karboniseeritud jämedate puhul $4.6\% \cdot 245 = 11.3 \text{ kg/m}^3$, mis olid üsna sarnased. 75% Suhtelise niiskuse juures olid tulemused 19.5 ja 17.1 kg/m^3 . Maksimalne niiskusesisaldus kuupmeetri kohta RH=95% juures saadi peene fraktsiooni puhul 55.6 kg/m^3 ja jämeda fraktsiooni puhul 37.1 kg/m^3 .

Nagu kõik taimse kiudmaterjaliga isolatsioonivõimalused, suudab kanepiluu oma poorse struktuuri tõttu säilitada palju niiskust; niiskus võetakse väliskeskkonnast taimekiudude suurele sisepinnale ja imendub rakustruktuuri. Kanepibetooni eelis teiste taimsete kiudmaterjalide ja tavapärase isolatsioonitüüpide ees peitub lubja sideaine omadustes. Lubjal on kõrge PH ja see on oma olemuselt antimikroobne ja seenevastane. Lubjasegu loob iga kanepitüki ümber pinna, mis takistab hallituse teket isegi siis, kui niiskuse ja temperatuuri tingimused võivad põhjustada hallituse tekkimist muudel isolatsioonimaterjalidel. [11]

Tänu kanepivarre rakustruktuurile ja seinas olevate üksikute kanepitükkide loodud maatriksstruktuurile koos lubjasideaine omadustega on kanepibetoonseinal hea võime niiskust imada ja eraldada [8]. Selline niiskuse salvestusmaht on väga kasulik, võimaldades materjalil niiskust omastada ja vabastada, kui asjaolud seda võimaldavad [11].

SUMMARY

In this thesis the hygroscopic performance of hempcrete was studied. In view of the tests and results carried out, the objectives initially set have been met. Before the first test, test specimens needed treating, as some of them had to be carbonated. They also had to be monitored for a short time in the climate chamber, as the instructor had previous experience with unstable mass of non-carbonated lime plaster. The first test was determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. The aim of the test was that specimen, waterproofed from sides and dried to constant weight, were placed in distilled water at a depth of 5 to 10 mm for a specified time and their weight gain was determined. Second test was determination of water vapour transmission properties with cup method. The simplified principle of the test was that the test piece, together with a cylindrical cup containing a certain amount of KNO₃ solution at the bottom, formed an enclosed space through which only steam could pass. During the test, specimen were in a climate chamber. Third test was determination of hygroscopic sorption properties. Test specimen were dried and climate chamber was used to create different levels of moisture content. The following standards were followed in the experiments: EVS-EN 1015-18:2005 (*Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*) [31], EVS-EN ISO 12572:2016 (*Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method.*)[33] and EVS-EN ISO 12571:2021 (*Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties.*) [34].

The broken faces of water absorption specimen were extremely unsmooth therefore 10mm immersion depth was followed. Surface absorption coefficients after 10-90 minutes were received as 1,41-1,90 kg/(m²min^{0.5}). After the 24 hour weighing, the test pieces were cut in half and it was determined that the samples were saturated with water. The time of saturation was not recorded. Fine specimen values were received $A_w = 1.86$ ja 1.9 kg/(m²min^{0.5}). For coarse material the values were $A_w = 1.41$ ja 1.45 kg/(m²min^{0.5}). Carbonation did not influence water absorption properties.

For the water vapor transmission test, the author prepared 20 test specimens from existing hempcrete discs. The hempcrete test specimens made of small fraction proved to be much smoother and thus more reliable in terms of results. Coarse specimen were slightly uneven. The non-carbonated specimens presented similar values ($\mu = 3,8$ for fine and $\mu = 4,0$ for coarse) despite the production type. The highest value ($\mu=4,4$) was presented by carbonated

coarse and the lowest ($\mu=3,5$) was presented by fine hempcrete specimen. It is remarkable for fine carbonated material, because it had the highest density.

