



TALLINNA TEHNICAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**POLÜURETAAANLIIMIDEGA VALMISTATUD
INSENERIPUIDU LIIMVUUGI TULEPÜSIVUS
FIRE RESISTANCE OF ENGINEERED WOOD BOND
LINES MADE WITH POLYURETHANE ADHESIVES**

Lõputöö

Üliõpilane: Karl Magnus Vuuk

Üliõpilaskood: 182363

Juhendaja: Jane Liise Vihmann,
Doktorant - nooremteadur

Kaasjuhendaja: Alar Just, professor

Tallinn 2026

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.

/ kuupäev digiallkirjas /

Autor: Karl Magnus Vuuk

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

/ kuupäev digiallkirjas /

Juhendaja: Jane Liise Vihmann

/ allkirjastatud digitaalselt /

/ kuupäev digiallkirjas /

kaasjuhendaja: Alar Just

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

/ kuupäev digiallkirjas /

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS¹

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl Magnus Vuuk,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Polüuretaanliimidega valmistatud inseneripuidu liimvuugi tulepüsivus, mille juhendaja(d) on Jane Liise Vihmann ja Alar Just,

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.

24.05.2026

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Ehituse ja arhitektuuri instituut

Üliõpilane: Karl Magnus Vuuk, 182363

Õppekava, peaariala: EAEI02/17 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, ehitiste projekteerimine

Juhendaja(d): doktorant Jane Liise Vihmann, professor Alar Just

Lõputöö teema:

Polüuretaanliimidega valmistatud inseneripuidu liimvuugi tulepüsivus

Fire resistance of engineered wood bond lines made with polyurethane adhesives

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Võrrelda polüuretaanliimidega valmistatud ristkihtliimpuidu koonuskalorimeetri katseid kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas ja vaba hapniku juurdepääsuga keskkonnas
2. Võrrelda vaba hapniku juurdepääsuga keskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas koonuskuumuti katseid ahjukatsetega
3. Hinnata kahe liimitootja polüuretaanliimide tulepüsivust kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas ja vaba hapniku juurdepääsuga keskkonnas

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	TalTech Puidumaja koonuskalorimeetri katsed	09.02.2026
2.	Lundi Ülikooli koonuskalorimeetri katsed ja ahjukatsed	06.04.2026
3.	Katsete tulemuste analüüs ja töö vormistamine	25.04.2026

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 24.05.2026

Üliõpilane: Karl Magnus Vuuk..... ".....".....202....a
/allkiri/

Juhendaja: Jane Liise Vihmann..... ".....".....202....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Alar Just..... ".....".....202....a
/allkiri/

Programmijuht: Irene Lill ".....".....202....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
2. INSENERIPUIT	10
2.1 Puit konstruktsioonimaterjalina	10
2.1.1 Ristkihtliimpuit	10
2.1.2 Ristkihtliimpuidu tootmisprotsess.....	10
2.1.3 Ristkihtliimpuidu mehaaniline käitumine tavatingimustes	11
3. LIIMID PUITTOODETES.....	12
3.1 Sissejuhatus liimidesse	12
3.2 Puiduliimide liigid ja omadused	12
3.3 Liimvuugi käitumine kõrgetel temperatuuridel.....	13
3.4 Bio-põhised liimid ja tulevikusuunad	13
4. PUIDU TULEPÜSIVUS	15
4.1 Üldised põhimõtted.....	15
4.2 Tulepüsivuse projekteerimise alused ja regulatsioonid	15
4.2.1 Puitkonstruktsioonide tulepüsivuse arvutusmeetodid ja söestumismudelid ..	16
4.3 Tulekahju etapid ja puidu käitumine tules	17
4.3.1 Ristkihtliimpuidu tulepüsivus	18
4.4 Hapniku kontsentratsiooni mõju puidu pürolüüsile ja tulepüsivusele	19
4.5 Varasemad CLT tulepüsivuse katsed	19
5. PRAKTILINE OSA	21
5.1 Väikesemahulised katsed TalTechis ja Lundis	21
5.1.1 Tootja A liimid ja katsekehad	21
5.1.2 Tootja B liimid ja katsekehad	23
5.1.3 Koonuskalorimeetri ülesseadmine	25
5.1.4 Katsetamine Tootja A katsekehadega (TalTech)	27
5.1.5 Katsetamine Tootja A katsekehadega (Lund).....	29
5.1.6 Katsetamine Tootja B katsekehadega (Lund).....	30
5.1.7 Temperatuuri mõõtmised liimvuugis Tootja A katsekehadel (TalTech)	31

5.1.8 Tootja A katsekehade nihkekandevõime mõõtmised tavakeskkonnas	33
5.1.9 Temperatuuri mõõtmised liimvuugis kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas Tootja A katsekehadel (Lund).....	35
5.1.10 Tootja A katsekehade nihkekandevõime mõõtmised kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas.....	36
5.1.11 Tootja B katsekehade temperatuurimõõtmised kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas.....	37
5.1.12 Tootja B katsekehade temperatuurimõõtmised tavakeskkonnas.....	39
5.1.13 Tootja B katsekehade nihkekandevõime mõõtmised kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas.....	40
5.1.14 Tootja B katsekehade nihkekandevõime mõõtmised tavakeskkonnas.....	42
5.2 Ahjukatsed Tootja B katsekehadega	43
5.2.1 Tootja B ahjukatsete katsekehad	45
5.2.2 Ahjukatse ettevalmistamine	46
5.2.3 Tootja B ahjukatsete temperatuuri mõõtmised	47
5.3 Katsete võrdlev analüüs.....	53
5.3.1 Tootja A PUR 2 katsekehade temperatuurigraafikute võrdlus tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas	53
5.3.2 Tootja A PUR 2 katsekehade nihkekandevõime võrdlus tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas.....	56
5.3.3 Tootja B liimvuugi terviklikkuse võrdlus koonuskatsetes tava- ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas.....	57
5.3.4 Tootja B koonuskatsete ja ahjukatsete võrdlus	59
5.3.5 Tootja B 20 mm lamelli võrdlus 35 mm lamelliga	60
5.3.6 Tampere ahjukatsed võrreldes TalTechi ja Lundi koonuskatsetega Tootja A katsekehadega	61
5.4 Järeldused.....	62
KOKKUVÕTE	65
SUMMARY.....	66
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	68

EESSÕNA

Lõputöö teema valik sai alguse professor Alar Justi algatusel. Kaks liimitootjat olid tellinud oma uutele polüuretaanliimidele tulepüsivuse katseid ning tänu professor Alar Justi ja juhendaja Jane Liise Vihmanni panusele õnnestus need katsed siduda magistritöö raamesse. Nende abiga sõnastati ka käesoleva töö pealkiri.

Täna väga oma juhendajat Jane Liise Vihmanni põhjaliku juhendamise, konstruktiivse tagasiside ja toetuse eest kogu töö vältel. Sama suur tänu kuulub ka professor Alar Justile, kellelt sain olulisi nõuandeid ning motivatsiooni.

Eriline tänu Lundi Ülikooli vanemteadur Daniel Brandonile, kes oli katsete läbiviimisel suureks abiks ning jagas heldelt oma teadmisi nii ristkihtliimpuidu tulekäitumise kui ka katsetusmetoodika kohta. Lisaks tahan tänada Soome meeskonda, kes viisid läbi ahjukatsed Tootja A katsekehadega ning kelle tulemusi on käesolevas töös kasutatud võrdluseks.

1. SISSEJUHATUS

Praeguses keskkonnaolukorras on energiatõhus ja keskkonnasäästlik ehitamine väga aktuaalsed teemad. Ehitustööstus omab väga suurt süsiniku jalajälge, mistõttu otsitakse võimalusi kasutada rohkem bioloogilisi materjale, millel on väiksem negatiivne mõju keskkonnale. Üheks selliseks materjaliks on puit, mille kasutusajalugu ehitusvaldkonnas ulatub sajandite taha.

Puit kui konstruktsioonimaterjal omab häid mehaanilisi omadusi, ei tekita kasvuhoonegaase ja on täielikult taastuv loodusvara. Sellel on kõrge tugevuse-massi suhe ning suur jäikus pikikiudu. Lihtne töödeldavus võimaldab valmistada erineva kuju ja suurusega elemente ning kombineerida seda teiste tuntud materjalidega nagu näiteks teras või betoon. Samas on tegemist looduslikult kasvanud anisotroopse ehitusmaterjaliga – omadused võivad olla varieeruvad ning sõltuvad kasvutingimustest ja koormuse suunast. [1]

Lisaks mehaanilistele omadustele on puitmaterjali kasutamisel ehituses oluline arvestada selle käitumisega tulekahjuolukorras. Tulepüsivus on sageli määrav tegur materjali valikul kandekonstruktsioonides. Puidu tulepüsivus sõltub elemendi ristlõikest, mis tähendab, et suurem ristlõige põleb kauem ning on seetõttu parema tulepüsivusega.

Puidu omaduste paremaks ärakasutamiseks ja suuremate ristlõigetega elementide valmistamiseks on arendatud mitmesuguseid erinevaid inseneripuidu materjale, millest üks tähtsamaid on ristkihtliimpuit (edaspidi ka CLT). See koosneb mitmest ristisuunaliselt liimitud puidukihist, mis parandab materjali geomeetria stabiilsust ning võimaldab kanda koormusi eri suundades. [2] [3]

Ristkihtliimpuidu tootmisel kasutatakse kihtide omavaheliseks sidumiseks erinevaid liime. Liim ja puit moodustavad omaette komposiitmaterjali, mille omadusi ei saa võtta võrdseks puidu või liimi omadega. Liimvuugi mehaanilised omadused sõltuvad kasutatava liimi tüübist, puidu niiskussisaldusest ja pinnatöötlustest. [4]

Tulekahju olukorras on liimvuugi terviklikkus kriitilise tähtsusega, sest söestunud kihi eraldumise korral on järgnevad kihid tulele avatud ning see kiirendab elemendi edasist põlemist. Selline liimvuugi lagunemine võib vähendada konstruktsiooni kandevõimet oluliselt.

Praktilises osas viidi läbi polüuretaanliimidega valmistatud ristkihtliimpuidu tulekatsed Taltech'i puidumaja ning Rootsis Lundi Ülikooli tulelaborites. Uuringus kasutati kahte katsemeetodit: väikemahulisi tulekatseid koonuskalorimeetriga (edaspidi ka koonuskuumuti) kui ka ahjukatseid.

Magistritöö eesmärk on võrrelda kontrollitud hapnikusisaldusega katsemeetodit nii ahjukatsete kui ka nn tavatingimustes ehk vaba hapniku juurdepääsuga (edaspidi nimetatud tavakeskkond) koonuskuumutikatsetega. Töö võrdleb katsete tulemusi Soomes Tampere Ülikoolis läbiviidud ahjukatsetega. Lisaks annab hinnangu kahe liimitootja uute polüuretaanliimide tulepüsivusele nii tavatingimistustel kui ka kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas ning pakub välja võimalusi väikesemahuliste katsete katsemeetodi parendamiseks edasiseks, et tõsta nende usaldusväärsust ja rakendatavust tulepüsivuse hindamisel.

Võtmesõnad: ristkihtliimpuit, polüuretaanliimid, tulepüsivus

2. INSENERIPUIT

2.1 Puit konstruktsioonimaterjalina

Puit on laialdaselt levinud looduslik ning täielikult taastuv ehitusmaterjal. Mehaaniliste omaduste poolest iseloomustab seda materjali hea tugevuse ja kaalu suhe ning keskkonnasõbralikkus. Puit on anisotroopne materjal, mille mehaanilised omadused sõltuvad koormuse suunast kiudude suhtes. Pikikiudu on puitmaterjali tugevus ja jäikus oluliselt suuremad kui ristikiudu, mis tuleneb puidu rakustruktuurist ja tselluloosikiudude orientatsioonist. Tänapäeval on ehituses kasutuses mitmesugused inseneripuidu tooted, mis vähendavad loodusliku puidu omaduste varieeruvusest tulenevaid piiranguid. Inseneripuidu hulka kuuluvad näiteks liimpuit, ristkihtliimpuit, mida iseloomustavad kihiline struktuur ja kiudude suund. Lisaks sõrmjätkatud konstruktsioonipuit, I-talad ja lamineeritud vineerpuit ehk LVL. [1]

Inseneripuidu tootmisel sorteeritakse ning klassifitseeritakse puitmaterjal enne töötlemist. See liigitab materjali erinevatesse tugevusklassidesse ning tagab vajaliku tugevuse 95 % tõenäosusega. [1]

2.1.1 Ristkihtliimpuit

Ristkihtliimpuit on inseneripuidu materjal, mis koosneb mitmest üksteise suhtes risti paigutatud ja omavahel liimitud puidukihtidest. Tavaliselt koosneb ristkihtliimpuidu element paaritust arvust kihtidest. [3]

Ristkihtstruktuur annab materjali mõõtmetele hea stabiilsuse ning võimaluse kanda koormusi nii tasapinnas kui tasapinnast väljas. Kihtide jäik ühendus liimvuukide kaudu loob sellest tugeva komposiitmaterjali. Seetõttu kasutatakse ristkihtliimpuitu laialdaselt seinte, põrandate ja katuseelementidena. [3][12]

CLT arengul on olnud suur roll puidu kasutuse suurenemisel ehituses, võimaldades konkureerida teiste traditsiooniliste ehitusmaterjalidega nagu betoon ja teras. Viimasel paaril aastakümnel on CLT kasutus kiiresti kasvanud ning sellest on saanud üks peamisi puitkonstruktsioonimaterjale. [3]

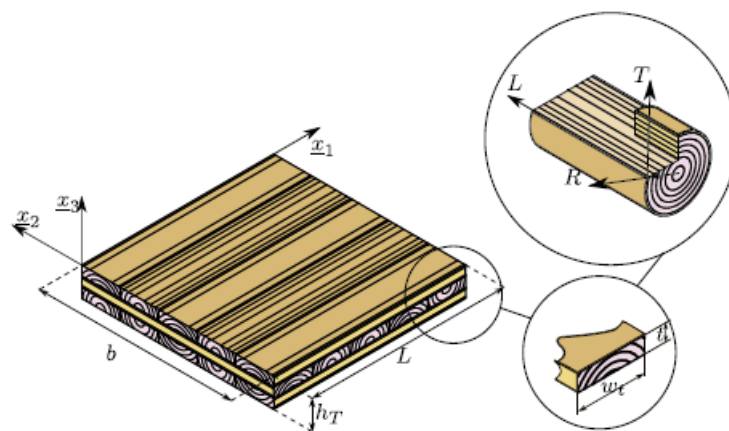
2.1.2 Ristkihtliimpuidu tootmisprotsess

CLT tootmine on mitmeetapiline ja sarnaneb suures osas liimpuidule. Protsess algab kuivatatud ja tugevussorteeritud saematerjalist, mis hõõveldatakse ning liimitakse lamellideks. Vajadusel saab lamelle ühendada sõrmjätkudega, et valmistada suuremaid elemente. [3][12]

Lamellide pinnale kantakse liim ning kihid pressitakse kokku kasutades hüdraulilisi või vaakumpresse. Pressimise kestus ja intensiivsus sõltub kasutatavast liimist, puiduliigist ja tootmisprotsessist. Peamiselt kasutatakse okaspuitu nagu kuusk, kuid vahel ka lehtpuitu, et tõsta teatud mehaanilisi omadusi nagu näiteks jäikust. [3][12]

2.1.3 Ristkihtliimpuidu mehaaniline käitumine tavatingimustes

Ristkihtliimpuidu (CLT) tugevusomadused on erinevad pikisuunalises (L), radiaalses (R) ja tangentsiaalses (T) suunas. Kõige kriitilisem on rullnihke all purunemine radiaalses ja tangentsiaalses suunas, kus puidukiud keerduvad ja purunevad paneeli ristkihis, kuna nihketugevus nendes suundades on väga madal võrreldes pikikiudu suunaga. [17][18]



Joonis 1 Kohalikud ja globaalsed koordinaatsüsteemid ning ristkihtliimpuidu paneeli mõõtmed [17]

Purunemispind rullnihke korral on sageli lainetav või astmeline ning kulgeb umbes 45 kraadise nurga all peapingete suhtes. [17]

3. LIIMID PUITTOODETES

3.1 Sissejuhatus liimidesse

Puiduliimid on kaaseagsete puitkonstruktsioonide ja inseneripuidu tootmise keskne komponent, mis võimaldab väikemõõdulisi puiduelemente liita suuremateks ja mehaaniliselt tugevamateks konstruktsioonelementideks. Liimide kasutamine on loonud eeldused liimpuidu ja ristkihtliimpuidu arenguks ning nende laialdaseks rakendamiseks ehituses. Ülemaailmne puiduliimide kasutamine ulatub kümnetesse miljonitesse tonnidesse aastas, mis rõhutab nende tähtsust nii tehnoloogiliselt kui ka majanduslikust aspektist. [4][10]

Ehituskonstruktsioonides kasutatavad liimid peavad andma välja sellise tugevuse ja vastupidavuse, et liite terviklikkus säiliks nõuetekohase tulepüsivusaja kestel. [5]

Lisaks konstruktiivsele rollile võimaldavad liimid optimeerida materjalikasutust, vähendades seeläbi jäätmeid ning võimaldades kasutada madalama kvaliteediga toorainet. Liimvuugid on seetõttu oluline osa jätkusuutlikust ehitusest ning puidupõhiste materjalide laialdasest kasutamisest, aidates vähendada CO₂ jalajälge võrreldes terase või betooniga. [10][13]

3.2 Puiduliimide liigid ja omadused

Puidutööstuses on kasutuses mitmesuguseid erinevaid liime, mille valik sõltub rakendusest, keskkonnatingimustest ja nõutavatest omadustest. Levinumad liimid on karbamiid-formaldehüüdlimid (UF), fenool-formaldehüüdlimid (PF), melamiin-formaldehüüdlimid (MF), polüuretaanliimid (PUR), fenool-resortsinool-formaldehüüdlimid (PRF), emulsioonpolümeer-isotsüanaatliimid (EPI) ning polüvinüülatsetaatliimid (PVAc). [10]

UF liimid on turul domineerivad tänu madalale hinnale ja headele tehnoloogilistele omadustele, kuid nende kasutust piiravad niiskuskindlus ja formaldehüüdi emissioon. Konstruktsioonilistes elementides nagu näiteks liim- ja ristkihtliimpuit kasutatakse sagedamini PF ja PRF liime, mis tagavad parema vastupidavuse keskkonnamõjudele ja pikaajalise töökindluse. [10]

Polüuretaanliimid (PUR) on viimastel aastakümnetel CLT tootmises populaarsust kogunud, eriti Euroopas ja Põhja-Ameerikas. Ühekomponendilised PUR liimid kõvenevad niiskuse toimetel toatemperatuuril, on formaldehüüdivabad ning pakuvad head naket erinevate puiduliikidega. Need on vähem tundlikud puidu niiskussisaldusele, mis

muudab nende töötlemisaega pikemaks võrreldes traditsiooniliste formaldehüüd liimidega. PUR liimid sobivad hästi ristkihtliimpuidu tootmiseks, sest nad täidavad kergesti tühimikke ning tagavad hea mehaanilise tugevuse kuivades tingimustes. Nende piiranguks on see, et kõrgetel temperatuuridel kaotavad nad tugevust kiiremini kui PF/PRF/MUF liimid, mis võib viia kihtide langemiseni. Uuemad PUR liimide tooted püüavad seda puudust vähendada. [13][14][15][16]

3.3 Liimvuugi käitumine kõrgetel temperatuuridel

Puiduliimide käitumine kõrgetel temperatuuridel on oluline tegur puitkonstruktsioonide tulepüsivuse seisukohalt. Temperatuuri tõustes väheneb liimvuugi mehaaniline tugevus, mis võib viia liimvuugi purunemiseni või kihtide eraldumiseni. Varasemad katsed on näidanud, et liimvuugi kandevõime sõltub otseselt temperatuurist ning võib oluliselt väheneda juba enne puidu enda täielikku söestumist.

Koonuskuumutis läbiviidud katsed näitavad, et liimvuugi temperatuur saavutab kriitilise taseme suhteliselt kiiresti ning liimvuugi purunemine võib toimuda vahetult söestunud kihi taga. See käitumine on oluline, kuna see määrab kas konstruktsioon säilitab oma terviklikkuse või toimub kihtide eraldumine.

Üheks olulisemaks nähtuseks tulekahjuolukorras on delaminatsioon ehk lamellide eraldumine. See juhtub, kui liim kaotab sidususe kõrgel temperatuuril ning selle tagajärjel eemaldub söestunud pindmine puidulamell, mille tulemusena paljastub uus puidukiht ja põlemisprotsess muutub veel intensiivsemaks. [6]

Delaminatsiooni mõju sõltub ka konstruktsiooni ülesehitusest, kihtide paksusest ja arvust. Kui söestunud kihid ei eraldu, on söestumiskiirus suhteliselt konstantne, kuid eraldumisel võib põlemisprotsess kiirenedada. [6]

Liimide käitumise hindamiseks tulekahjuolukorras on välja töötatud standardiseeritud katsemeetodid, mis võimaldavad määrata liimvuugi tugevuse vähenemist kõrgetel temperatuuridel.

3.4 Bio-põhised liimid ja tulevikusuunad

Keskkonnanõuete karmistumise tõttu on suurenenud huvi bio-põhiste liimide vastu, mille toorainena kasutatakse näiteks ligniini, tanniine ja valke. Need liimid on keskkonnasõbralikumad, aga kasutus piiratud madalama vastupidavuse ja suurema varieeruvuse tõttu. [10]

Tulevikus on oluline arendada liime, mis ühendavad hea mehaanilise tugevuse, madala keskkonnamõju ning kõrge vastupidavuse temperatuuridele. [10]

4. PUIDU TULEPÜSIVUS

4.1 Üldised põhimõtted

Puit on põlev ehitusmaterjal, mis seab selle kasutamisele kandekonstruktsioonides ranged tuleohutusnõuded. Tulepüsivus on oluline parameeter, mida tuleb järgida puitkonstruktsioonide projekteerimisel. Selle järgi saab hinnata konstruktsiooni kandevõimet tulekahjus mingi kindla aja jooksul. Tulepüsivust kirjeldatakse tavaliselt ajana, mis näitab, kui kaua suudab konstruktsioon tulekahjus oma kandevõimet säilitada. [5]

4.2 Tulepüsivuse projekteerimise alused ja regulatsioonid

Ehitustoodete ja materjalide omadusi reguleerib Euroopa Liidus Ehitustoodete määrus (CPR), mis sätestab põhinõuded ka konstruktsioonide tulepüsivusele. Projekteerimise tehnilised alused on puitkonstruktsioonide puhul kehtestatud ehitusstandardis EVS-EN 1995-1-2:2026 „Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldreeglid. Tulepüsivusarvutus“. See standard annab juhised nii lihtsustatud kui ka täpsustatud arvutusmeetodite rakendamiseks, et tõendada konstruktsiooni vastavust tuleohutusnõuetele. [5]

Tulepüsivuse projekteerimisel on peamiseks eesmärgiks tagada konstruktsiooni kandevõime (R), terviklikkuse (E) ja isolatsioonivõime (I) säilimine nõutud aja jooksul. See on kriitilise tähtsusega just inimeste ohutu evakuatsiooni võimaldamiseks. Eurokoodeksid pakuvad välja ühtseid arvutusmeetodeid, mis võimaldavad asendada kulukaid katseid täismõõdus mudelitega. Siiski on katsete tegemine keerukamate sõlmede või uute materjalide puhul vajalik. Oluline on standardi kasutamisel jälgida ka rahvuslikku lisa (NA), mis täpsustab teatud osavarutegureid ja parameetreid vastavalt kohalikele tingimustele. [5][6]

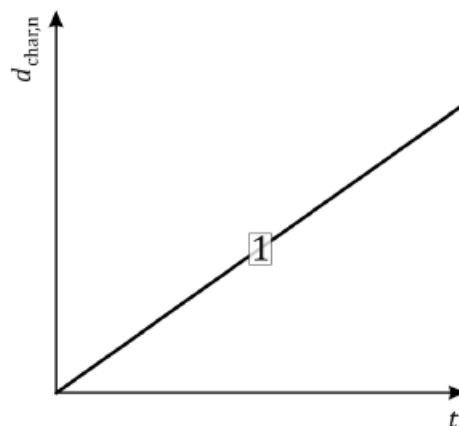
Hetkel on ristkihtliimpuidu liimvuugi terviklikkuse hindamiseks tulekahjus Euroopas ja USA-s välja kujunenud erinevad lähenemised. USA-s kasutatakse peamiselt ühte suurt ruumitulekatset (ANSI/APA PRG 320 Annex B). See kujutab täismõõdulist CLT paneelide katsetamist reaalses tulekahjuolukorras. Toode loetakse sobivaks või mittesobivaks ühe katse tulemuse põhjal. Selline lähenemine on ühest küljest praktiline, kuid väga kallis ning vajadusel keeruline samade tingimustega korratav. Seetõttu ei pruugi ühe katse tulemus olla usaldusväärne toote klassifitseerimiseks. [19]

Euroopas on eelistatud teistsugune, väiksemas skaalas tulekatsete filosoofia CLT liimvuugi testimiseks. Lähenemise eesmärk on vähendada katsete varieeruvust, suurendada kordusi, et ühe suure katse asemel saada hoopis andmestik, mis toetab arvutusmudeleid ja võimaldab ohutut projekteerimist.[5][19]

Käesoleva magistritöö kontekstis on oluline, et Euroopa standardid toetuvad just sellisele süstemaatilisele ja kordusi soodustavale lähenemisele.

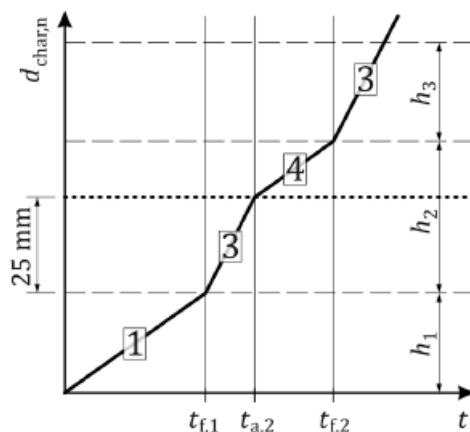
4.2.1 Puitkonstruktsioonide tulepüsivuse arvutusmeetodid ja söestumismudelid

Puitkonstruktsioonide tulepüsivuse arvutamisel on keskne parameeter söestumissügavus (d_{char}), mis määrab tulekahju käigus kandva ristlõike vähenemise. Viimase Eurokoodeksi 5 kohaselt kasutatakse ristkihtliimpuidu projekteerimisel Euroopa söestumismudelit. Mudel arvestab, et söestumine ei toimu kogu aeg ühtlaselt, vaid jaguneb erinevateks faasideks, arvestades liimvuukide käitumist. CLT puhul kehtib lineaarne söestumismudel juhul, kui liimvuuk säilitab oma sidususe ning söestunud kihid jäävad paigale. Joonisel 2 on toodud lineaarse söestumise kulgemine ajas. [5]



Joonis 2 Kaitsmata puidu lineaarne söestumine [5]

Astmeline söestumismudel (joonis 3) rakendub siis, kui liimvuuk kaotab kõrgel temperatuuril oma tugevuse, mille tagajärjel väline puidulamell kukub maha. Sellisel juhul suureneb söestumiskiirus ajutiselt, kuni järgmine tulele avatud lamell moodustab uue söestunud kaitsekihi. [5]



Joonis 3 Kaitsmata puidu astmeline söestumine [5]

Tulepüsivuse hindamiseks on Eurokoodeksis kolm arvutusmeetodit. Esimeseks meetodiks on tabeliseeritud andmed, mis annavad minimaalsed ristlõike mõõtmed ja kaitsekihi paksused soovitud tulepüsivusajaks. See meetod on kõige lihtsam ja kiirem, kuid selle kasutamine on oluliselt rohkem piiratud võrreldes teiste meetoditega. [5]

Igapäevaselt kasutatakse projekteerimises enim lihtsustatud arvutusmeetodeid. Kõige laialdasemalt rakendatakse lihtsustatud meetoditest efektiivristlõikemeetodit, mis võtab arvesse algse ristlõike vähenemist efektiivse söestumissügavuse d_{ef} võrra. See meetod on mugav, sest see võimaldab kontrollida konstruktsiooni kandevõimet tavapäraste tugevusarvutustega, kasutades allesjäänud ristlõike omadusi ja algseid tugevusväärtusi. Siiski tuleb meeles pidada, et nullkihi paksus võib varieeruda sõltuvalt tulekahju ajalisest kestvusest ja konstruktsioonieleменти tüübist. [5][7]

Kolmandaks saab kasutada ka täiustatud arvutusmeetodeid, mis põhinevad termilisel ja mehaanilisel analüüsil. Seda meetodit kasutatakse keerukamate konstruktsioonide ja ebatavaliste lahenduste projekteerimisel [5]

4.3 Tulekahju etapid ja puidu käitumine tules

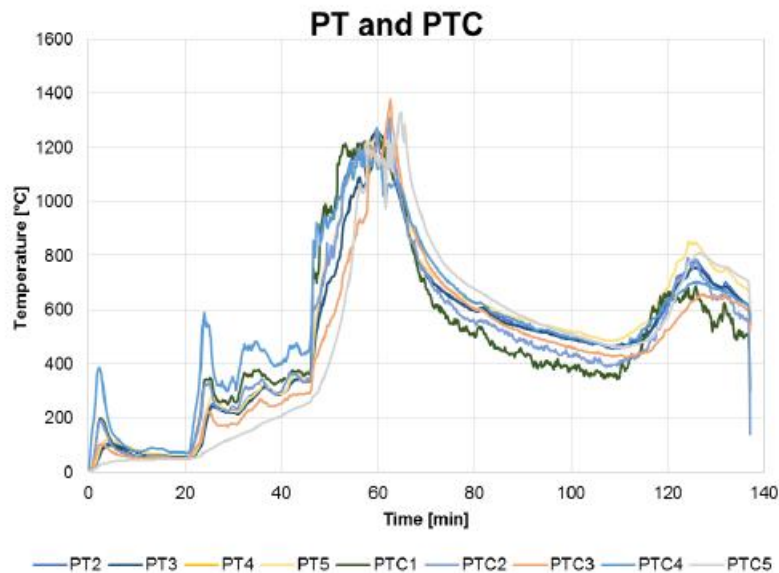
Tulekahju areng jaotub tavaliselt nelja faasi: süttimine, levik, põleng ja jahtumine. Puidu puhul algab termiline lagunemine ehk pürolüüs temperatuuril üle 200°C , kuid söestumine umbes 300°C juures. Söestumisprotsess on puidule loomulik kaitsemehhanism – põlemise käigus tekkiv söekiht on madala soojusjuhtivusega ja kaitseb selle taha jäävat tervet puitu otsese kuumuse eest. See tähendab, et ristlõige küll väheneb, aga söekihi all olev osa säilitab oma tugevusomadused üsna pika aja jooksul. [7]

Temperatuuri tõustes kuni 100°C ja natukene peale toimub puidu sees oleva vee aurustumine, mis aeglustab temperatuuri tõusu puidu sisemuses. Pärast vee aurustumist kiireneb temperatuuri tõus materjali sees. [7]

4.3.1 Ristkihtliimpuidu tulepüsivus

Ristkihtliimpuidu tulepüsivus sõltub oluliselt pürolüüsi- ja söestumisprotsessidest. CLT tulekäitumist mõjutavad liimi tüüp, lamellide paksus, paneeli kihiline ülesehitus ning võimalik paneelide eraldumine ehk delaminatsioon. PUR-liimid on kõrgetel temperatuuridel tundlikumad ning väliskihtide delaminatsiooni oht seega suurem. Kihtide eraldumine tulekahjus paljastab uue puidupinna, mis omakorda kiirendab järgmise kihi söestumist ja pikendab põlemisperioodi. Seetõttu tuleks CLT puhul arvestada astmelise söestumismudeliga. Teised liimid nagu MUF või PRF tagavad tulekahjus parema liimvuukide terviklikkuse ning vähendavad delaminatsiooni riski. [6]

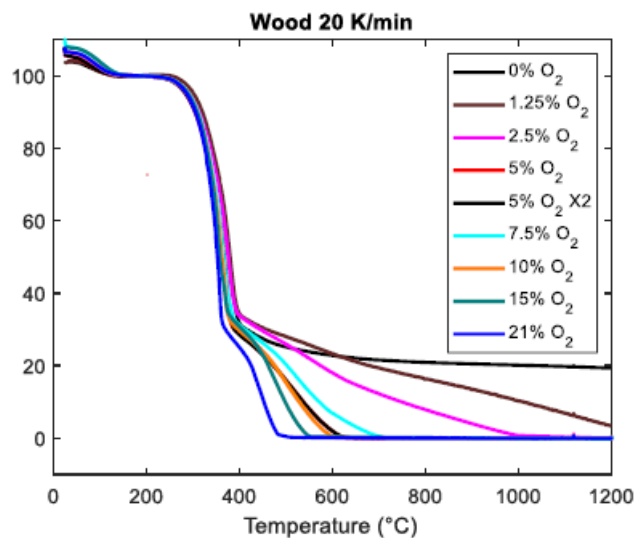
Joonis 4 kujutab ristkihtliimpuidu ruumtulekatse temperatuure. Umbes 110. minutul on näha temperatuuride tõusu, mis viitab lamellide eraldumisele ja uue puidupinna süttimisele.



Joonis 4 Plaattermomeetri temperatuurinäidud ruumis [22]

4.4 Hapniku kontsentratsiooni mõju puidu pürolüüsile ja tulepüsivusele

Hapniku kontsentratsioonil on oluline roll puidu termilisel lagunemisel ja söestumisel, eriti kõrgematel temperatuuridel. RISE poolt läbiviidud katsete raporti (2024) analüüside kohaselt mõjutab hapniku tase märgatavalt puidu massikaotuse kiirust alates umbes 370-400 °C temperatuurist. Madalama hapnikusisalduse korral (nt 6% O₂) on söestunud kihi oksüdatsioon oluliselt aeglasem, mille tulemusel toimub massikaotus aeglasemalt ja puidu lagunemine on vähem intensiivne (Joonis 5). Seevastu tavalise hapnikusisalduse (21% O₂) juures toimub puidu intensiivne oksüdeerumine, mis kiirendab söestumist ja suurendab üldist massikaotust. RISE uuring näitas, et madala hapnikusisaldusega keskkonnas toimub puidu pürolüüs peamiselt ilma leegita. [21]



Joonis 5 Puidu pürolüüs 20 K/min ja erinevad hapnikukontsentratsioonid [21]

4.5 Varasemad CLT tulepüsivuse katsed

Ristkihtliimpuidu elementide tulepüsivuse hindamiseks on varasemalt tehtud palju katselisi uuringuid. Uuringutes on testitud nii väikemahulisi kui ka suuri ahjukatseid koormusega ning koormuseta olukorras.

Aktiivseks uurimisteemaks on ristkihtliimpuidu tulepüsivus saanud 2000. aastate algul, kui CLT-paneelid said populaarseteks konstruktsioonelementideks kandvates seintes ja põrandates. Esimesed uuringud keskendusid põhiliselt CLT kihtide söestumiskiirusele ja kihtide langemisele, kuna CLT käitumine tules erineb oluliselt tavapuidu omast. [8][9]

2007 aastal alustati esimese väikemahuliste ja mudel-skaala katsetega Šveitsis Dübendorfis. Eesmärgiks uurida kuidas käitub CLT võrreldes tavapuiduga standardtulekahju olukorras. Katsetulemused näitasid, et kui CLT-paneeli välimine kaitsev söestunud kiht langeb ära, siis kiireneb järgmise kihi söestumine märgatavalt. Lisaks täheldati, et kihtide lagunemine oli tugevam horisontaalsetel plaatidel võrreldes vertikaalsete elementidega. [8]

Hiljem läbiviidud CLT-uuringutes on testitud ka erinevaid liime (PUR ja MUF-liimid) ning puidu kihipaksusi (10-30mm) hoides paneeli paksuse samana. Katsetulemused näitasid, et MUF liimidega paneelidel püsis söestumiskiirus stabiilsena ning sarnanes tavapuidule. Samas paneelidel, mis olid valmistatud PUR-liimidega sõltus tulepüsivus hoopis paneeli kihtide arvust ja paksusest. Paksemate kihtidega paneelid näitasid paremat tulepüsivust kui õhemate kihtidega paneelid.

5. PRAKTILINE OSA

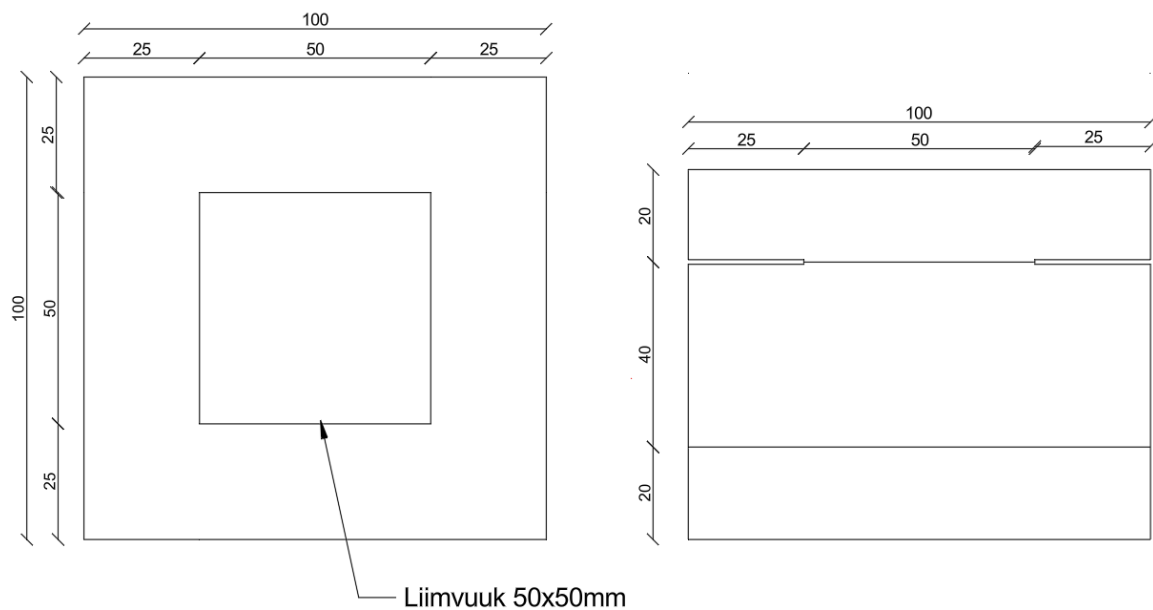
5.1 Väikesemahulised katsed TalTechis ja Lundis

Väikesemahulised ristkihtliimpuidu liimvuugi terviklikkuse ja kandevõime katsed tulekahjuolukorras viidi läbi koonuskalorimeetriga vastavalt rahvusvahelisele standardile ISO 5660-1. Koonuskalorimeeter võimaldab luua sarnased tingimused tulekahjule. Katsekehadele mõjuvat purustavat jõudu mõõdeti koormusanduriga, mis oli ühendatud hüdraulilise pressiga. Uuringu täiendav eesmärk oli hinnata Tootja A ning Tootja B uusi liime, mida katsetes kasutati. Katsed toimusid TalTechi Puidumaja ja Lundi Ülikooli (Rootsi) tulelaborites. Taltechis osalesid katsete läbiviimisel juhendaja Jane Liise Vihmanni ja kaasjuhendaja Alar Just, Lundi Ülikoolis ka vanemteadur Daniel Brandon.

5.1.1 Tootja A liimid ja katsekehad

Taltechis katsetati kokku 18 katsekeha, kasutades kahte erinevat Tootja A liimi ja kahte puiduliiki. Lundis viidi läbi 5 katset samade liimide, kuid ühe puiduliigiga. Katsetes kasutati polüuretaanliime (PUR) ja puiduna kuuske ning pööki. Katsekehad valmistas Tootja A.