For sorption test, evenly spaced measuring points were RH=30, 50, 75 and 95%. At low Rh conditions RH=30%, values were in range of MC= 2.4 – 3.1%. At critical level for building materials (RH=75%) coarse carbonated MC=7.0% and coarse MC=6.6%. The fine material presented MC=5.4% and 5.3% accordingly. At 50% the coarse specimens showed MC=4.3% and coarse carbonated MC=4.6%. At the same relative humidity fine presented only MC=3.5-3.6%. At the highest possible level offered by climate chamber RH=95% fine and both coarse fractions were in the same range of values (MC=14.9-16.0%). At RH=95% fine carbonated specimen had clearly lower value (MC=12.2%). Desorption values at RH=30%, RH=50% and RH=75% were 2-3% higher. As the densities were different, the moisture content per cubic metre was calculated for fine specimens at RH=50% as $3.5\% \cdot 361 = 12.6 \text{ kg/m}^3$ and the carbonated coarse $4.6\% \cdot 245 = 11.3 \text{ kg/m}^3$ which were quite similar. At RH=75% the results were 19.5 and 17.1 kg/m^3 . Maximum moisture content per cubic metre was at RH=95% and results were 55.6 kg/m^3 for fine and 37.1 kg/m^3 for coarse specimen.

Because of its porous structure, hemp hurds are able to store great deal of moisture, like all of the plant fiber options. Moisture is absorbed from the environment onto the large internal surface area, where it is absorbed into the cellular structure. The advantage of hempcrete over conventional insulation and other plant fiber materials is found in properties of the lime binder. Lime has a high PH and is inherently antimicrobial and antifungal. The lime coating around pieces of hemp hurd creates a surface that prevents the development of mold even when humidity and temperature conditions would cause mold to occur on other insulation materials.[11]

Thanks to the cell structure of hemp stalk and the matrix structure created by individual pieces of hemp together with lime binder properties, hempcrete wall has good ability to absorb and release moisture [8]. This moisture storage capacity is very useful, allowing the material to absorb and release moisture when circumstances allow [11].

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] Arrigoni, A., Dotelli, G., Melià, P., Pelosato, R., Ruggieri, G., Sabbadini, S. (2017) Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. Loetud aadressil: www.elsevier.com/locate/jclepro

[2] Lawrence, M. et al.(2012) Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building, Key Engineering Materials. Loetud aadressil https://www.academia.edu/12100922/Hygrothermal_performance_of_an_experimental_hemp_lime_building

[3] Sirelpuu, H. (2020). Looduskivist ja põletatud savitellistest kombineeritud müüritiste desalineerimine. *Desalination of masonry combined with natural stone and fired clay brick*. (Ehitusinseneriõppe lõputöö). Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti.

[4] Pau, M. (2021). Pärandit hoides ja sünteesides: maakivimüüride seespoolne soojustamine kanepibetoniga Mooste mõisa tall-tõllakuuri näitel. (Magistritöö). Tartu Ülikooli Viljandi Kultuuriakadeemia, Viljandi, Eesti.

[5] Raamets, J.; Lokko, L.; Ruus, A.; Kalamees, T.; Muoni, K. (2021). Assessment of moisture and mould of hempcrete and straw panels. *Journal of Physics: Conference Series: 8th International Buildings Physics Conference 2021, Copenhagen, 25-27 August 2021*. IOP Publishing. (2069). DOI: 1742-6596/2069/1/012194.

[6] Konverents IBPC2021, Loetud aadressil: <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/2069/1>

[7] Kennedy, J. F., Smith, M. G., Wanek, C. (2014). The Art of Natural Building-Second Edition-Completely Revised, Expanded and Updated: Design, Construction, Resources. New Society Publishers. Loetud aadressil: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.utlib.ut.ee/lib/tartu-ebooks/detail.action?docID=5180757&query=hempcrete>

[8] Sparrow, A., Stanwix, W. (2014). The hempcrete book: Designing and building with hemp-lime. Green books, Cambridge.

[9] Robinson, R. (1996) The Great Book of Hemp: The complete guide to the environmental, commercial, and medicinal uses of the world's most extraordinary plant. Park Street Press: Rochester, VT.