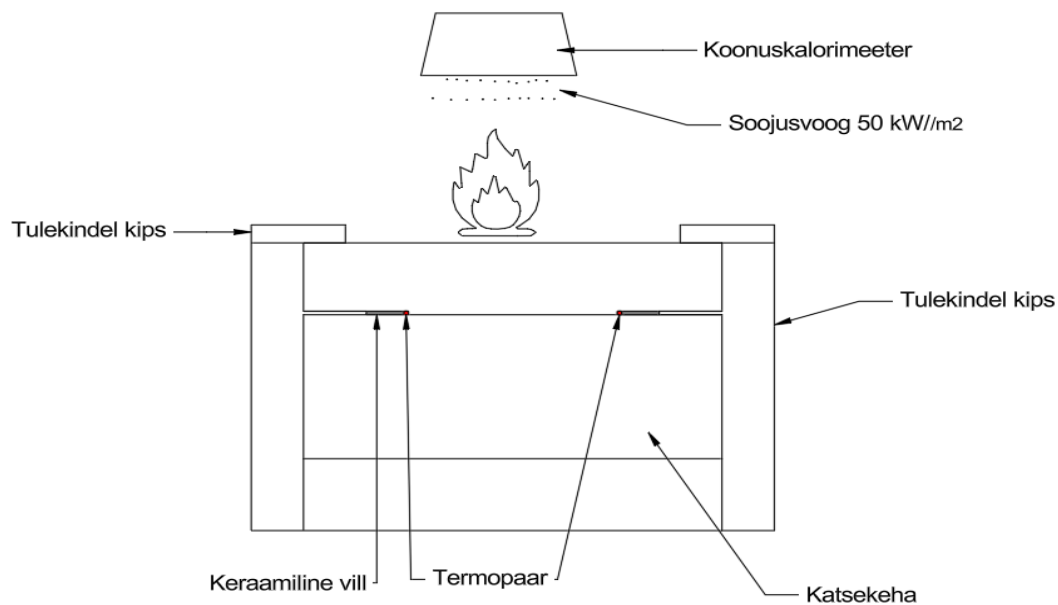
Katsekehade mõõtmed olid 80 x 100 x 100 mm (kõrgus x laius x pikkus). Iga katsekeha koosnes kolmest kihist: pealmine oli 20 mm, keskmine 40 mm ning alumine 20 mm. Ülemise ja keskmise lamelli vaheline liimvuugi pind vähendati mõõtmeteni 50 x 50 mm. Selleks lõigati igasse külge sisse sälgud sügavusega 25 mm. Katsekeha geomeetria on esitatud joonisel 6.



Joonis 6 Tootja A katsekeha geomeetria

Sälgu sisse paralleelselt liimvuugiga paigutati kaks termopaari, mille järel täideti sälg igast küljest keraamilise villaga, et kaitsta temperatuuri mõõtvaid andureid kuumuse eest. Termopaaride abil mõõdeti temperatuuri liimvuugi piirkonnas.

Katsekeha kõik neli külgpinda kaeti ülekatttega 15 mm paksuse tulekipsiga ning pealmise lamelli servad õhema 7 mm kipsiga, nii et lõplik tulele avatud pindala oli 80 x 80 mm. Kips kinnitati katsekehadele alumiiniumteibiga. Katsevalmis katsekeha on näidatud joonisel 7.



Joonis 7 Tootja A katsetatav katsekeha

Kõiki katsekehasid hoiustati kontrollitud temperatuuril 20 °C õhuniiskuse juures 65%. Katsekehade tähistus koosneb puiduliigi numbrist, millele järgneb katsekeha sihttemperatuurinumber ning viimaks liimi tähis. Tabel 1 esitab kõik Tootja A katsekehad.

Tabel 1 Tootja A katsekehade sihttemperatuurid liimvuugis ja nihkekandevõimed

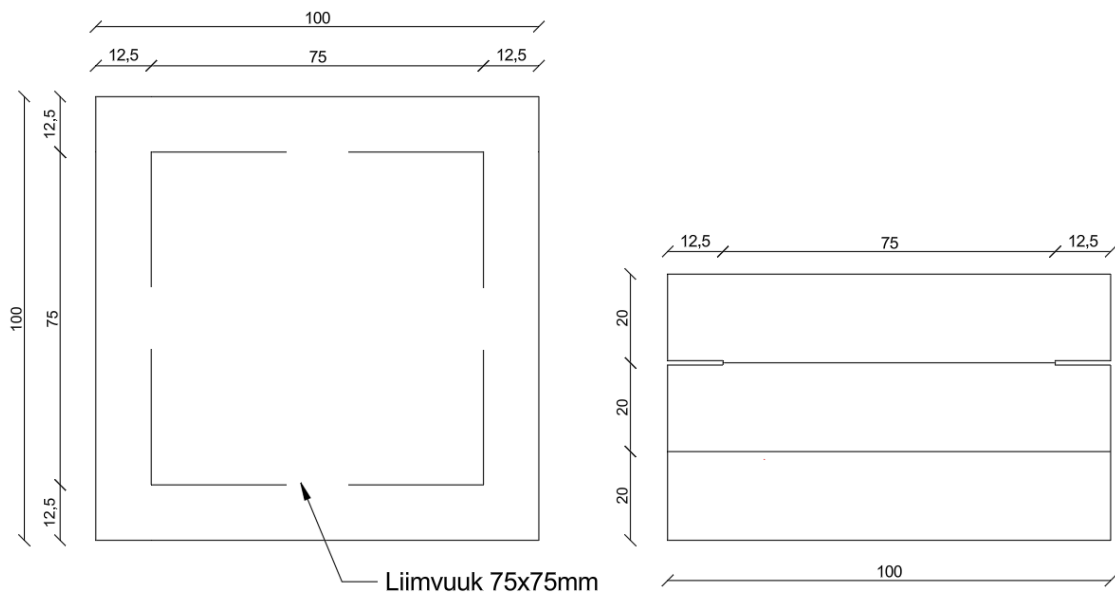
Keskkond	Liim	Puit	Katsekeha	Nihkejõud [kN]	Temperatuur liimvuugis °C
Tavakeskkond	PUR 2	Kuusk	1.1	0,013	290
			1.2	0,216	220
			1.3	0,899	180
			2.1	0,016	290
			2.2	0,406	220
			2.3	1,280	180
	PUR 1		3.1	0,000	290
			3.2	0,060	220
			3.3	1,020	180
			4.1	0,000	290
			4.2	1,167	220
			4.3	1,088	180
	Primer + PUR 1	Pöök	5.1	0,202	290
			5.2	0,087	220
			5.3	0,724	180
			6.1	0,000	290
			6.2	0,336	220
			6.3	0,020	180
Kontrollitud 6% hapnikusaldusega keskkond	PUR 2	Kuusk	7.1	0.000	290
			7.2	0,500	220
			7.3	0,892	180
			8.2	0,088	220
			8.3	0,343	180

5.1.2 Tootja B liimid ja katsekehad

Tootja B väikesemahulised katsekehad testiti kõik Lundi Ülikooli tulelaboris. Kokku oli koonuskalorimeetris katsetatavaid katsekehasid 19, millest 10 olid väiksemad 60x100x100 mm ning 9 suuremad mõõtmetega 105x100x100 mm.

Väiksemad katsekehad koosnesid kolmest 20 mm paksusest lamelist. Suuremad katsekehad koosnesid kolmest 35 mm paksusest lamelist. Mõlema katsekehade tüübi puhul puuriti ülemisse liimvuuki termopaaride jaoks kaks mõõteauku: üks keskel 50 mm servast ning teine teisel poolel 25 mm servast.

Katsekehade jaoks saeti ülemise liimvuugi igasse külge 12,5 mm sügavune salk. Saadud sãlgud kleebiti väikese ülekattega alumiiniumteibiga, et vältida hapniku ligipääsu ja sellega kaasnevaid kõrvalmõjusid nagu enneaegne oksüdeerumine.



Joonis 8 Tootja B 20 mm lamelliga katsekeha geomeetria

Katsekehade servad kaeti metallist karbiga, mis takistas soojusvoo mõju katsekeha külgedele ja ning suunas selle ainult ülemisele lamellile. Kõik katsekehad hoiustati enne katsetamist samas ruumis kontrollitud temperatuuril 20 °C ja suhtelise õhuniiskuse 65 % juures, mis tagas katsekehade ühtlase niiskussisalduse.



Joonis 9 Tootja B ettevalmistatud katsekeha

Katsekehade tähistus koosneb katsekeha nimest, millele järgneb liimi oma. Tabel 2 esitab kõik Tootja B koonuskalorimeetri katsekehad.

Tabel 2 Tootja B katsekehade sihttemperatuurid ja nihkekandevõimed

Keskkond	Puit; lamelli paksus [mm]	Liim	Katsekeha	Nihkejõud [kN]	Temperatuur liimvuugis [°C]
Kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkond	Kuusk; 20mm	AD5	D2	1,421	250
			D5	2,883	250
			D7	0,000	270
			D8	0,990	260
		AD6	D3	3,648	250
			D6	0,147	270
			D9	2,610	260
		AD7	D4	0,411	250
			D10	0,019	270
			Kuusk; 35mm	AD5	D11
	D12	0,578			270
	D16	0,009			270
	AD6	D13		0,862	270
	AD7	D14		0,186	270
		D15	0,098	270	
Tavakeskkond	AD5	D17	1,900	270	
		D18	0,000	270	
		AD6	D19	0,019	270

5.1.3 Koonuskalorimeetri ülesseadmine

Koonuskalorimeetri kalibreerimine tuli läbi viia enne katsetamist. TalTechis asetati esmalt soojusvoogu mõõtev seade koonuskuumuti pinnast 25 mm madalamale. Seejärel ühendati seade voltmeetriga ning hakati vaikselt temperatuuri tõstma. Kuumuti ühendati veega, mida juhiti kogu katsetamise vältel läbi seadme, et seda jahutada. Koonuskuumuti temperatuuri tuli tõsta sujuvalt, kuni saadi kätte sobiv soojusvoog 50 kW/m² ehk 3,86 mV.



Joonis 10 Koonuskalorimeeter TalTechi Puidumaja tulelaboris

Lundi Ülikooli koonuskalorimeetri (joonis 11) kalibreerimine toimus sarnaselt TalTechi omale. Lundi koonuskuumuti oli varustatud ka suletud katsekambriga, mis võimaldas kontrollida ja reguleerida katsekeskkonna hapnikusisaldust. Kui kuumuti oli saavutanud soojusvoo 50 kW/m^2 , juhiti katsekambrisse reguleeritud kogus lämmastikku ja hapnikku. Seejärel kalibreeriti hapnikusisaldust mõõtvad andurid, et tagada katsetuskeskkonnas 6% hapnikusisaldus. See võimaldab uurida hapnikusisalduse mõju põlemisprotsessile ja materjali käitumisele tulekahjus.

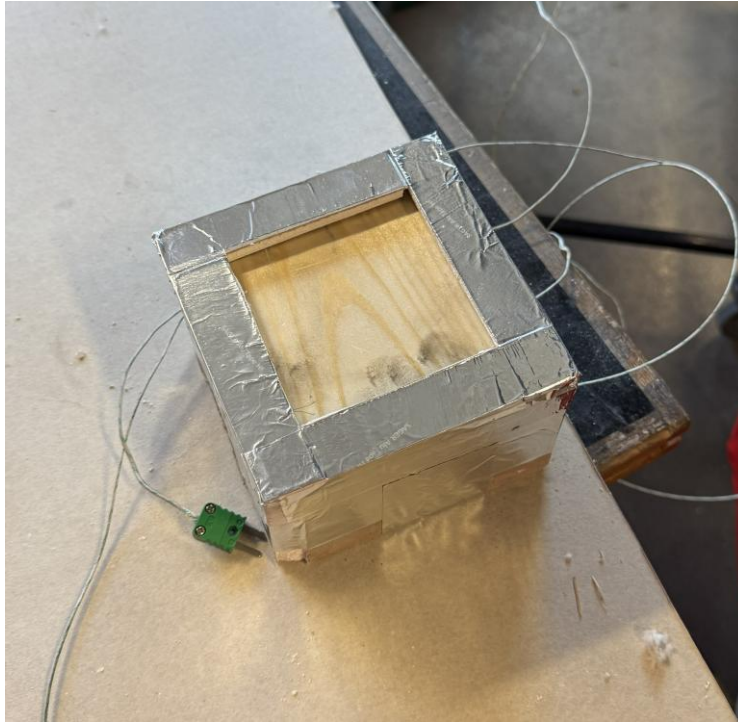


Joonis 11 Koonuskalorimeeter Lundi tulelaboris

Soojusvoo väärtus 50 kW/m^2 on valitud teadlikult, sest see simuleerib ISO 834 standardtulekahju kõverat esimese 30-40 minuti jooksul ning tagab hästi söestumissügavused, mis korreleeruvad täismõõdulistes ahjukatsetes saadud tulemustega samal ajaperioodil. Selline lähenemine võimaldab usaldusväärset võrdlust väikemahuliste katsete ja standartsete tulepüsivuskatsete vahel. [20]

5.1.4 Katsetamine Tootja A katsekehadega (TalTech)

Taltechis kasutatud katsetusmetoodika kohaselt hinnati liimvuugi tugevust kolmel erineval temperatuuril: 180°C , 220°C ja 290°C . Kipsiga külgedest ja osaliselt pealt kaetud ning termopaaridega ettevalmistatud katsekeha paigutati 25 mm madalamale koonuskuumutist. Paigaldamise hetkel oli kuumuti ja katsekeha vahele asetatud magneesiumsilikaatplaat, mis kaitses katsekeha liigse kuumuse eest. Pärast katsekeha korrektset asetamist kuumuti alla, eemaldati kipsplaat ning sel hetkel algas katse, kus koonuskuumuti rakendas ülemisele lamellile soojusvoogu 50 kW/m^2 . Joonisel 13 on näha koonuskuumuti all olevat katsekeha.



Joonis 12 Tootja A ettevalmistatud koonuskuumuti katsekeha

Katsekeha liimvuugi temperatuuri jälgiti arvutist, kus kuvati mõlema termopaari mõõtmistulemused reaajas. Katsekeha hoiti koonuskuumuti all seni, kuni termopaaride keskmine temperatuur saavutas etteantud väärtuse. Seejärel eemaldati katsekeha kuumuti alt ning viidi kraanikausi juurde, kus eemaldati kipsplaadid. Katsekeha asetati koheselt nihkepressi vahele ja fikseeriti. Siis rakendati ülemisele lamellile koormust kuni purunemiseni, mille tulemusena määrati maksimaalne nihkekandevõime.



Joonis 13 Tootja A katsekeha koonuskuumuti all

5.1.5 Katsetamine Tootja A katsekehadega (Lund)

Katsetusmetoodika Lundis oli üldjoontes sarnane TalTechi katsetele. Liimvuugi terviklikkust ja kandevõimet hinnati kolmel erineval temperatuuril: 180°C, 220°C ja 290°C, kasutades ühte liimi ja puiduliiki. Temperatuuril 290°C viidi läbi ainult üks katse, kuna varasemalt Taltechis selle temperatuuri juures tehtud katsed näitasid, et liimvuuk on juba liiga nõrk ning delaminatsioon toimub nullilähedase kandevõime juures.

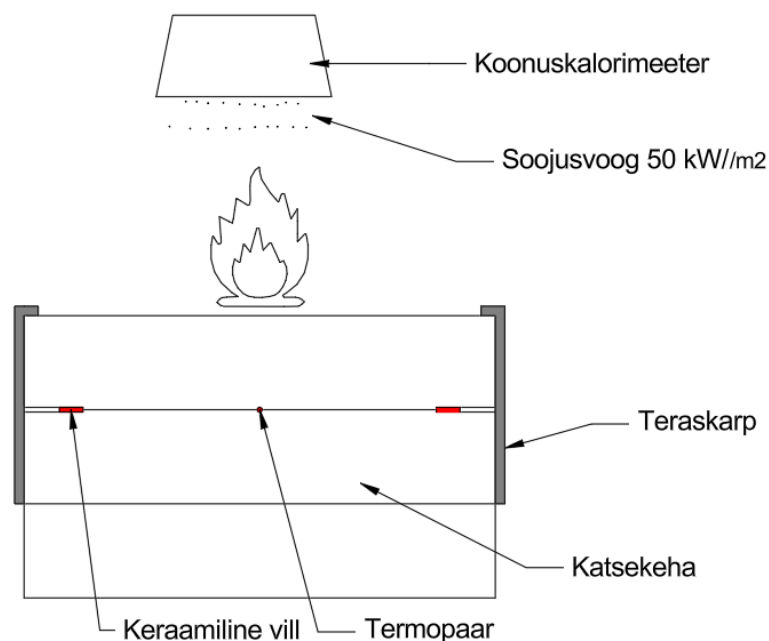
Katsekeha paigaldamise ajal koonuskuumuti kambrisse oli võimalik seadme küljes oleva riivi abil sulgeda kuumuti plaadiga, mis takistas soojusvoo enneaegset mõju katsekehale. Kui klapp oli suletud asendis, paigutati koonuskuumuti alla eelnevalt kipsplaatidega kaetud ning termopaaridega varustatud katsekeha. Seejärel suleti katsekambri uks ning üheaegselt käivitati arvutis näitude salvestamine ning avati kambris kuumutit kattev plaat. Katsekehale rakendus koheselt soojusvoog 50 kW/m².

Katsekeha liimvuugi temperatuuri jälgiti arvutist. Soovitud temperatuuri saavutamisel katkestati riivi abil soojusvoog katsekehale, avati katsekambri uks ning transporditi katsekeha kipsi eemaldamiseks ventileeritud tööpinnale. Seejärel tõsteti katsekeha koormusanduri peale ja fikseeriti. Hüdraulilise pressiga rakendati koormust hetkeni, kui toimus katsekeha ülemise lamelli purunemine. Koormusandur fikseeris koormuse purunemise hetkel ning tulemused pildistati üles ning dokumenteeriti.

5.1.6 Katsetamine Tootja B katsekehadega (Lund)

Tootja B toodetud liimidega katsekehade liimvuugi terviklikkust hinnati temperatuuridel 220°C, 250°C, 260°C, 270°C kontrollitud 6 % hapnikusisaldusega keskkonnas. Võrdluse saamiseks katsetati kolm katsekeha ilma kontrollitud hapnikusisalduseta. Katsetes kasutati kolme erinevat Tootja B polüuretaanliimi sama puiduliigiga.

Katse alguses hoiti riiviga klapp suletuna, et vältida soojusvoo mõju katsekehale koonuskuumuti alla paigaldamise hetkel. Pärast katsekeha täpset asetamist katsekambrisse suleti uks, avati riiv ning alustati andmete salvestamist. Sel hetkel rakendus katsekehale koheselt ühtlane soojusvoog 50 kW/m².



Joonis 14 Tootja B katsetatav katsekeha

Katsekeha ülemise lamelli liimvuugi temperatuuri jälgiti reaalsajas termopaaride abil. Kui liimvuuk saavutas soovitud sihttemperatuuri, avati katsekambri uks ning katsekeha transporditi kiiresti hüdraulilise pressi juurde. Nihketesti käigus rakendati ülemisele lamellile koormust kuni liimvuugi purunemiseni. Maksimaalne purustav jõud salvestati ning dokumenteeriti.

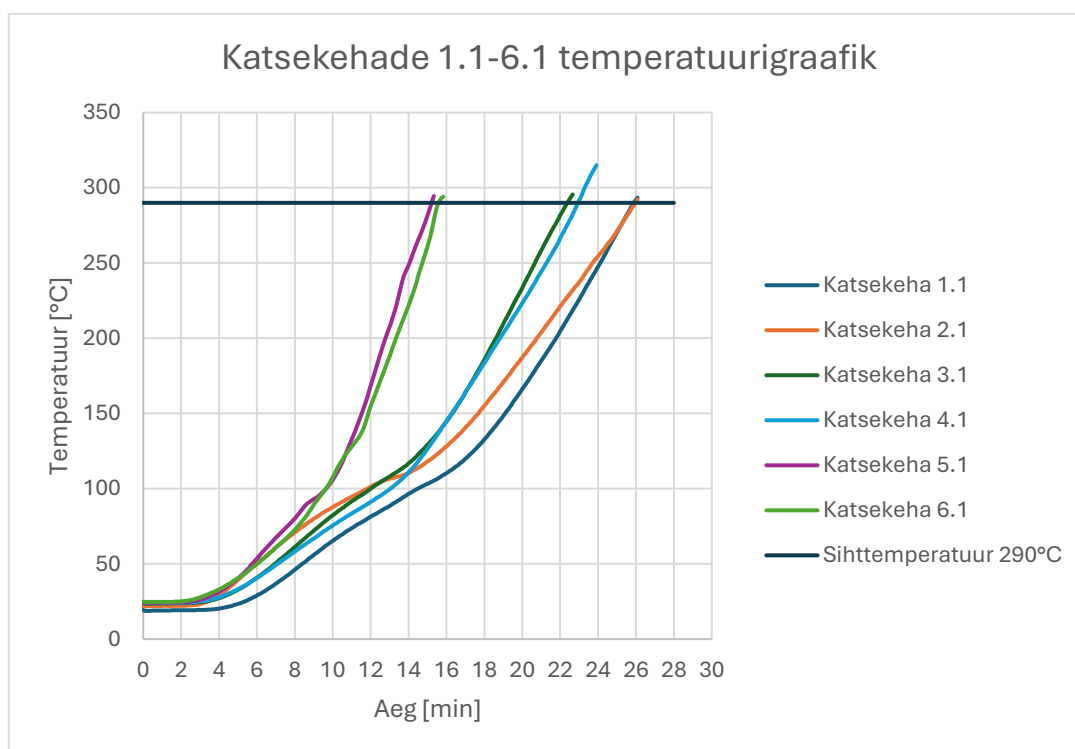
Lisaks viidi läbi samade katsekehadega kolm võrdluskatset samas katsekambris, kuid lahtise uksega ja tavatingimustes. Kõik katsekehad pildistati üles enne ja pärast katsetamist.

5.1.7 Temperatuuri mõõtmised liimvuugis Tootja A katsekehadel (TalTech)

TalTechis katsetatud tootja A liimide tulepüsivuse paremaks hindamiseks lähtuti eeldusest, et katsekehade tulepoolses lamellis esinevad väikesed praod ning oksakohad võivad mõjutada nii liimvuugi nihkekandevõimet kui ka söestumise kulgu.

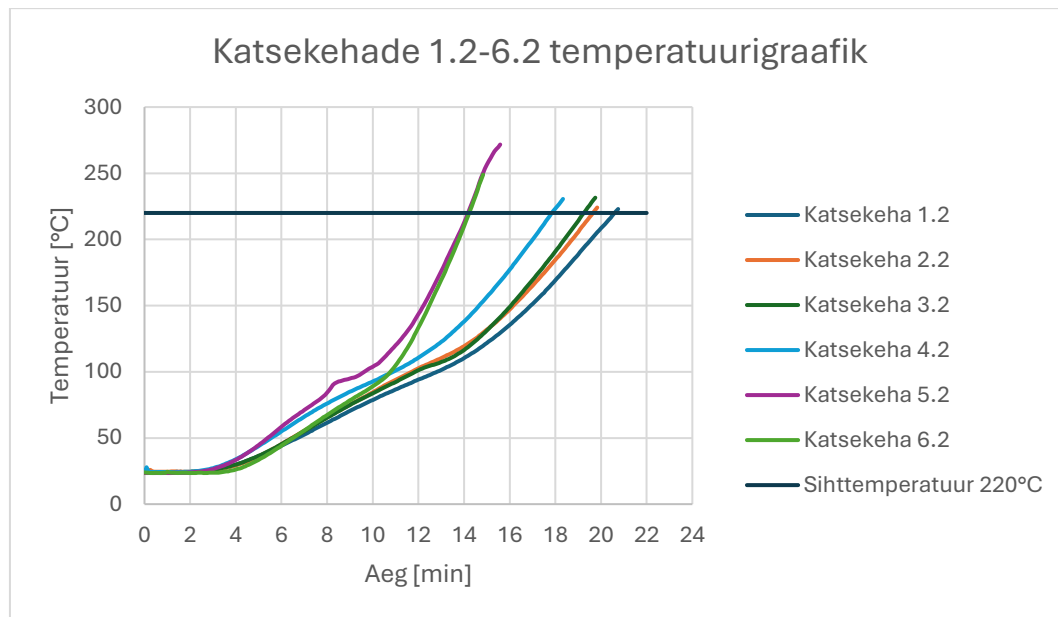
Liimvuugi temperatuuri mõõdeti TalTechi katsetes kahes erinevas ristlõike punktis. Graafikutel on esitatud nende kahe mõõtepunkti registreeritud temperatuuride keskmine väärtus.

Joonis 15 kuvab liimvuugi temperatuurid katsekehadel, mille sihttemperatuuriks oli 290°C. Katsekeha 4.1 on sihttemperatuuri ületanud rohkem, kui teised selle seeria katsekehad, sest tulepoolse lamelli tekkinud prao tõttu tõusis temperatuuri näit ühes termopaaris väga palju kiiremini kui teises. Selle katseseeria kõige kiirem temperatuuritõus oli katsekehadel 5.1 ja 6.1, mis mõlemad olid valmistatud pöögist.



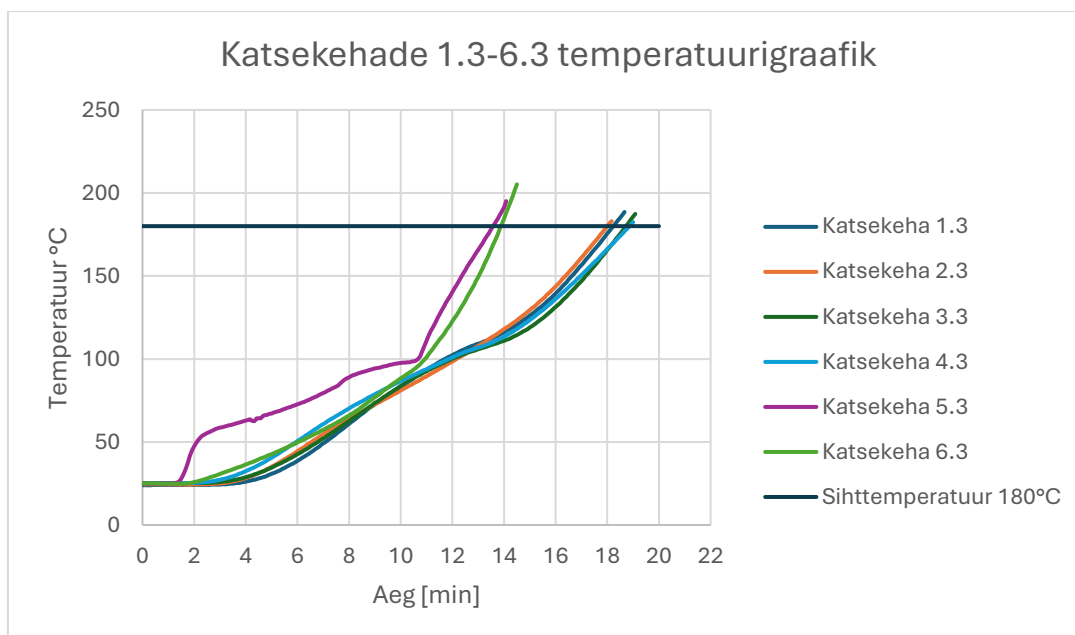
Joonis 15 Katsekehade 1.1-6.1 temperatuurigraafik sihttemperatuurini 290°C

Joonisel 16 on näha sihttemperatuurini 220°C liimvuugis katsetatud katsekehade temperatuurigraafik. Jällegi on kõige kiirem söestumine toimunud pöögist katsekehadel 5.2 ja 6.2. Mõlemad katsekehad on ületanud sihttemperatuuri piiri prao tekkimise tõttu ühel pool liimvuuki.



Joonis 16 Katsekehade 1.2-6.2 temperatuurigraafik sihttemperatuurini 220°C

Joonis 17 kirjeldab katsekehasid, mille liimvuuki testiti temperatuuril 180°C. Ka siin on olnud pöögist katsekehade söestumine kõige kiirem. Kuusest katsekehade temperatuuritõus liimvuugis on olnud väga ühtlane.



Joonis 17 Katsekehade 1.3-6.3 temperatuurigraafik sihttemperatuurini 180°C

Erinevate sihttemperatuuridega katsete võrdlemisel ilmnas selgelt, et temperatuur tõusis kõige kiiremini pöögist valmistatud katsekehades. Kõikides katseseeriates on erinevus ilmnenu pärast 100°C piiri, kui vesi on juba aurustunud. Arvestades, et pöök on oluliselt tihedam puit kui teistes katsekehades kasutatud kuusk, siis kinnitab see tulemus, et pöögi söestumiskiirus on suurem kui okaspuidul ja seda kajastab ka uus

Eurokoodeks 5, mille kohaselt suurema tihedusega puidus toimub soojuse levik ja söestumine kiiremini.

Katsekehade 1.2-6.2 ja 1.3-6.3 graafikutel ületas pöögist valmistatud katsekehade liimvuugi keskmine temperatuur sihttemperatuuri. See tulenes kahe mõõtepunkti vahelisest märkimisväärsest temperatuurierinevusest, mis oli põhjustatud tõenäoliselt pragude tekkimise tõttu. Ühes termopaaris oli sihttemperatuur juba ületatud, kuid teises mõõtepunktis oli see liiga madal ning katsekeha liiga varajane eemaldamine kuumuti alt võinuks viia ebaühtlase purunemispinna tekkimiseni liimvuugis.

5.1.8 Tootja A katsekehade nihkekandevõime mõõtmised tavakeskkonnas

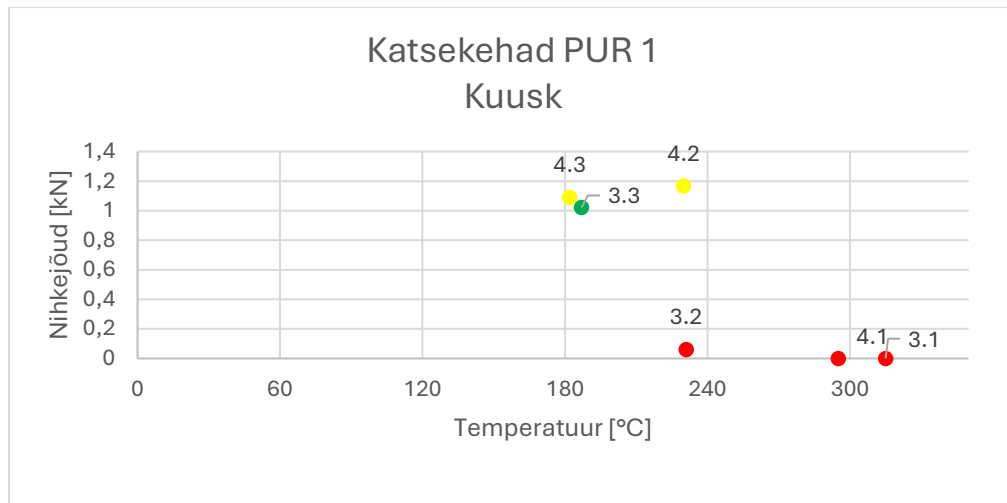
Tootja A liimidega valmistatud katsekehade nihkekandevõime hindamisel lähtuti eeldusest, et madalam liimvuugi temperatuur säilitab suurema nihkekandevõime. Joonised 19, 20, 21 esitavad nihkekandevõimed ja tegelikud temperatuurid liimvuugis katsetamise hetkel. Purunemisviisid on joonistel märgitud erineva värviga: punane tähistab purunemist liimist, kollane purunemist liimist ja puidust ning roheline purunemist ainult puidust. Joonis 18 näitab Tootja A purunenud katsekehasid.



Joonis 18 Katsekehade purunemisviisid: vasakul liimist, keskel liimi-puidu koosmõjul, paremal puidust

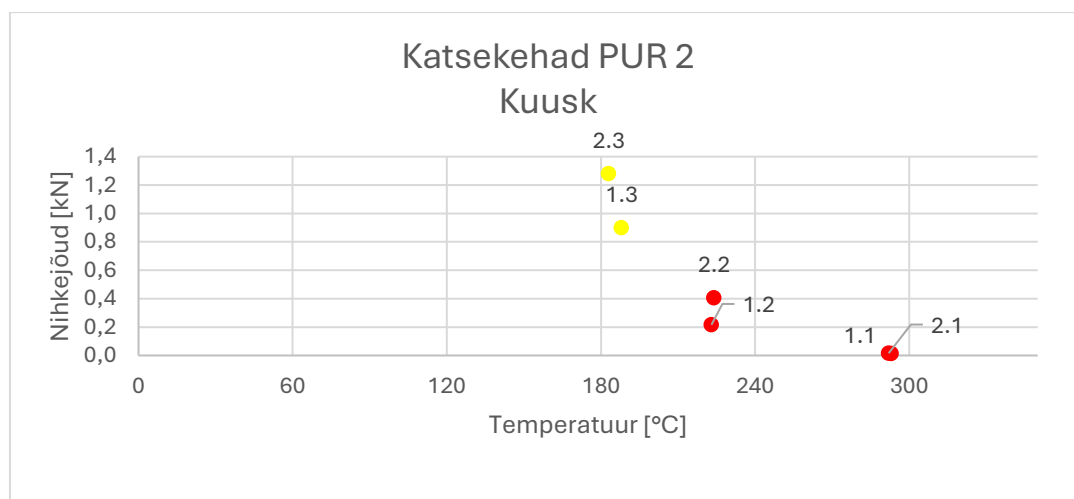
Katsekehad PUR 1 liimiga joonisel 19 ilmnes nihketugevuse täielik kadu sihttemperatuuri 290°C juures. Katsekehade 3.1 ja 4.1 visuaalne analüüs näitas, et söestumine oli jõudnud juba liimvuuki ning purunemine toimus täielikult liimvuugi terviklikkuse kao tõttu. Sihttemperatuuril 220°C täheldati varieeruvust, kus katsekeha 4.2 näitas kõrget nihkekandevõimet, samas katsekeha 3.2 andis nullilähedase tulemuse. Visuaalse analüüsi põhjal purunes katsekeha 4.2 suures osas puidust, katsekeha 3.2 purunes täielikult liimist. See erinevus viitab sellele, et katsekehas 4.2 jõudis temperatuur prao või oksakoha tõttu kiiremini sihttemperatuurini liimvuugi külgedel, kus asetsesid termopaarid. Ülejäänud liimvuugis oli temperatuur oluliselt madalam ja seetõttu purustav nihkejõud ka suurem. Katsekehad 3.3 ja 4.4 katsetati

sihttemperatuuril 180°C. Katsekeha 3.3 purunes täielikult puidust ning 4.3 osaliselt puidust ja liimist.



Joonis 19 Tootja A PUR 1 katsekehade nihkekandevõime

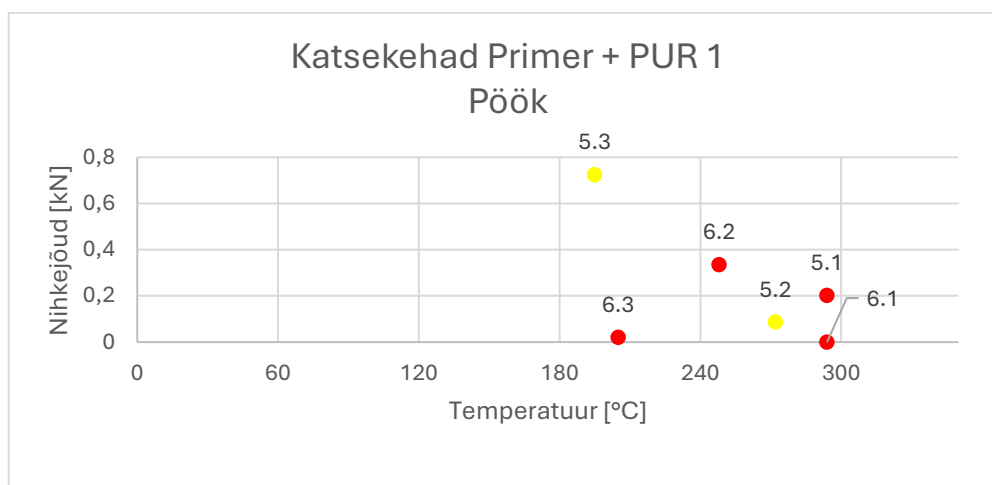
Katsekehad PUR 2 liimiga joonisel 20 on temperatuurist tingitud tugevuse langus selgelt väljendunud. Suurim nihketugevuse langus toimus vahemikus 180°C ja 220°C. Seevastu vahemikus 220°C kuni 290°C oli tugevuse vähenemine oluliselt väiksem. Sihttemperatuuril 290°C oli nihkekandevõime liimvuugis väga lähedal nullile, mis viitab sellele, et PUR 2 liim kaotab oma sidususe 300°C lähedal. 300°C on temperatuur, millest alates algab puidu intensiivne söestumine. Selles katseseerias purunesid puidu-liimi koosmõjul ainult katsekehad 1.3 ja 2.3, mis katsetati sihttemperatuurini 180°C.



Joonis 20 Tootja A PUR2 katsekehade nihkekandevõime

Katsekehad Primer + PUR 1 joonisel 21 on tulemuste hajuvus suurim 180°C juures. Katsekeha 6.3 andis nullilähedase tulemuse, katsekeha 5.3 hoopis suurima sellest katseseeriast. Visuaalne hindamine näitas, et 6.3 purunes täielikult liimist, kuid 5.3

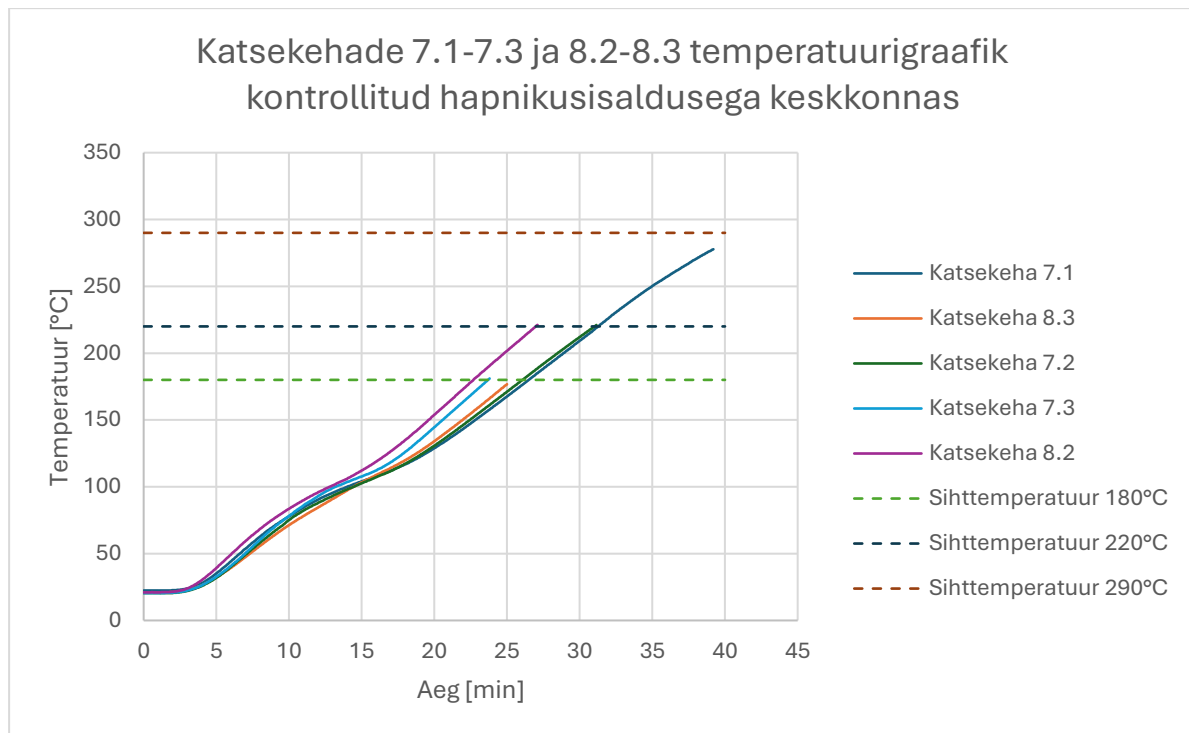
pooleldi liimist ja pooleldi puidust. Pöögist valmistatud katsekehade puhul tuleb arvestada, et temperatuurierinevus kahe mõõtepunkti vahel oli kõige suurem, mis muudab liimvuugi purunemispinna kõige ebahomogeensemaks.