[10] Realla (2022) Loetud aadressil: <https://www.realla.co.uk/details/20183949>

[11] Magwood, C. (2016). Essential hempcrete construction: The complete step-by-step guide. New Society Publishers. Loetud aadressil: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.utlib.ut.ee/lib/tartu-ebooks/detail.action?docID=4547884&query=hempcrete>

[12] ERS (2000). Industrial Hemp in the United States: Status and market potential. Loetud aadressil: https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/41740/15867_ages001e_1.pdf?v=331.4

[13] Dofing, S., Donaldson, E., Schillinger, W., (2000). Straw Production and Grain Yield Relationships in Winter Wheat. Loetud aadressil : <http://pnwsteep.wsu.edu/tillagehandbook/chapter3/032100.htm>

[14] Clark, E. L. (2011). Cannabis Sativa for Health and Hemp. Noca Science Publishers, Inc., New York. Loetud aadressil: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.utlib.ut.ee/lib/tartu-ebooks/detail.action?docID=3022686&query=industrial+hemp>

[15] Čekon, M., Kalousek, M. (2014). enviBuild 2014. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. Loetud aadressil: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.utlib.ut.ee/lib/tartu-ebooks/reader.action?docID=1910977&query=hempcrete>

[16] Lagerblad, B.(2005). Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - State of the art, no. 2. 2005.

[17] Woolley, T. (2013). Low impact building: Housing using renewable materials. John Wiley & Sons, Ltd., Publications. Loetud aadressil: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.utlib.ut.ee/lib/tartu-ebooks/reader.action?docID=1116234&query=hempcrete>

[18] Japanhemp, Loetud aadressil: <http://www.japanhemp.org/en/miasahouse.htm>

[19] Amziane, S., Arnaud, L. (2013). Bio-aggregate-based building materials : Applications to hemp concretes. John Wiley & Sons, Ltd., Publications. Loetud aadressil: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.utlib.ut.ee/lib/tartu-ebooks/reader.action?docID=1124006&query=hempcrete>

[20] Ukhempcrete (2022) <https://www.ukhempcrete.com/gallery/gallery-hempcrete/>

[21] De Herde, A., Evrard, A. (2005). Bioclimatic envelopes made of lime and hemp concrete. CISBAT 2005 Renewables in a Changing Climate: Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems

[22] Mukherjee, A. (2012). Structural benefits of hempcrete infill in timber stud walls. Queeni ülikool, Kingston, Ontario, Kanada. Loetud aadressil: https://qspace.library.queensu.ca/bitstream/handle/1974/6986/Mukherjee_Agnita_201201_MASC.pdf;jsessionid=5EEDF185DCB7E7CC25A3D04A63802BD5?sequence=1

[23] Progressivefoam, Loetud aadressil: <https://www.progressivefoam.com/what-is-r-value/>

[24] Onlinelibrary, Loetud aadressil: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118259900.app1>

[25] Pau, M., (2017) Kanepibetonsegude tutvustus ja katsetamine Eesti kliimas. Lõputöö Viljandi, Eesti, Loetud aadressil: https://woodhouse.ee/static/Kanepibetonsegude_tutvustus_ja_katsetamine_Eesti-kliimas_Markus_Pau.pdf

- [26] Hemptiture (2022) Loetud aadressil: <https://www.hempitecture.com/post/1st-hempcrete-build-of-2020>
- [27] Ukhempcrete, Loetud aadressil: <https://www.ukhempcrete.com/gallery/williams-den/>
- [28] Pau, M.; Kalamees, T.; Kallavus, U. (2021). *Hygrothermal performance of a massive stone wall insulated from the inside with hemp concrete – field measurements in cold climate. Journal of Physics: Conference Series: 8th International Buildings Physics Conference 2021, Copenhagen, 25-27 August 2021*. IOP Publishing, #012068. (2069). DOI: 10.1088/1742-6596/2069/1/012068.
- [29] Tuutti, K., (1982) *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute
- [30] Puustusmaa, L., (2016) Mittetäielikult karboniseerunud lubikrohvi niiskustehniliste omaduste uurimine: pinnakatete mõju sorptsioonile ja desorptsioonile ning veeauru läbilaskvusele (Magistritöö) Tallinna Tehnikaülikool, Tartu, 2016
- [31] EVS-EN 1015-18:2005 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 18: Kivistunud mördi kapillaarse veeimavuse koefitsendi määramine. Loetud aadressil : <https://www.evs.ee/et/evs-en-1015-18-2005>
- [32] EVS-EN ISO 12570:2000 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of moisture content by drying at elevated temperature. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-12570-2000>
- [33] EVS-EN ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-12572-2016>
- [34] EVS-EN ISO 12571:2021 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-12571-2021>