Joonis 21 Tootja A Primer + PUR1 katsekehade nihkekandevõime

5.1.9 Temperatuuri mõõtmised liimvuugis kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas Tootja A katsekehadel (Lund)

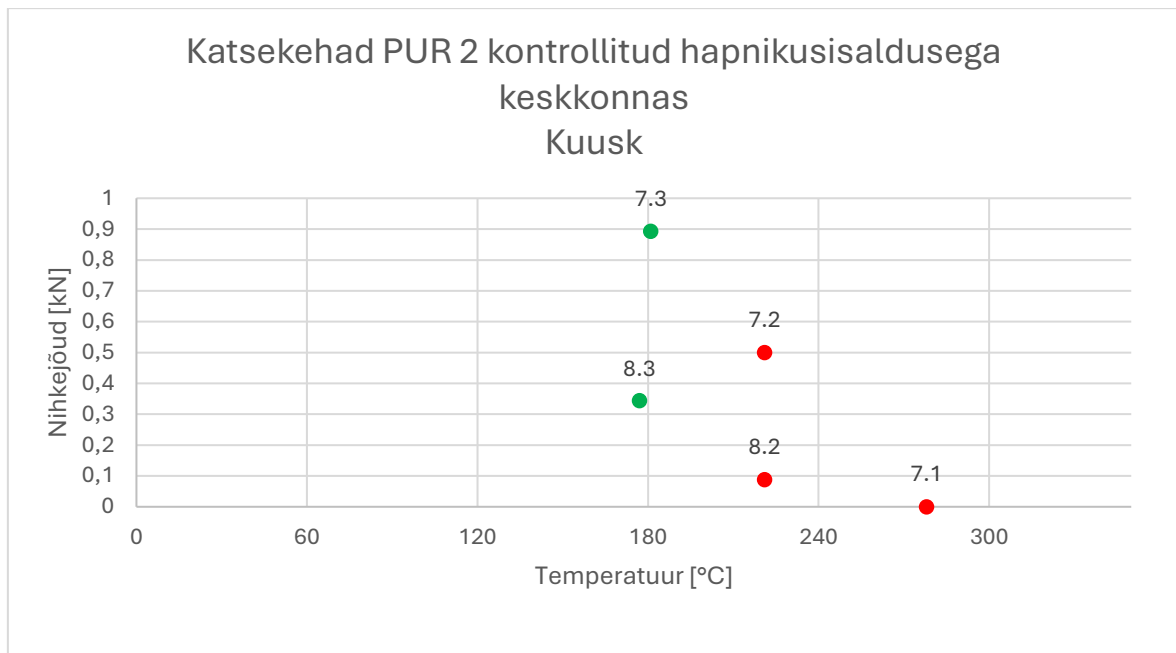
Lundi Ülikoolis katsetatud tootja A PUR 2 liimidega katsekehade temperatuurigraafik kontrollitud 6% hapnikusisalduse juures on esitatud joonisel 22. Liimvuuke katsetati kolmel erineval temperatuuril: 180°C, 220°C ja 290°C. Katsekehal 7.1 on keskmine termopaaride näit jäänud pisut alla 290°C, sest termopaaride erinevus oli suur ning kahe näidu keskmise jõudmist 290°C ei peetud heaks, sest siis oleks üks pool liimvuugist juba liiga palju ära söestunud.



Joonis 22 Tootja A katsekehade temperatuurigraafik kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

5.1.10 Tootja A katsekehade nihkekandevõime mõõtmised kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas

Kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas läbi viidud katsete nihkekandevõime tulemused Tootja A PUR 2 liimidega on näha joonisel 23. Rohelisega on märgitud katsekehad, mis purunesid puidust ning punaselt need katsekehad, mis purunesid liimist. Selles katseseerias ühtegi liimi-puidu koosmõjul purunemist ei toimunud. Katsekeha 7.1 katsetati sihttemperatuuril 290°C, kus liim kaotas täielikult oma sidususe ning nihketugevus tuli null. Purunemine liimist juhtus ka mõlema katsekeha puhul, mille sihttemperatuuriks oli seatud 220°C. Katsekehad 7.3 ja 8.3 katsetati sihttemperatuuril 180°C ning nende puhul toimus purunemine ainult puidust. Saadud tulemused viitavad selgelt, et PUR2 liimi oluline tugevuse kaotus kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas toimub temperatuurivahemikus 180°C kuni 220°C.

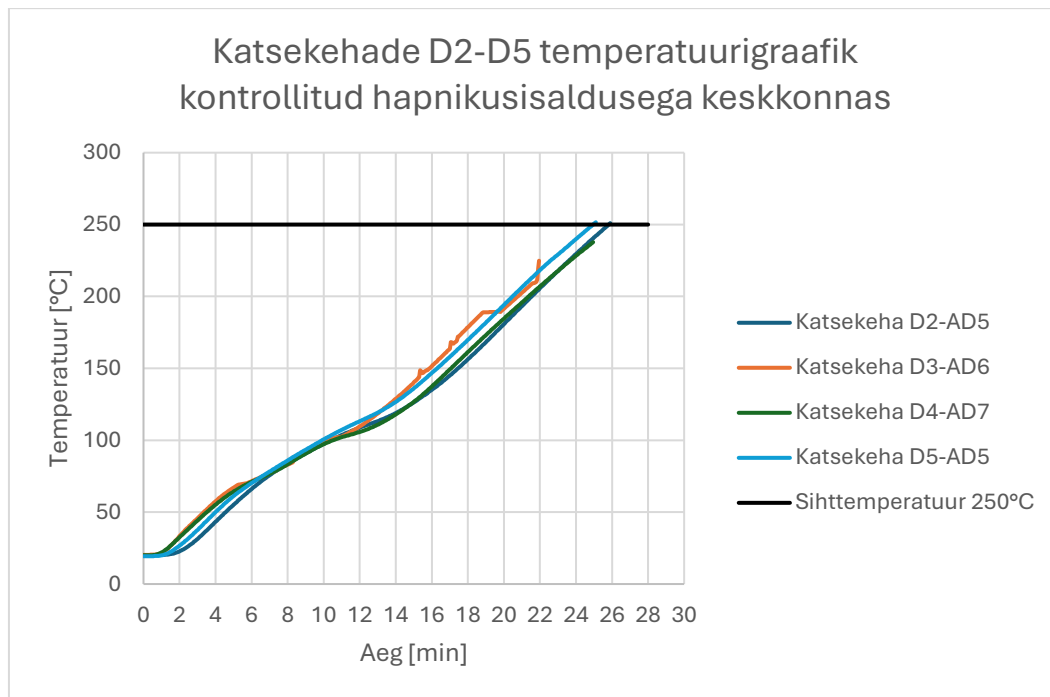


Joonis 23 Tootja A PUR 2 katsekehade nihkekandevõime kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

5.1.11 Tootja B katsekehade temperatuurimõõtmised kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas

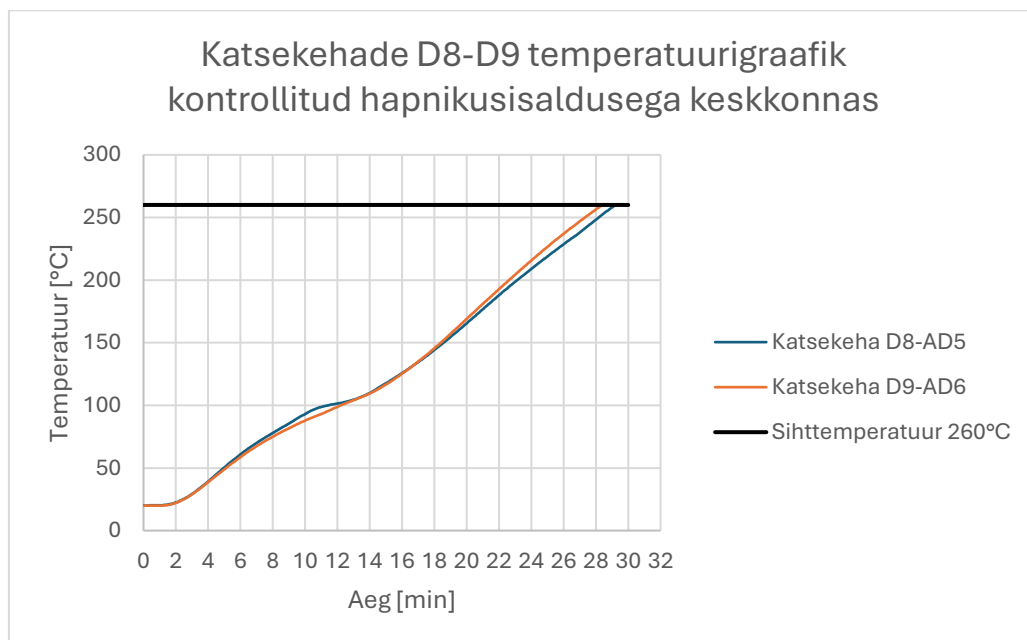
Tootja B 20 mm lamellipaksusega katsekehade liimvuuke katsetati kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas sihttemperatuuridel 250°C, 260°C ja 270°C. 35 mm lamellipaksusega katsekehasid katsetati ainult sihttemperatuuril 270°C. Tootja B katsekehade temperatuurigraafikud on esitatud joonistel 24, 25 ja 26.

Joonisel 24 on näha väga sarnast temperatuuritõusu liimvuugis kõikides katsekehades sihttemperatuurini 250°C. Katsekeha D3-AD5 temperatuurimõõd on jäänud sihttemperatuurist madalamale termopaaride temperatuurinäitude suure erinevuse tõttu. Ei tahetud olukorda kus söestumine ühel pool liimvuuki jõuab liiga sügavale.



Joonis 24 Tootja B katsekehade D2-D5 temperatuurigraafik

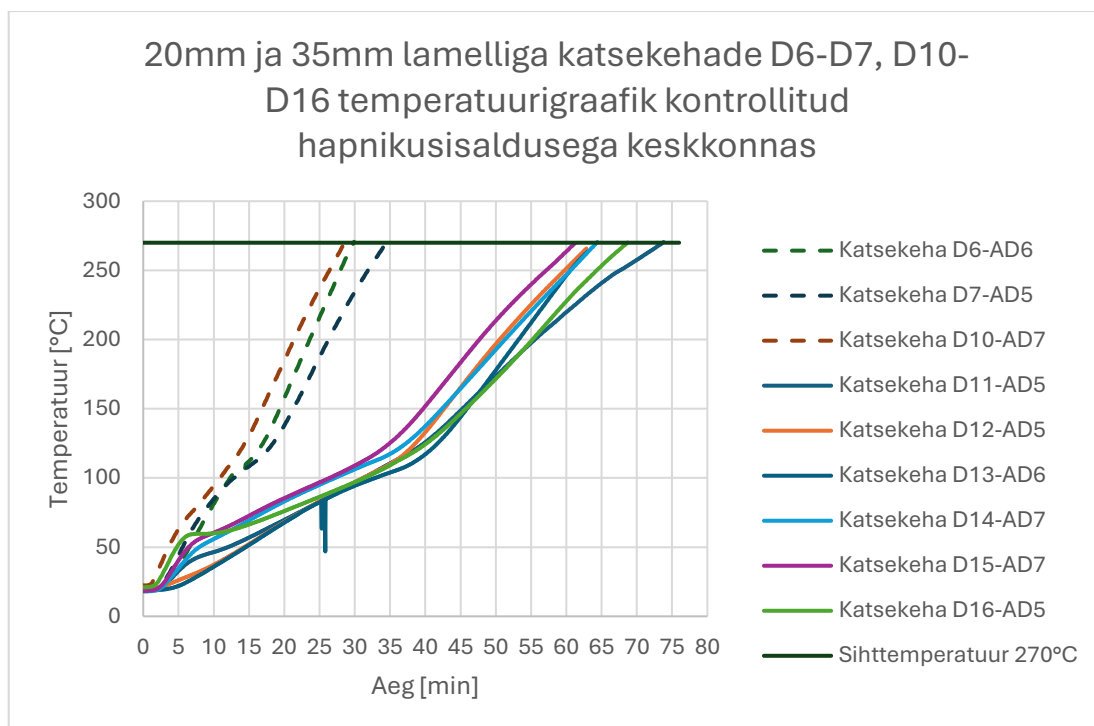
Joonis 25 esitab 20 mm lamellipaksusega katsekehade temperatuuritõusu liimvuugis kuni sihttemperatuurini 260°C. Ka siin on olnud temperatuuritõus mõlema katsekeha puhul väga sarnane ning olulisi eripärasid pole täheldatud.



Joonis 25 Tootja B katsekehade D8, D9 temperatuurigraafik

Joonis 26 esitab 20 mm ja 35 mm lamellipaksusega katsekehade temperatuuritõusu liimvuugis. Katkendjoonega on esitatud 20 mm lamelliga katsekehad. Ajaliselt on 35

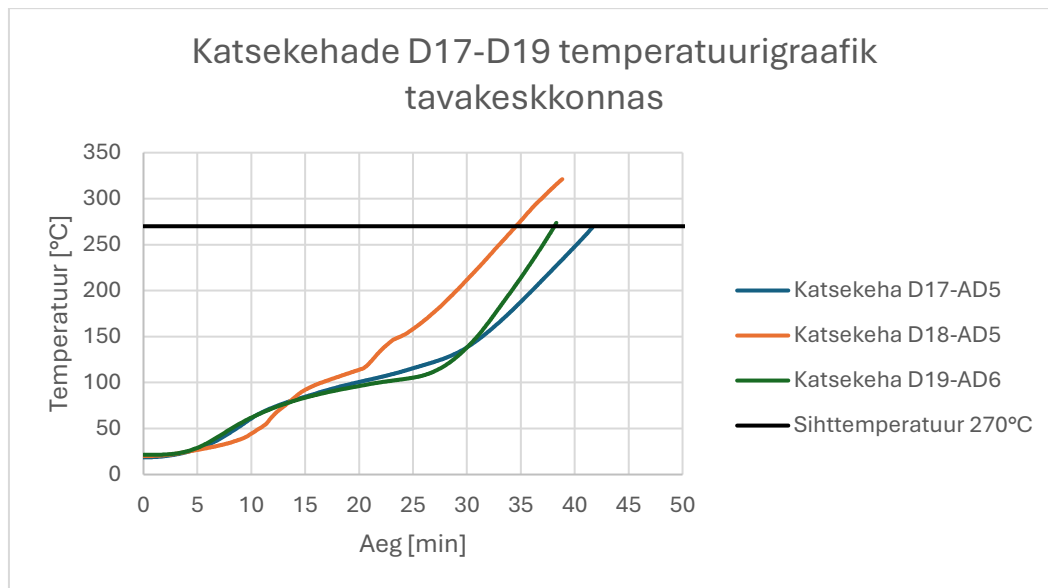
mm lamellipaksusega katsekehad söestunud ligi kaks korda kauem kui 20 mm lamelliga katsekehad.



Joonis 26 Tootja B temperatuurigraafik sihttemperatuurini 270°C

5.1.12 Tootja B katsekehade temperatuurimõõtmised tavakeskkonnas

Tavakeskkonnas katsetati ainult 35 mm lamelliga Tootja B katsekehasid liimidega AD5 ja AD6. Joonis 27 esitab kolme katsekeha temperatuuritõusu liimvuugis. Katsekeha D18-AD5 ületas sihttemperatuuri suurelt, sest temperatuurierinevus kahes termopaaris oli katse ajal üle 100°C. Järelikult toimus söestumine ühel pool liimvuuki tunduvalt intensiivsemalt ning katsekeha hilisem visuaalne analüüs kinnitas seda.

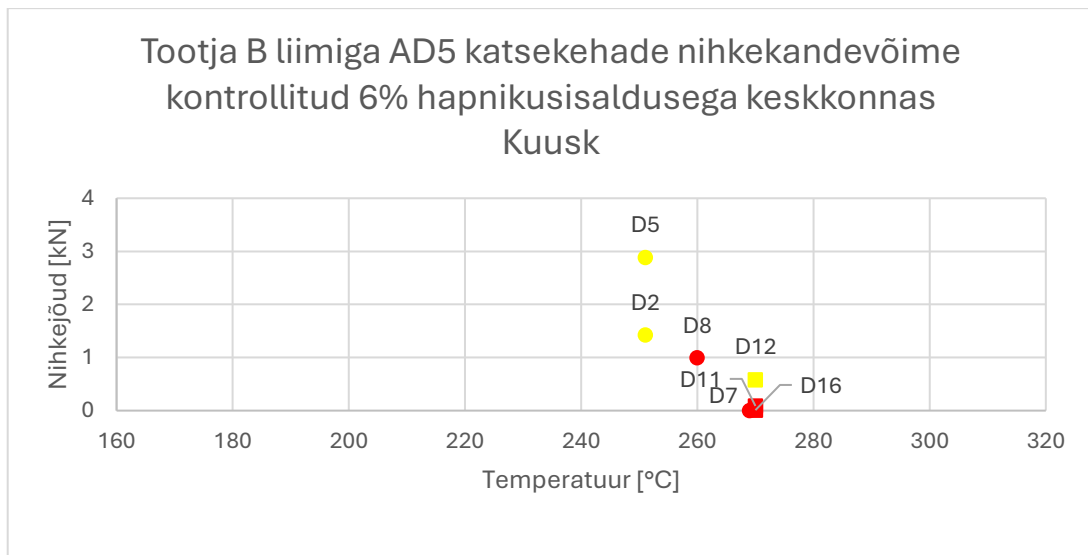


Joonis 27 Tootja B katsekehade D17-D19 temperatuurigraafik tavakeskkonnas

5.1.13 Tootja B katsekehade nihkekandevõime mõõtmised kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

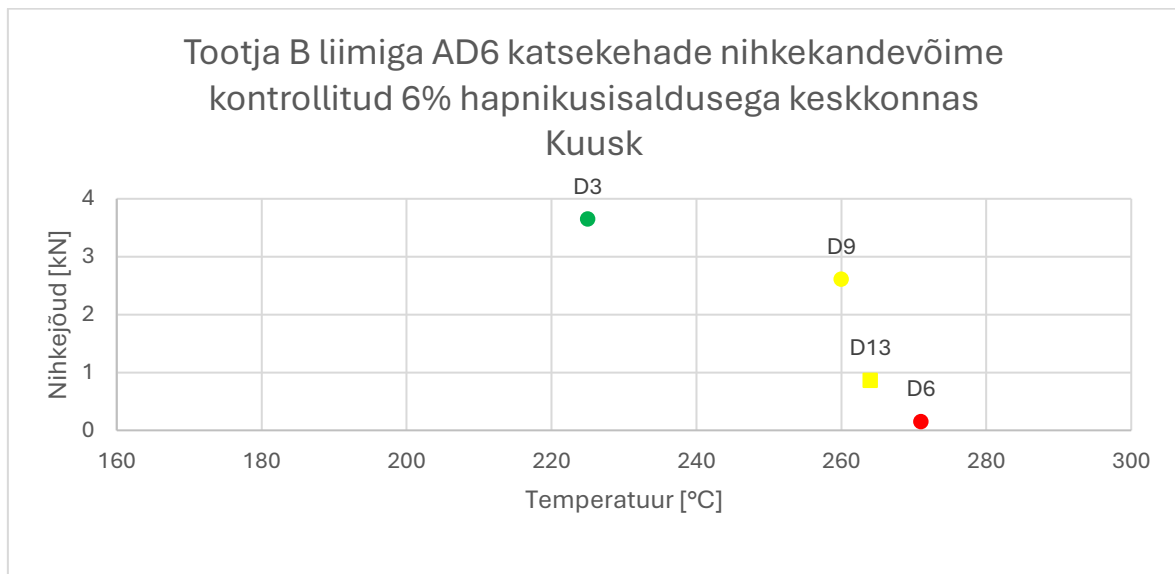
Tootja B katsekehade liimvuukide nihkekandevõimet testiti kolmel erineval sihttemperatuuril 250°C, 260°C ja 270°C kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas.

Joonis 28 esitab 20 mm ja 35 mm lamellipaksusega katsekehade nihkekandevõimed ja tegelikud temperatuurid liimvuugis. 35 mm katsekehad on ruudukujulised ning 20 mm ringikujulised. Purunemisviisid on eristatud värvidega: punane tähistab purunemist liimist, kollane liimi-puidu koosmõjul. On näha, et suur liimi AD5 sidususe kaotus toimub just vahemikus 250°C kuni 270°C.



Joonis 28 Tootja B AD5 katsekehade liimvuugi nihkekandevõime kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

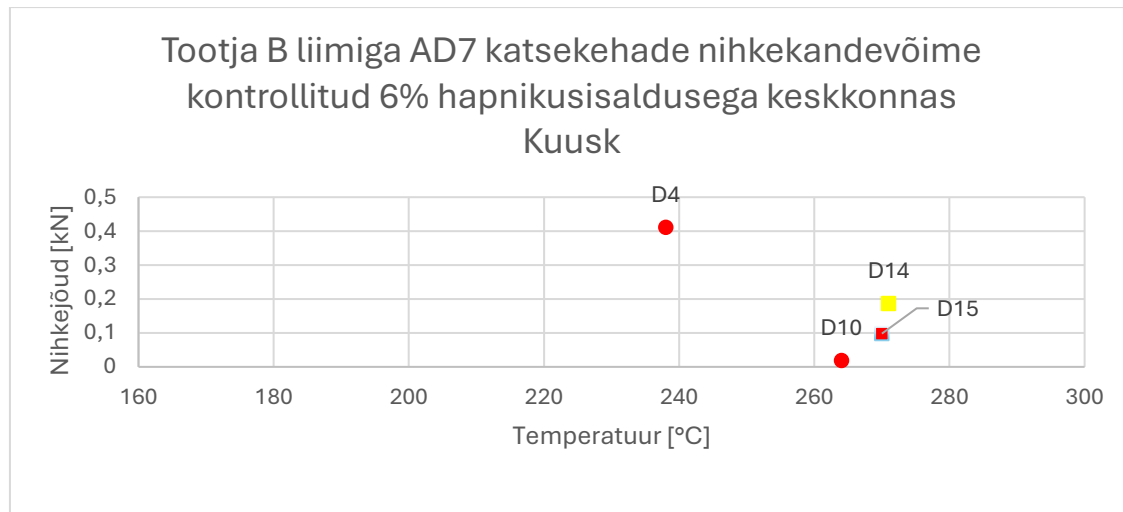
Liimiga AD6 katsetati kolm 20 mm ja üks 35 mm lamellipaksusega Tootja B katsekeha. Katsekeha D3 temperatuur liimvuugis oli kõige madalam ja purunemine toimus täielikult puidust. Märgatav kukkumine liimvuugi nihketugevuses on toimunud selle liimi puhul temperatuurivahemikus 260°C kuni 270°C. Tulemused kajastuvad joonisel 29.