[35] Altmäe, E., Raamets, J., Ruus, A., Tungel, E., (2018) "Determination of Clay-Sand Plaster Hygrothermal Performance: Influence of Different Types of Clays on Sorption and Water Vapour Permeability.," *Cold Climate HVAC2018 9th International Cold Climate Conference Sustainable new Renovation Buildings Cold Climate Kiruna - Sweden 12-15, March 2018*

[36] Ruus, A., Koosapoeg, T., Pau, M., Kalamees, T., Põldaru, M., (2021). Influence of production on hemp concrete hygrothermal properties: sorption, water vapour permeability and water absorption. *8th International Building Physics Conference - IBPC2021 (25-27 August 2021. Copenhagen, Denmark), 2021.*

LISAD

LISA 1 Veeimavuse katse algandmed, veeimavuse kaaluandmed 10 minuti, 90 minuti ja 24h pärast (g)

	Katsekeh a nr	Enne katset	10 min	90min	24h
Katse kuupäev		2/22/2021	2/22/2021	2/22/2021	2/23/2021
Peenklotsid	1A	64.382	88.329	108.074	117.05
	1B	66.497	90.816	110.952	120.98
	2A	61.112	84.357	100.832	112.296
	2B	60.237	83.209	98.551	110.427
	3FA	65.185	89.864	110.29	121.129
	3FB	66.048	90.854	110.616	121.568
Jämeklotsid	1A	49.042	69.616	83.2	97.168
	1B	48.573	70.496	84.877	97.755
	2A	49.243	71.048	85.204	97.728
	2B	50.319	73.592	88.221	99.49
	3A	47.391	64.771	78.114	92.596
	3B	46.205	63.632	78.397	92.102
Karboniseeritud peenklotsid	1CA	64.054	89.051	106.889	118.136
	1CB	61.952	86.184	102.942	115.05
	F2FCA	67.111	91.762	113.166	124.375
	F2FCB	66.929	92.338	112.985	124.664
	3CA	63.865	88.274	105.776	118.411
	3CB	65.376	90.028	109.758	121.916
Karboniseeritud jämeklotsid	1CA	48.926	69.77	84.094	98.953
	1CB	48.813	73.383	87.018	100.386
	2CA	50.998	74.211	89.304	104.997
	2CB	48.936	68.868	83.891	97.2
	3FCA	48.228	69.496	83.477	95.746
	3FCB	49.113	70.47	85.438	97.678

**Lisa 2 Veeauru läbivuse katsekehade algandmed ja andmed perioodil
10.02 kuni 12.02 (g)**

Katsekeh a nr	KNO3	hommik	õhtu	hommik	õhtu	hommik	õhtu
Kuupäev	2/9/2021	2/10/2021	2/10/2021	2/11/2021	2/11/2021	2/12/2021	2/12/2021
2	738.701	738.161	737.454	736.652	735.782	734.913	734.042
3	734.241	733.667	732.871	731.948	730.946	729.92	728.889
4f	743.959	743.483	742.811	742.037	741.227	740.446	739.609
5f	739.356	738.881	738.189	737.386	736.692	735.901	735.119
6f	736.022	735.515	734.796	733.968	733.219	732.471	731.683
2	719.166	715.161	714.431	713.576	712.497	711.237	710.049
3	719.244	717.643	716.949	716.052	715.06	714.106	713.027
4	715.715	713.363	712.565	711.719	710.902	709.959	708.94
5	710.547	710.075	709.482	708.809	708.159	707.444	706.744
6	714.06	713.444	712.833	712.184	711.242	710.327	709.405
1FPC	734.285	733.253	729.19	727.824	726.087	724.563	722.378
2FPC	728.996	728.204	727.159	725.44	723.596	721.395	719.545
3C	734.585	734.079	732.919	732.106	730.754	729.566	728.406
5C	741.762	741.236	740.453	739.538	738.107	734.008	732.557
6C	732.42	731.891	731.153	728.626	727.474	726.391	725.405
1FJC	731.221	730.897	730.338	729.669	728.901	728.107	727.361
2FJC	726.055	725.715	725.092	724.39	723.611	722.821	722.056
3FC	711.256	710.937	710.379	709.733	708.968	708.274	707.563
5C	707.315	706.998	706.383	705.748	705.003	704.291	703.532
6C	743.56	743.28	742.75	742.182	741.414	740.591	739.818