Joonis 29 Tootja B AD6 katsekehade liimvuugi nihkekandevõime kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

Liimi AD7 puhul on näha, et 20 mm lamelliga katsekehad D4 ja D10 on mõlemad purunenud liimist. Katsekehad D14 ja D15 on 35 mm lamelliga, kusjuures D14 on purunenud pooleldi liimist ja pooleldi puidust. Visuaalne katsekeha D14 analüüs näitab,

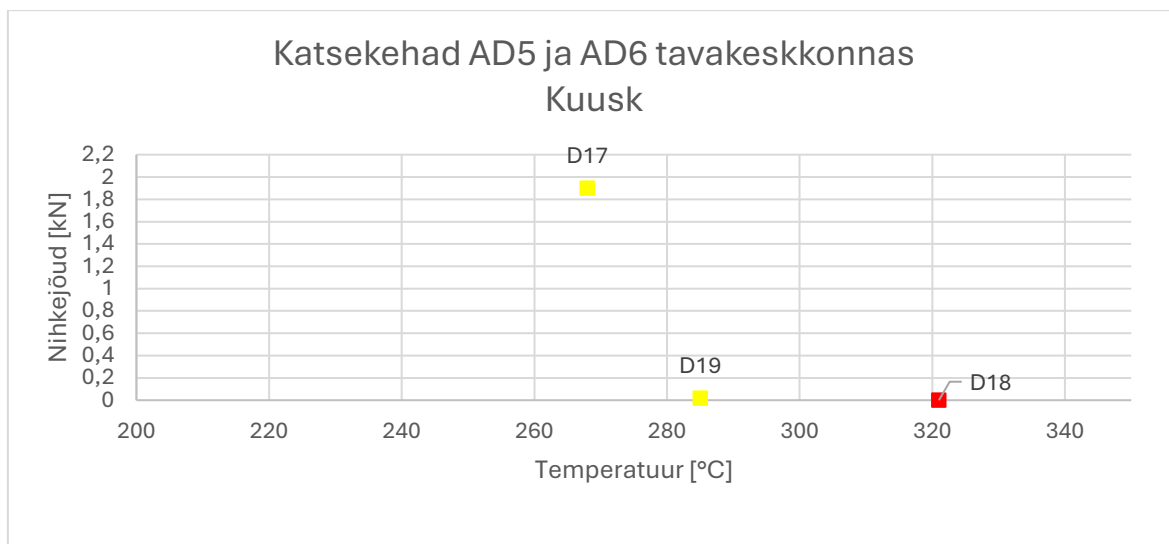
et ühel pool liimvuuki on temperatuur olnud madalam ja seetõttu on seal toimunud purunemine puidust. Nihkekandevõime tulemused on joonisel 30.



Joonis 30 Tootja B AD7 katsekehade liimvuugi nihkekandevõime kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

5.1.14 Tootja B katsekehade nihkekandevõime mõõtmised tavakeskkonnas

Tootja B tavakeskkonnas katsetatud 35 mm lamellipaksusega katsekehade nihkekatsed näitasid, et suur nihkekandevõime langus juhtub temperatuurivahemikus 270°C kuni 280°C. Katsekehad D18 ja D19 purunesid nullilähedase nihkejõu tõttu. Katsekeha D17 saavutas nihkekandevõimeks 1,9 kN liimvuugi temperatuuri 268°C juures. Katsejärgsel liimvuugi visuaalsel analüüsil oli näha, et purunemine oli toimunud liimi-puidu koosmõjul. Lamelli keskel oli suur pragu ja liimvuugi keskmine osa söestunud, kuid ääred valged. See tähendab, et liimvuugi äärtes ei olnud temperatuur sugugi kõrge ja seega söestumispind ebahomogeenne. Joonisel 31 on esitatud tavakeskkonnas katsetatud Tootja B 35 mm lamellipaksusega katsekehade tegelikud temperatuurid liimvuugis ja nihkekandevõimed.



Joonis 31 Tootja B katsekehad tavakeskkonnas

5.2 Ahjukatsed Tootja B katsekehadega

Ristkihtliimpuidu liimvuugi terviklikkuse ja lamellide söestumiskiiruse hindamiseks viidi Lundi Ülikooli tulelaboris läbi ahjukatsed vastavalt Eurokoodeks 5 osa 1-2 lisa B nõuetele. Katsetes kasutati ahju, millega loodi standardtule (ISO 834) tingimused, et simuleerida reaalset tulekahju olukorda ning hinnata liimvuugi käitumist kõrgetel temperatuuridel. Katsete kestvus oli defineeritud hetkeni, mil teise liimvuugi temperatuur saavutas 300°C, millele järgnes veel 10 minutit lisakoormust. See lähenemine võimaldas hinnata liimvuugi pikaajalist termilist vastupidavust ka pärast kriitilise temperatuuri saavutamist. Katsetes osalesid juhendaja Jane Liise Vihmann, kaasjuhendaja Alar Just ja vanemteadur Daniel Brandon. Tabel 3 esitab Tootja B ahjukatsekehade andmed.

Tabel 3 Tootja B ahjukatsete katsekehad ja keskmised söestumiskiirused

Puit; lamelli paksus [mm]	Liim	Katsekeha	Aeg temperatuurini 300°C 2. liimvuugis [min]	Keskmine söestumiskiirus [mm/min]
Kuusk; 20	AD5	F1	41,9	0,99
	AD6	F2	49,6	0,80
	AD7	F3	48,25	0,79
	AD8	F4	48,0	0,81
Kuusk; 35	AD5	F5	81,0	0,85
	AD6	F6	86,45	0,78
	AD7	F7	92,5	0,73

Katsekehade söestumissügavused mõõdeti iga katsekeha puhul 15 erinevast punktist. Enne söestumissügavuse mõõtmist harjati katsekehal maha söestunud nullkiht. Katsekeha saeti pooleks kolmest erinevast kohast. Saetud tükil mõõdeti söestumissügavus keskel, 75 mm ja 150 mm kaugusel mõlemal pool keskosa. Söestumissügavuse tulemused on esitatud tabelis 4 ja saetud tükid joonisel 32.

Tabel 4 Tootja B ahjukatsete katsekehade söestumissügavused

Katsekeha	Saetud tükk	Söestumissügavus mõõdetud punktis [mm]					Keskmine alles jäänud ristlõike paksus [mm]
		-15cm	-7,5cm	+0	+7,5cm	+15cm	
F4-AD8	A	54,76	49,8	51,1	46,58	52,26	53,13
	B	47,42	50,03	55,06	52,32	51,59	
	C	58,56	59,94	57,1	55,08	55,34	
F1-AD5	A	46,12	40,17	53	56,97	57,16	48,63
	B	47,52	44	44,03	43,34	50,45	
	C	48	45,86	48,7	52,29	51,85	
F2-AD6	A	43,23	49,8	49,89	54,6	56,74	52,14
	B	57,96	52,67	53,95	53,48	53,89	
	C	53,48	54,69	49,63	49,58	48,51	
F3-AD7	A	55,33	49,85	58,76	59,13	56,83	54,24
	B	55,31	52,48	57,62	51,62	50,48	
	C	52,74	48,31	52,78	54,44	57,97	
F5-AD5	A	99,94	104,24	103,84	104,86	105	97,41
	B	102,08	94,8	88,71	91,35	96,77	
	C	96,51	92,88	95,57	92	92,67	
F6-AD6	A	104,93	100,25	105,07	103,53	94,98	99,47
	B	99,21	102,38	108,3	103,63	94,76	
	C	98,2	94,44	94,92	95,11	92,27	
F7-AD7	A	109,04	105,76	102,94	92,24	95,13	100,42
	B	97,7	100,33	102,16	93,78	94,26	
	C	100,01	99,26	106,94	104,35	102,41	



Joonis 32 Kolmest erinevast kohast pooleks saetud katsekehad

5.2.1 Tootja B ahjukatsete katsekehad

Katsetes kasutati viiekihilisi ristkihtliimpuidu paneele, mis olid toodetud Tootja B poolt nende enda liimidega. Kokku testiti 7 katsekeha nelja erineva liimiga. 20 mm lamellidega katsekehade mõõtmed olid 1500x650x100 mm ja 35 mm lamellidega katsekehad 1500x650x175 mm. Katsekehade tulepoolsed esimesed kaks liimvuuki olid varustatud termopaaridega, mis registreerisid temperatuuri liimvuugis. Joonisel 33 on näha Tootja B ahjukatse katsekeha.



Joonis 33 Tootja B ahjukatse katsekeha

5.2.2 Ahjukatse ettevalmistamine

Ahjukatse ettevalmistus nägi ette katsekeha tõstmist kraanaga ahju kohale nii, et tulele avatud pind oli 650x650 mm. Seejärel isoleeriti katsekeha küljed keraamilise villa ning kivivillaga, et põlemisel tekkiv suits ei pääseks äärtest välja. Ahju sisse oli paigutatud kaks plaattermomeetrit, mis asusid katsekeha tulepoolsest lamelist 100 mm madalamal. Seejärel ühendati termopaarid arvutiga ning andmete registreerimine algas hetkel, mil gaasipõleti käivitati ning ahju suunati. Gaasipõleti juhtimine käis manuaalselt ning arvutist tuli samaaegselt jälgida temperatuure ahjus ning võrrelda neid standartulekahju omadega. Vajadusel lisati või vähendati tulekoormust reguleerides gaasipõleti intensiivsust.

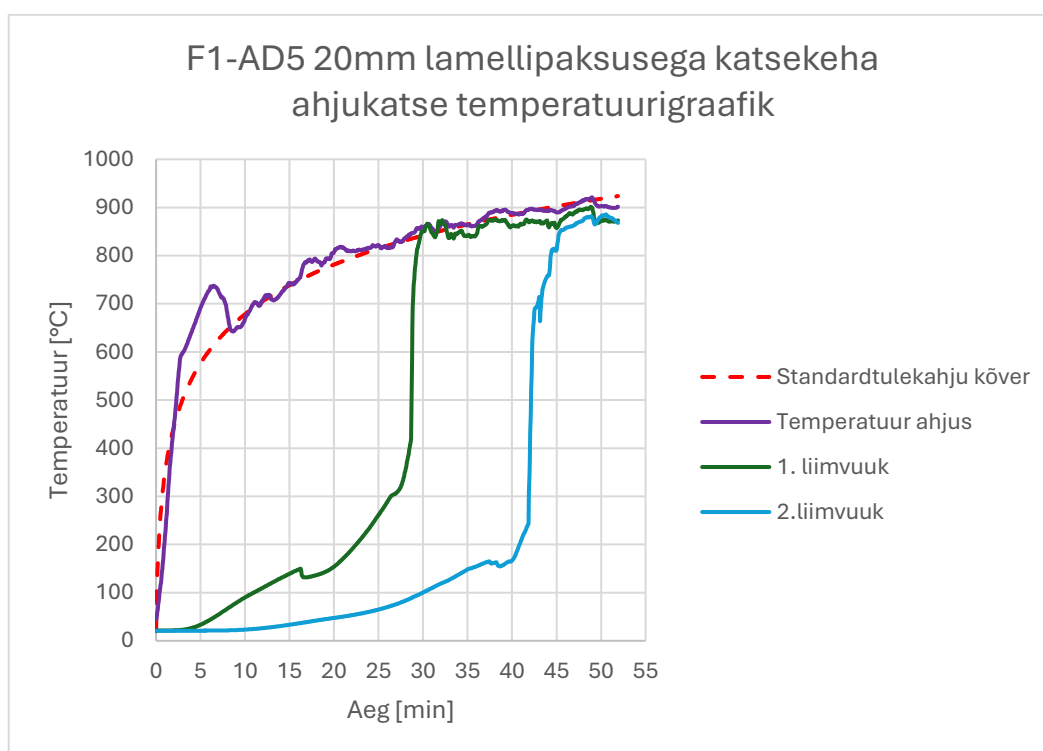


Joonis 34 Ahjukatse

5.2.3 Tootja B ahjukatsete temperatuuri mõõtmised

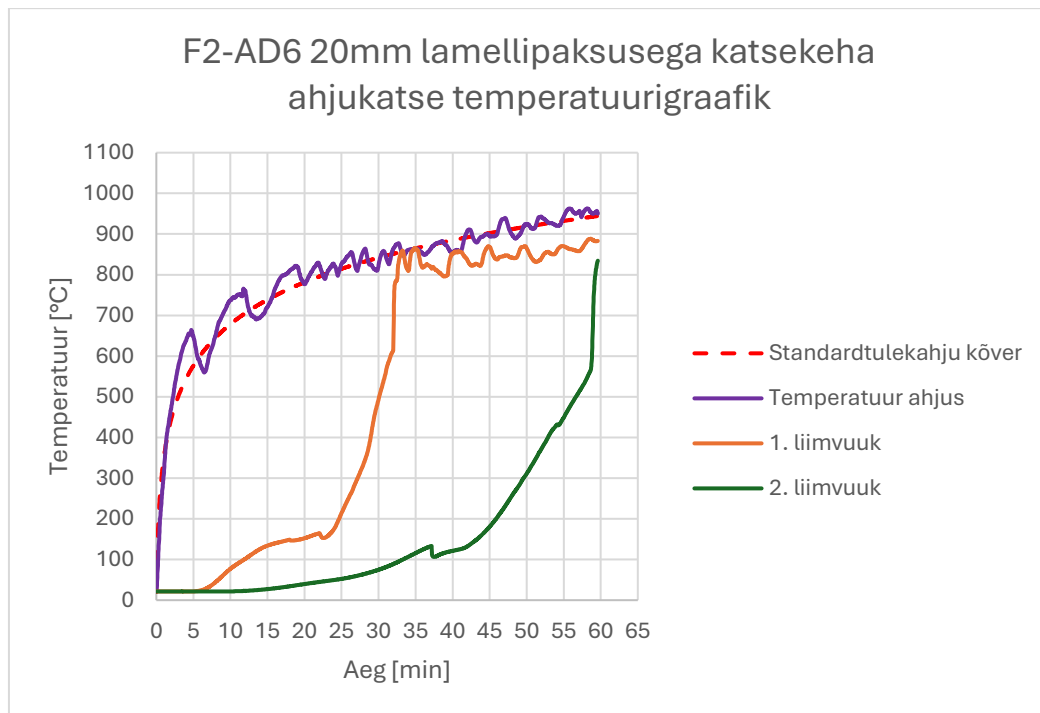
Tootja B ahjukatse temperatuure jälgiti reaajas arvutist. Jälgida tuli temperatuuri ahjus, et püsida standardtulekahju temperatuurikoridoris. Samuti esimese ja teise liimvuugi temperatuure. Ahjukatsetes katsetati neli viiekihilist 20 mm lamellipaksusega katsekeha ning kolm viiekihilist 35 mm lamellipaksusega katsekeha.

Joonis 35 esitab F1-AD5 katsekeha ahjukatse temperatuurigraafiku. Katse alguses on temperatuur tõusnud kiiresti sarnaselt standardtulekahju kõverale. Temperatuur ahjus on käinud lainetega ülevall alla, sest gaasipõleti juhtimine käis manuaalselt. Mõlemas liimvuugis on täheldatud temperatuuride kukkumist pärast 100°C ületamist ning vee aurustamist. 2. liimvuugis jõudis temperatuur 300°C juurde 42. minutil.



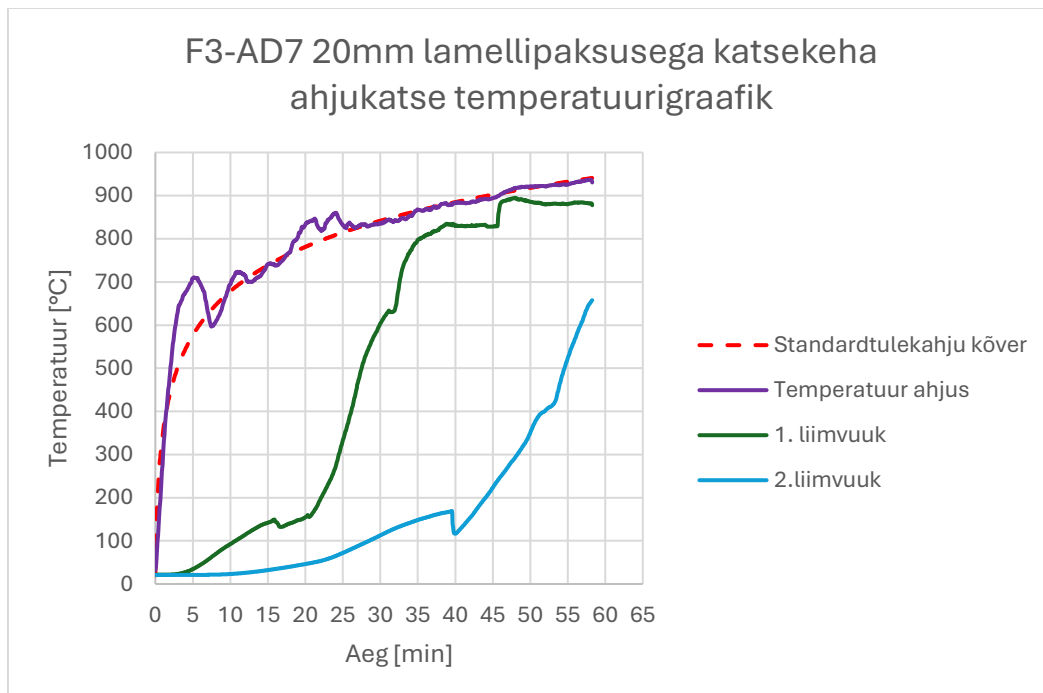
Joonis 35 Tootja B F1-AD5 20 mm lamellipaksusega katsekeha ahjukatse temperatuurigraafik

Joonis 36 esitab F2-AD6 ahjukatse temperatuurigraafiku. Selles katses on ilmnenud samuti temperatuuri kukkumine mõlema liimvuugi piirkonnas temperatuuri jõudmisel 150°C juurde. Sõestumine jõudis selles katses teise liimvuugini 50. minutil.



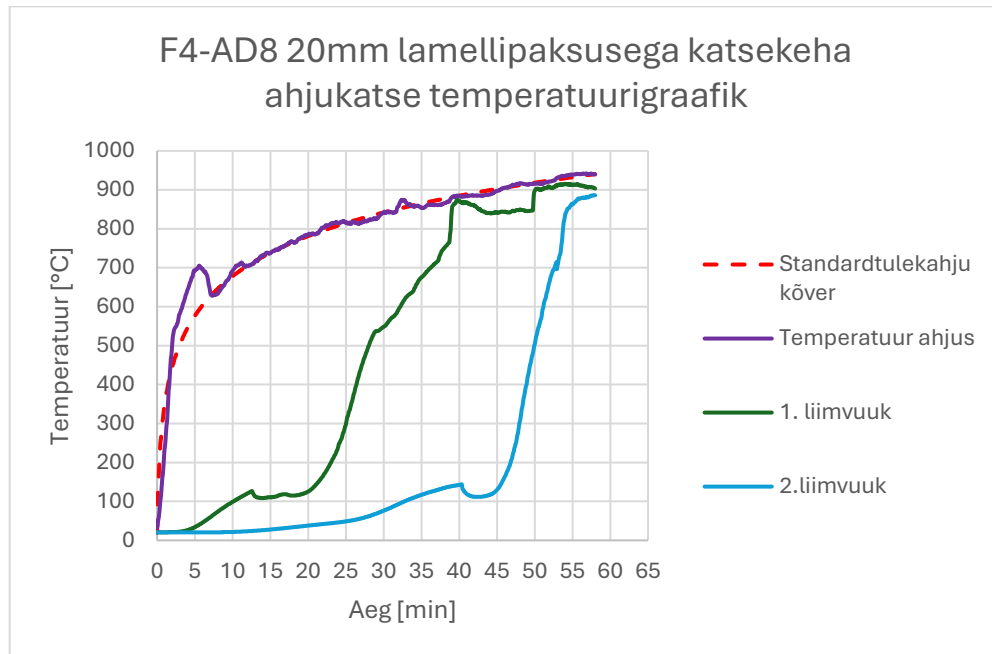
Joonis 36 Tootja B F2-AD6 20 mm lamellipaksusega katsekeha ahjukatse temperatuurigraafik

Joonisel 37 on näha katsekeha F3-AD7 ahjukatse temperatuurigraafikut. Temperatuur jõudis teises liimvuugis 300°C juurde 49. minutil. Katse lõpufaasis on näha, et teise liimvuugi temperatuur on jäänud ligi 200°C madalamale, kui 1. liimvuugis ja ahjus. Sellest saab järeldada, et teine lamell pole delamineerunud.