LISA 3 Veeauru läbivuse katsekehade algandmed ja andmed perioodil 13.02 kuni 15.02 (g)

Katsekeha nr	hommik	õhtu	hommik	õhtu	hommik	õhtu
Kuupäev	1/13/2021	2/13/2021	2/14/2021	2/14/2021	2/15/2021	2/15/2021
2	733.211	732.335	731.324	730.526	729.68	728.885
3	727.947	726.973	725.828	724.948	724.037	723.105
4f	738.819	738.014	737.161	736.414	735.622	734.839
5f	734.392	733.615	732.795	732.076	731.316	730.557
6f	730.922	730.138	729.324	728.585	727.807	727.03
2	708.852	707.763	706.659	705.771	704.801	703.754
3	712.133	711.243	710.364	709.518	708.687	707.724
4	707.942	706.933	705.928	705.104	704.144	703.151
5	706.079	705.383	704.633	703.978	703.298	702.585
6	708.574	707.787	706.876	706.169	705.38	704.636
1FPC	721.327	720.317	719.223	718.337	716.903	716.08
2FPC	717.278	716.15	715.055	714.175	709.095	708.121
3C	727.275	725.759	724.724	723.651	722.684	721.848
5C	726.922	725.962	724.242	722.973	721.996	720.949
6C	724.454	720.234	718.745	717.288	716.436	715.442
1FJC	726.619	725.897	725.091	724.388	723.576	722.775
2FJC	721.308	720.575	719.771	719.077	718.307	717.57
3FC	706.881	706.15	705.435	704.792	704.055	703.368
5C	702.778	702.03	701.248	700.565	699.849	699.148
6C	739.039	738.285	737.482	736.823	736.075	735.364

**Lisa 4 Veeauru läbivuse katsekehade algandmed ja andmed perioodil
16.02 kuni 18.02 (g)**

Katsekeha nr	hommik	õhtu	hommik	õhtu	hommik	õhtu
Kuupäev	2/16/2021	2/16/2021	2/17/2021	2/17/2021	2/18/2021	2/18/2021
2	728.008	727.282	726.439	725.558	724.764	723.992
3	722.163	721.243	720.333	719.383	718.466	717.627
4f	734.012	733.268	732.508	731.719	730.631	729.388
5f	729.729	728.979	728.173	727.325	726.153	725.074
6f	726.226	725.454	724.702	723.892	723.08	722.283
2	702.837	702.016	701.082	700.201	699.188	697.888
3	706.791	705.807	705.006	704.208	703.091	702.0
4	702.328	700.627	699.295	698.356	697.131	695.842
5	701.855	701.151	700.475	699.766	699.062	698.324
6	703.893	703.102	702.323	701.582	700.735	699.892
1FPC	715.156	714.334	713.499	712.618	711.695	710.672
2FPC	707.164	706.315	705.439	704.548	703.616	702.42
3C	720.924	719.995	719.039	718.083	717.141	716.163
5C	720.045	719.228	718.389	717.559	716.515	715.496
6C	714.593	713.725	712.881	712.007	710.527	709.024
1FJC	721.997	721.12	720.234	719.482	718.574	717.678
2FJC	716.866	716.071	715.327	714.632	713.783	712.835
3FC	702.612	701.915	701.183	700.417	699.699	698.839
5C	698.466	697.687	696.895	696.188	695.186	694.206
6C	734.692	733.889	733.159	732.476	731.577	730.313

Lisa 5 Sorptsiooni katsekehade kaal kuivatatult, peale katse algust 30% ja 50% niiskustingimuse juures (g)