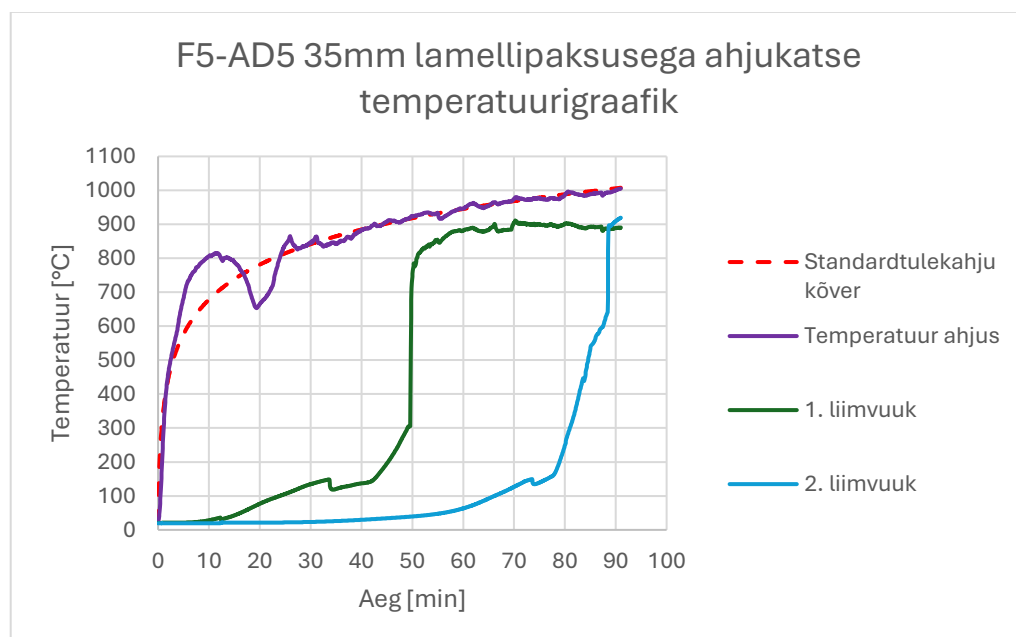
Joonis 37 Tootja B F3-AD7 20 mm lamellipaksusega katsekeha ahjukatse temperatuurigraafik

Joonisel 38 on F4-AD8 ahjukatse temperatuurid. Selles katses on näha temperatuuride kukkumist mõlemas liimvuugis pärast 100°C piiri ületamist. Temperatuur on pärast langemist püsinud 100 °C juures ligi 5 minutit enne uuesti tõusma hakkamist. Teises liimvuugis jõudis temperatuur 300°C juurde 48. minutil.



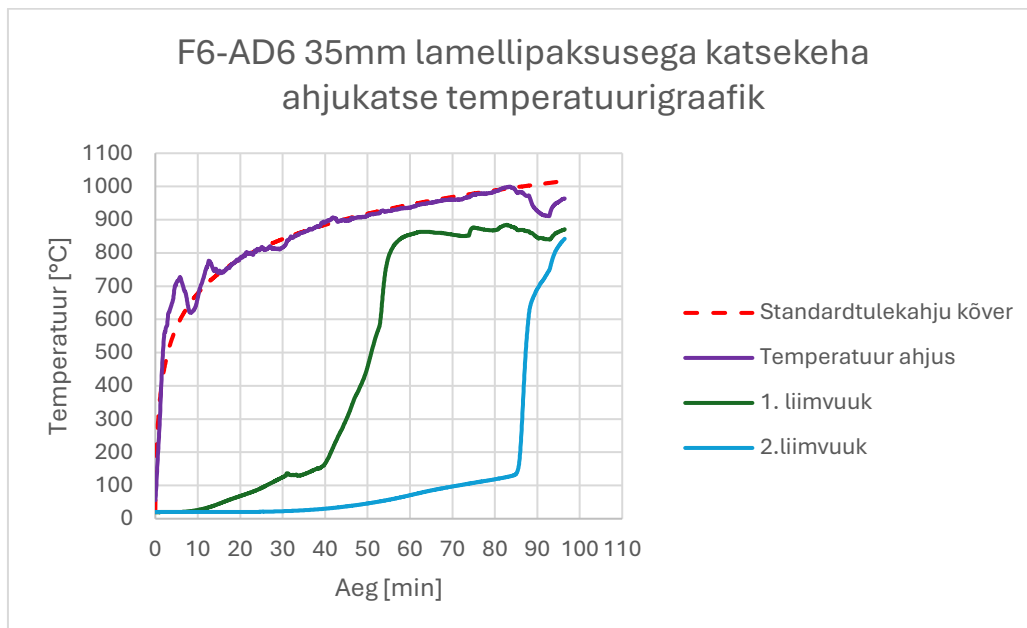
Joonis 38 Tootja B F4-AD8 20 mm lamellipaksusega katsekeha ahjukatse temperatuurigraafik

Joonisel 39 on katsekeha F5-AD5 ahjukatse temperatuurid. 300°C jõuti teises liimvuugis 81. minutil.



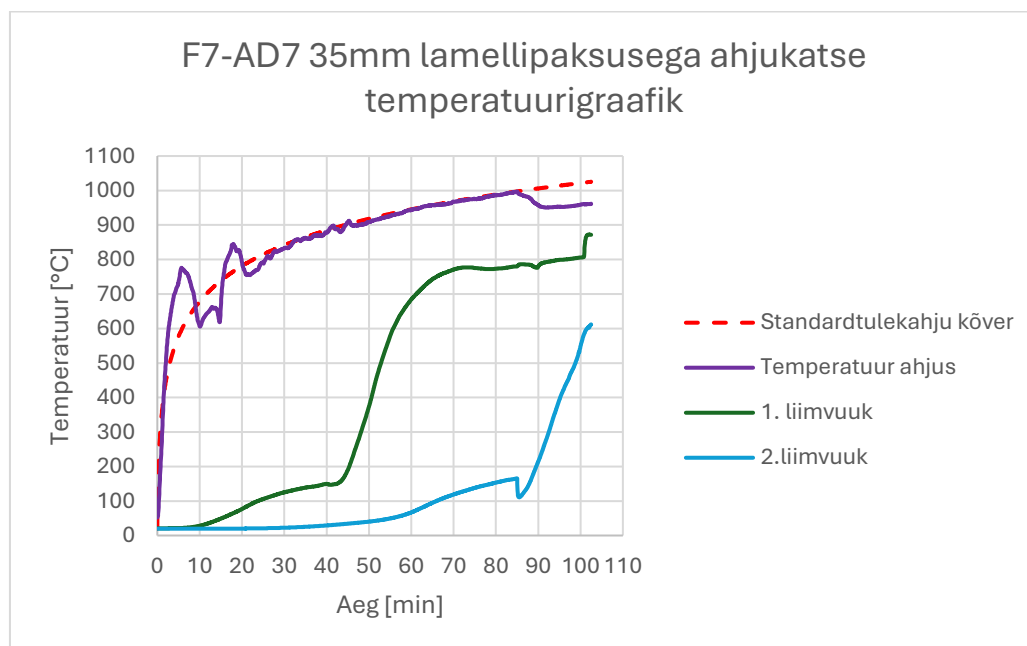
Joonis 39 Tootja B F5-AD5 35 mm lamellipaksusega katsekeha ahjukatse temperatuurigraafik

Joonisel 40 on näha katse F6-AD6. Söestumine jõudis teise liimvuugini 87. minutil. Katse lõpufaasis on näha ahjute temperatuuri kukkumist. Arvatavasti oli põhjuseks vähene hapniku ligipääs ahju või korstna ebapiisav väljatõmme.



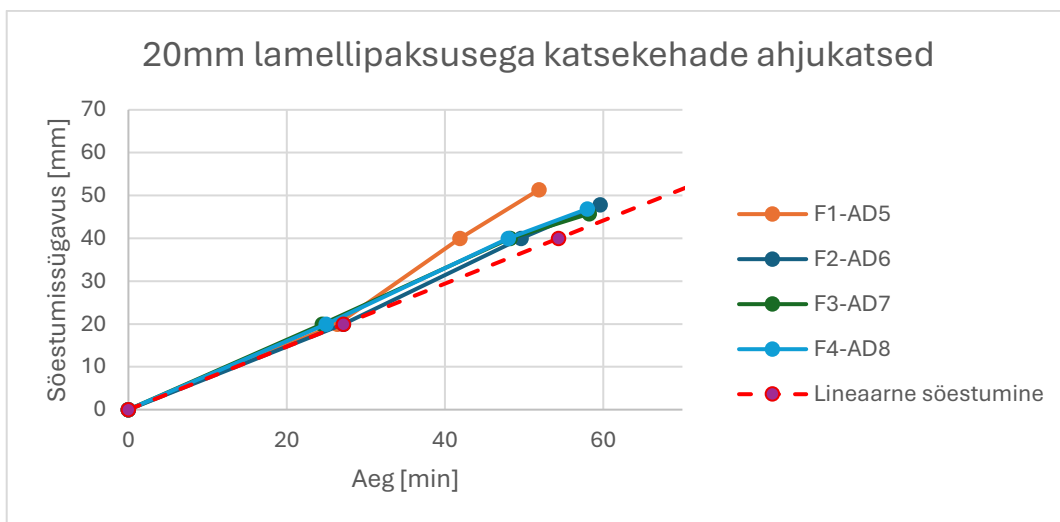
Joonis 40 Tootja B F6-AD6 35 mm lamellipaksusega katsekeha ahjukatse temperatuurigraafik

Joonisel 41 on katsekeha F7-AD7 ahjukatse temperatuurigraafik. Söestumise jõudmine teise liimvuugini võttis selles katses aega 92 minutit. Siin on ka näha, et delamineerumist pole toimunud, sest temperatuur teises liimvuugis on jäänud peaaegu 400°C madalamale kui temperatuur ahjus.



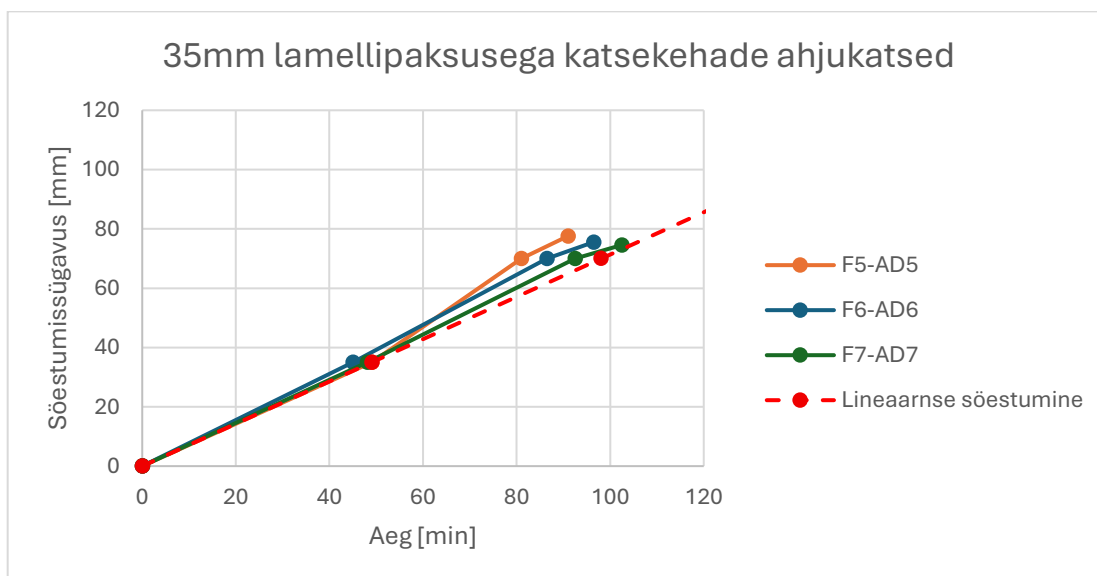
Joonis 41 Tootja B F7-AD7 35 mm lamellipaksusega katsekeha ahjukatse temperatuurigraafik

Joonis 42 esitab 20 mm lamellipaksusega katsekehade söestumiskiiruse võrreldes lineaarse söestumismudeliga. Kõikide katsekehade puhul on näha, et pärast esimese lamelli söestumist on söestumiskiirus tõusnud ning seetõttu tuleb arvestada astmelise söestumismudeliga. Kõige suurem söestumiskiirus oli katsekehal F1-AD5 ning kõige lähedasem lineaarsele söestumismudelile F2-AD6. Mõjutav tegur on katsekehade madal 6% niiskussisaldus, mis tõstis söestumiskiirust võrreldes Eurokoodeks 5 baasväärtusega (0,65 mm/min). Joonistel 42 ja 43 on lineaarse söestumismudeli katkendjoon võetud esimese lamelli söestumise järgi katsekehal F2-AD6.



Joonis 42 Tootja B 20 mm lamellipaksusega ahjukatse katsekehade söestumiskiiruse graafik

Tootja B 35 mm lamelliga katsekehad näitasid samuti söestumiskiiruse suurenemist pärast esimese lamelli söestumist. Kõige suurem oli söestumiskiirus katsekehal F5-AD5.



Joonis 43 Tootja B 35 mm lamellipaksusega ahjukatse katsekehade söestumiskiiruse graafik

Joonisel 44 on näha Tootja B katsekeha pärast ahjukatset. Visuaalselt on näha üsna suurt lamellide eraldumist paneeli keskosas.



Joonis 44 Tootja B katsekeha pärast ahjukatset

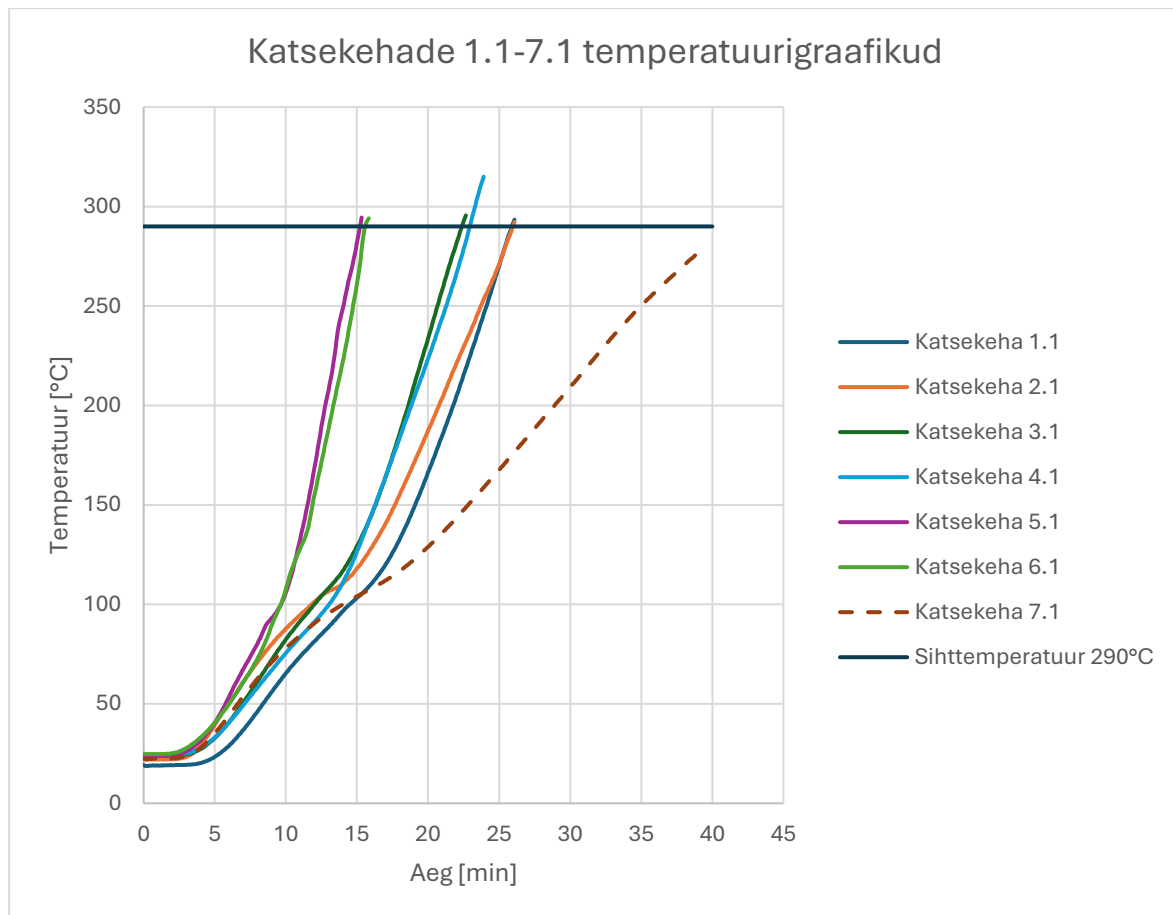
5.3 Katsete võrdlev analüüs

5.3.1 Tootja A PUR 2 katsekehade temperatuurigraafikute võrdlus tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas

Enne Lundi Ülikoolis läbiviidud katseid eeldati, et madal hapnikusisaldus aeglustab puidu söestumist. Seda hüpoteesi kinnitab asjaolu, et kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas toimus puidu söestumine ilma leegita. Temperatuurigraafikute analüüs näitab, et kindla sihttemperatuurini saavutamiseks liimvuugis kulus kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas oluliselt rohkem aega kui tavakeskkonnas. Seega leidis esialgne eeldus kinnitust.

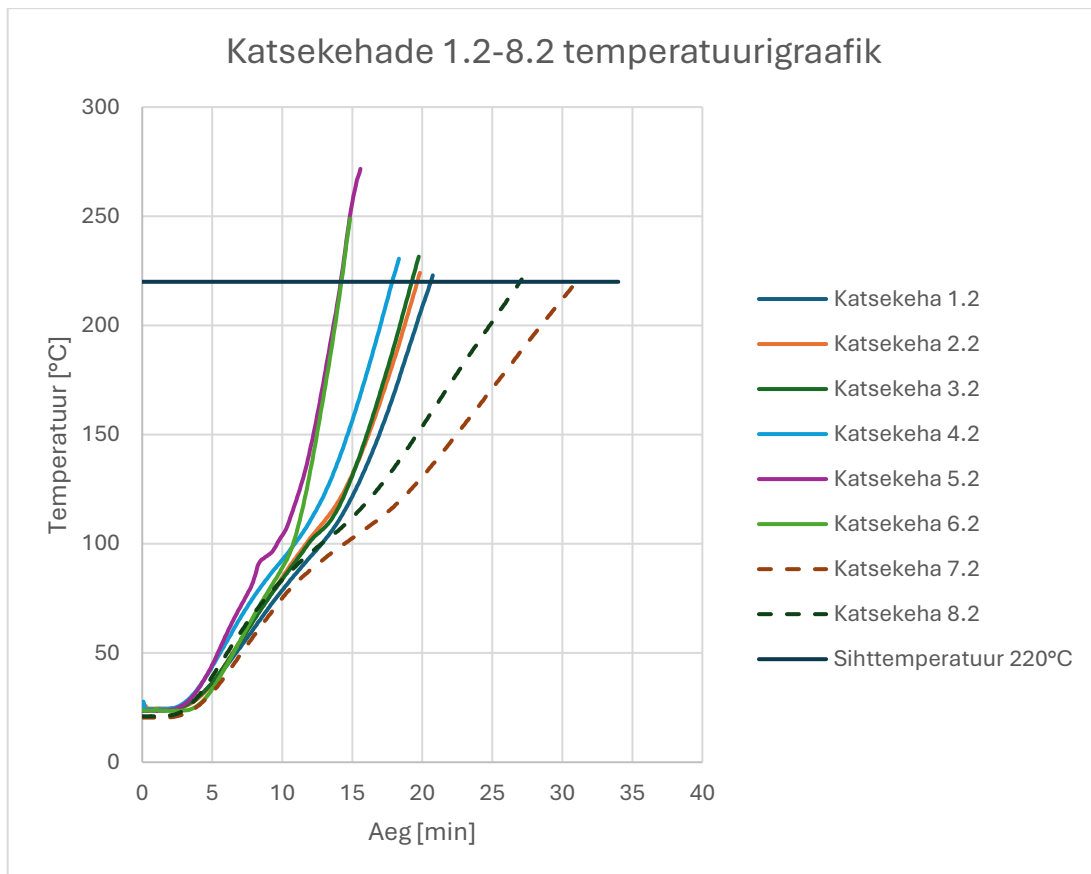
Tootja A PUR2 liimiga viidi läbi koonuskuumuti katsed nii tavakeskkonnas kui ka kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas. Mõlemas keskkonnas oli katseseeriade sihttemperatuurideks liimvuugis 180°C, 220°C ja 290°C. Võrdlusest on näha, et kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas katsetatud katsekehade temperatuuri jõudmine soovitud suuruseni liimvuugis võttis tunduvalt rohkem aega kui tavakeskkonnas. Kuni temperatuurini 100°C on mõlemas keskkonnas katsetatud katsekehade liimvuugi temperatuuri tõus olnud sama, kuid peale 100°C ehk vee aurustumist on temperatuur edasi tõusnud kiiremini tavakeskkonnas katsekehadel. Sihttemperatuuri juures 290°C oli tavakeskkonnas kõige pikem katse kestvuselt 26 minutit, kontrollitud keskkonnas aga 39 minutit.