Katsekeha nr	Kuivatatud	30%			50%			
kuupäev	2/19/2021	2/20/2021	2/21/2021	2/22/2021	2/23/2021	2/24/2021	2/25/2021	2/26/2021
1a	19.576	19.981	19.999	20.004	20.19	20.197	20.214	20.196
1b	16.112	16.455	16.468	16.473	16.632	16.638	16.651	16.638
1c	16.36	16.693	16.708	16.713	16.866	16.873	16.885	16.883
1d	16.387	16.724	16.738	16.744	16.899	16.906	16.919	16.922
1a	10.977	11.243	11.254	11.258	11.372	11.381	11.389	11.383
1b	12.076	12.375	12.387	12.392	12.522	12.532	12.541	12.53
1c	12.607	12.931	12.942	12.949	13.088	13.104	13.112	13.107
1d	10.286	10.535	10.547	10.552	10.66	10.668	10.677	10.681
4ca	15.06	15.403	15.412	15.418	15.559	15.579	15.581	15.573
4cb	16.801	17.168	17.177	17.187	17.337	17.36	17.361	17.354
4cc	15.853	16.203	16.212	16.222	16.363	16.383	16.387	16.388
4cd	16.423	16.779	16.788	16.796	16.943	16.963	16.967	16.977
4ce	14.136	14.509	14.518	14.525	14.677	14.71	14.708	14.698
4cf	12.812	13.182	13.19	13.195	13.349	13.381	13.379	13.371
4cg	12.739	13.086	13.093	13.098	13.239	13.269	13.266	13.264
4ch	12.333	12.659	12.666	12.672	12.802	12.829	12.829	12.838

Lisa 6 Sorptsiooni katsekehade kaal (g) katsetingimustes 75% ja 95%

Katsekeha nr	75%				95%			
kuupäev	2/27/2021	2/28/2021	3/1/2021	3/2/2021	3/3/2021	3/4/2021	3/5/2021	3/6/2021
1a	20.479	20.508	20.507	20.521	21.485	21.787	22.124	22.125
1b	16.883	16.908	16.908	16.918	17.92	18.258	18.516	18.56
1c	17.112	17.137	17.136	17.148	18.109	18.389	18.641	18.687
1d	17.152	17.178	17.175	17.19	18.253	18.541	18.756	18.811
1a	11.559	11.597	11.58	11.604	12.186	12.299	12.474	12.431
1b	12.737	12.78	12.76	12.788	13.465	13.674	13.763	13.798
1c	13.336	13.381	13.361	13.389	14.171	14.462	14.58	14.655
1d	10.836	10.878	10.857	10.883	11.474	11.593	11.673	11.693
4ca	15.843	15.828	15.854	15.826	16.643	16.66	16.811	16.762
4cb	17.638	17.626	17.656	17.625	18.509	18.59	18.739	18.719
4cc	16.658	16.646	16.67	16.643	17.491	17.549	17.681	17.66
4cd	17.239	17.227	17.253	17.226	18.01	18.103	18.227	18.236
4ce	14.989	14.996	15.01	14.994	15.796	15.812	15.96	15.884
4cf	13.692	13.696	13.708	13.688	14.912	15.031	15.224	15.15
4cg	13.536	13.543	13.553	13.536	14.517	14.567	14.712	14.647
4ch	13.072	13.081	13.089	13.081	13.815	13.893	14.008	13.976

Lisa 7 Katsekehade desorptsioon (g)

Katsekeha nr	75%					30%	
kuupäev	3/7/2021	3/8/2021	3/9/2021	3/10/2021	3/11/2021	3/12/2021	3/13/2021
1a	21.176	21.12	21.091	20.765	20.745	20.738	20.549
1b	17.493	17.431	17.4	17.098	17.082	17.073	16.913
1c	17.726	17.677	17.64	17.366	17.347	17.34	17.186
1d	17.75	17.7	17.663	17.378	17.354	17.352	17.196
1a	11.883	11.88	11.835	11.658	11.635	11.642	11.522
1b	13.067	13.066	13.019	12.808	12.783	12.792	12.654
1c	13.711	13.688	13.635	13.383	13.358	13.365	13.215
1d	11.131	11.123	11.082	10.915	10.894	10.904	10.789
4ca	16.174	16.093	16.112	15.847	15.841	15.824	15.677
4cb	18.07	17.983	17.997	17.707	17.705	17.688	17.527
4cc	17.032	16.946	16.962	16.693	16.693	16.679	16.528
4cd	17.641	17.556	17.573	17.296	17.298	17.279	17.124
4ce	15.281	15.217	15.219	14.943	14.937	14.925	14.767
4cf	13.993	13.915	13.913	13.587	13.582	13.571	13.41
4cg	13.773	13.711	13.709	13.448	13.442	13.433	13.29
4ch	13.353	13.301	13.295	13.055	13.046	13.039	12.901