Joonised 45, 46 ja 47 näitavad erinevates katsetingimustes tehtud katsekehade temperatuurigraafikuid, katkendjoonega on igal graafikul märgitud kontrollitud hapnikusisaldusega katsetatud katsekehad.



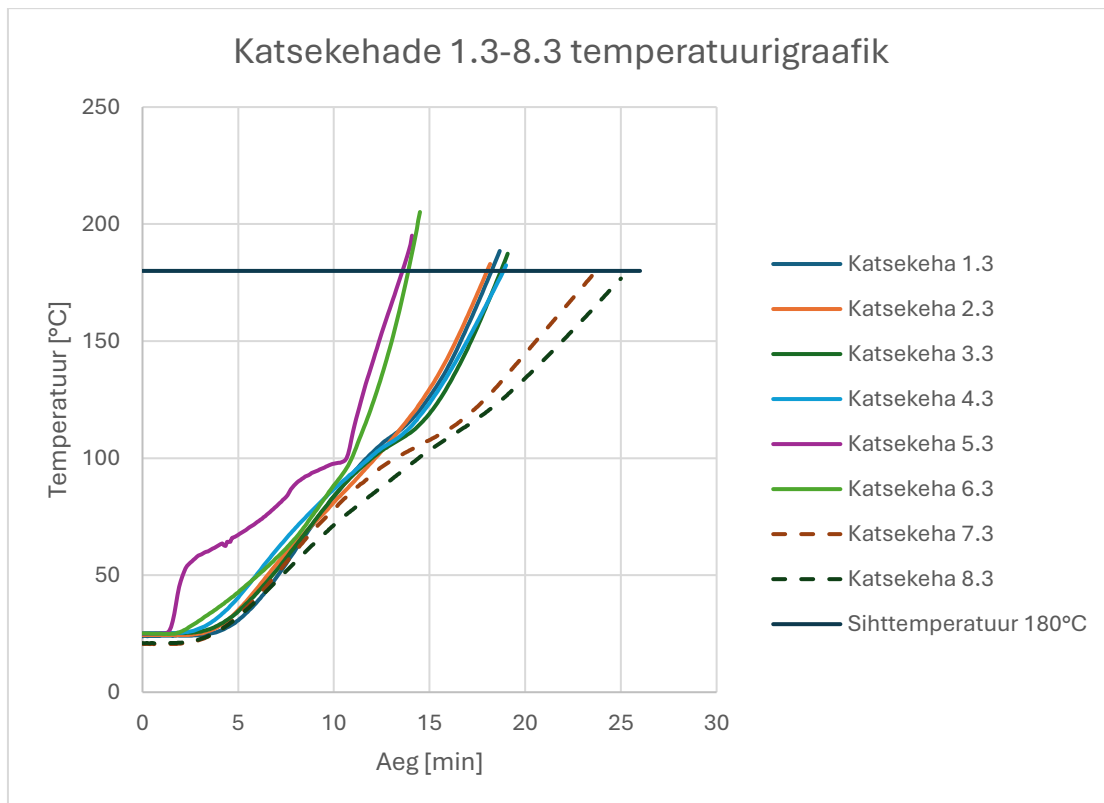
Joonis 45 Tootja A katsekehade temperatuurigraafik tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas sihttemperatuurini 290°C

Sihttemperatuurini 220°C liimvuugis jõudmiseks kulus tavakeskkonnas kõige rohkem aega 21 minutit, seevastu kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas oli kahest katsest lühem 34 minutit (joonis 46).



Joonis 46 Tootja A katsekehade temperatuurigraafik tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas sihttemperatuurini 220°C

Sihttemperatuurini 180°C liimvuugis jõudmiseks võttis tavakeskkonnas pikim katse aega 19 minutit, kontrollitud keskkonnas oli lühem katse 24 minutit (joonis 47).



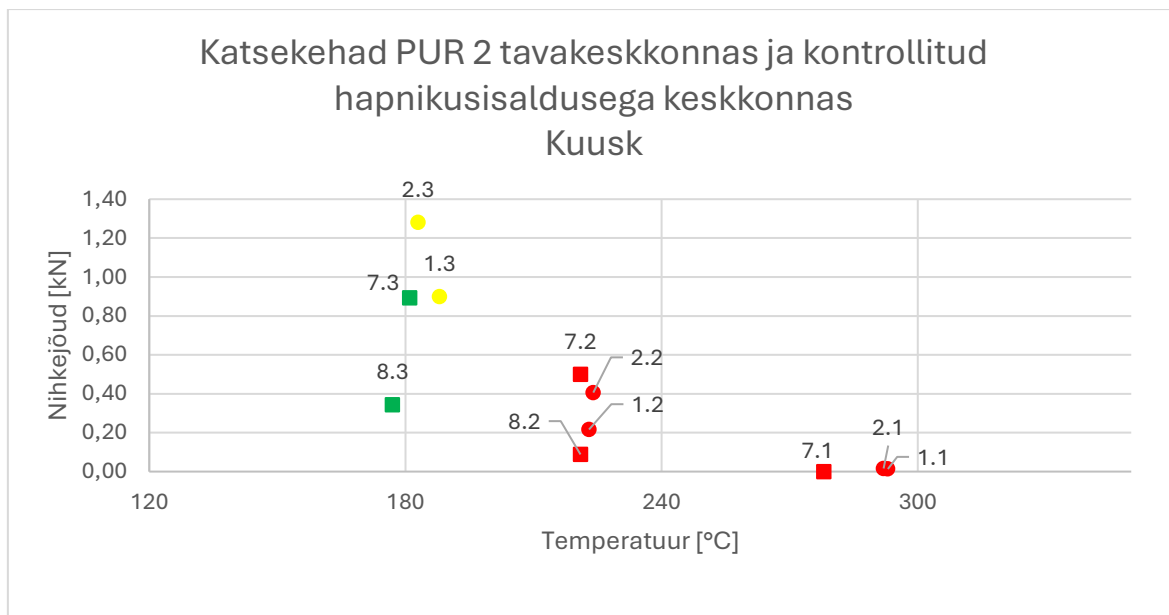
Joonis 47 Tootja A katsekehade temperatuurigraafik tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas sihttemperatuurini 180°C

Temperatuurigraafikute võrdlusest on näha, et temperatuuri tõus katse algfaasis ligi 100°C juurde oli mõlemas tingimuses sarnane. Erinevus ilmnes aga vee aurustumise piirkonnas, kus pärast 100°C läve oli temperatuuri kasv kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas märgatavalt aeglasem, kui tavakeskkonnas. See viitab sellele, et madal hapnikusisaldus mõjutab oluliselt vee aurustumise järgset soojuse leviku ja söestumisprotsessi kulgu.

5.3.2 Tootja A PUR 2 katsekehade nihkekandevõime võrdlus tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas

Joonis 48 esitab temperatuurid liimvuugis ja nihkekandevõimed tavakeskkonnas ja kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas. Ruudukujulised on katsekehad, mis katsetati kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas ning ringikujulised tavakeskkonnas. Sihttemperatuuril 180°C on näha erinevust purunemisviisides. Kui tavakeskkonnas purunesid katsekehad puidu-liimi koosmõjul, siis kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas oli mõlema katsekeha purunemine ainult puidust. Teiste sihttemperatuuride juures olid purunemisviisid kahe erineva katsetuskeskkonna juures samad.

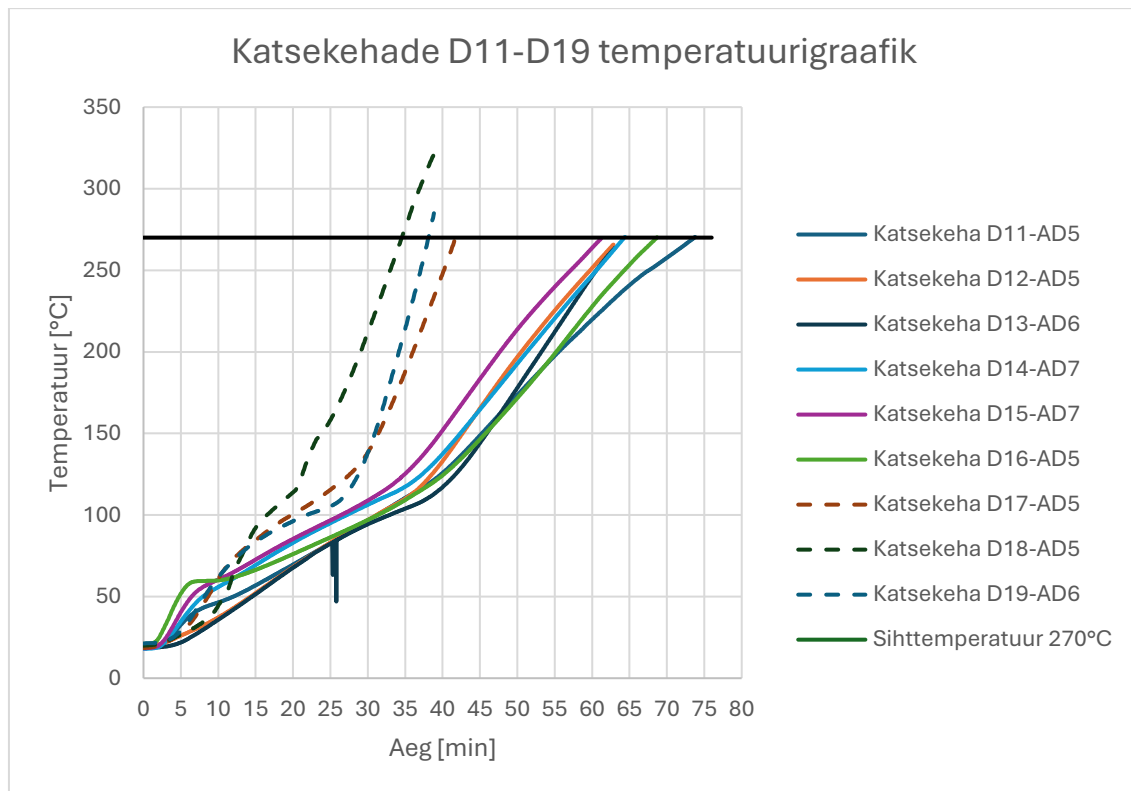
Lisaks näitas katsekehade katsejärgne visuaalne hindamine, et liimvuugi purunemispind oli kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas homogeensem.



Joonis 48 Tootja A PUR 2 katsekehade nihkekandevõime tavakeskkonnas ja kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

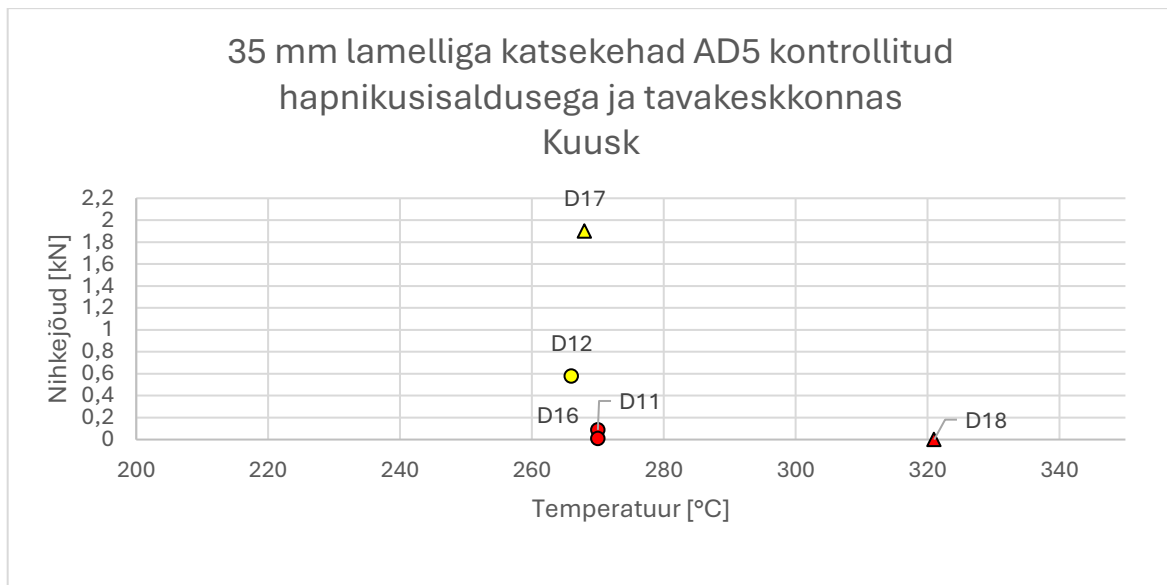
5.3.3 Tootja B liimvuugi terviklikkuse võrdlus koonuskatsetes tava- ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas

Tootja B koonuskatsetes tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas oli samuti erinevuseks aeg sihttemperatuurini jõudmiseks, sarnaselt Tootja A katsetega. Mõlemas keskkonnas katsetati liime AD5 ja AD6, katsekeha lamellipaksus oli 35 mm ja sihttemperatuur liimvuugis 270°C. Katsekehade temperatuurigraafik on esitatud joonisel 49. Tavakeskkonnas katsetatud katsekehad on märgitud katkendjoonega.

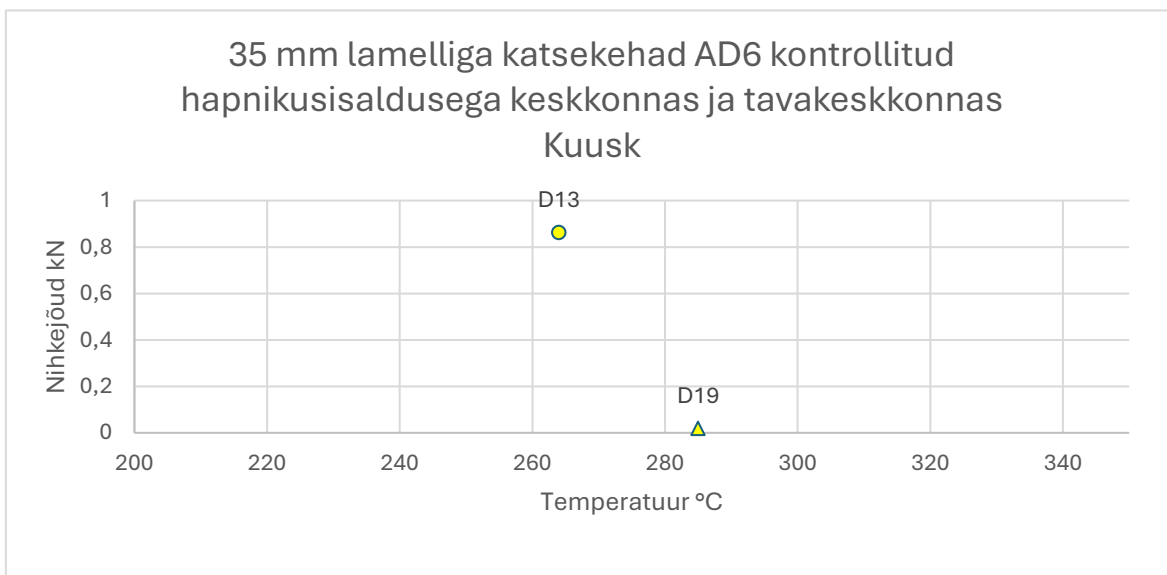


Joonis 49 Tootja B katsekehade temperatuurigraafik tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas sihttemperatuurini 270°C

Joonistel 50 ja 51 on näha tavakeskkonnas ja kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas katsetatud Tootja B katsekehade tegelikke temperatuure liimvuugis ja nihketugevusi. Kolmnurksed katsekehad on tavakeskkonnas katsetatud ja ringikujulised kontrollitud keskkonnas. Liimi AD5 puhul on suurem nihketugevus olnud tavakeskkonnas katsetatud katsekehal. Seevastu liimi AD6 katsekehade puhul on suurem nihketugevus olnud kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas katsetatud katsekehal.



Joonis 50 Tootja B AD5 katsekehade nihkekandevõimed ja tegelikud temperatuurid liimvuugis tavakeskkonnas ja kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

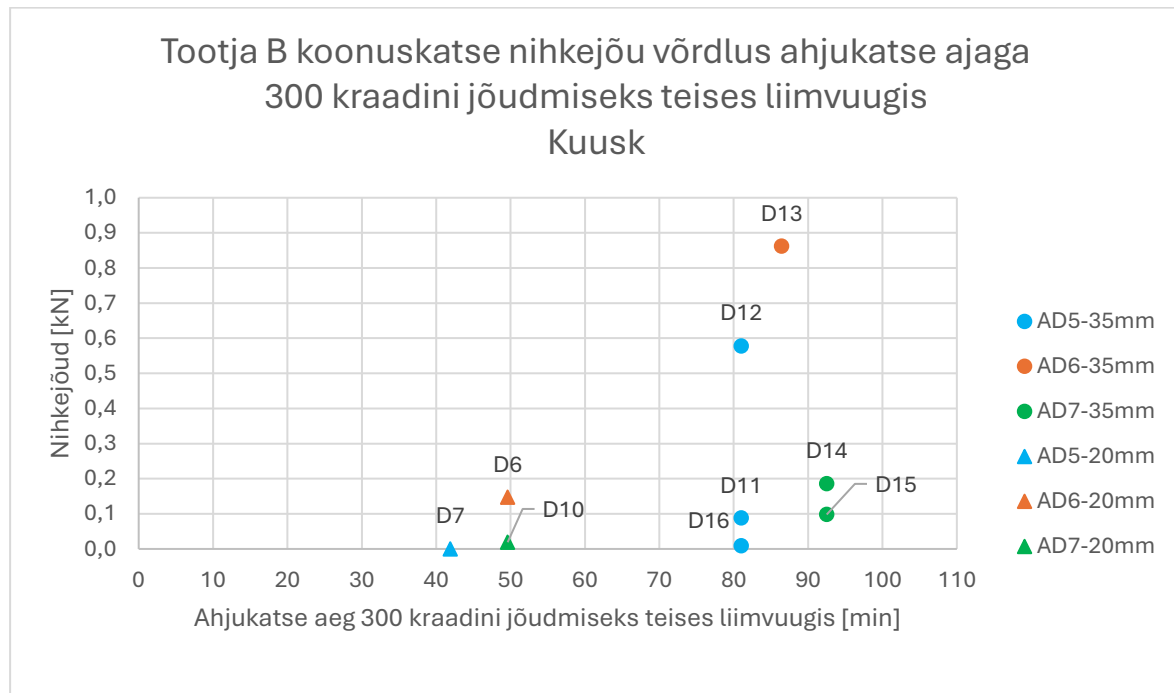


Joonis 51 Tootja B AD6 katsekehade nihkekandevõimed ja tegelikud temperatuurid liimvuugis tavakeskkonnas ja kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas

5.3.4 Tootja B koonuskatsete ja ahjukatsete võrdlus

Joonis 52 esitab Tootja B koonuskatsete nihkekandevõimed sihttemperatuuril 270°C sama liimiga ahjukatse ajateljel. Kolmnurkadega on tähistatud 20 mm lamelliga ja ringikujulised 35 mm lamelliga koonuskatsekehad. Graafik nihkekandevõime ja sõestumiskiirus. Jooniselt selgub, et liim AD6 on andnud suurima nihkekandevõime koonuskatsetes ja ahjukatsetes mõlema lamellipaksuse puhul ajaliselt teine. 20 mm ja 35 mm lamelliga ahjukatsetes oli parim liim AD7. Kõige väiksemaid tulemusi nii

ahjukatsetes, kui koonuskatsetes on andnud liim AD5. Liimi AD5 katsekeha D12 on purunenud liimi-puidu koosmõjul ja seetõttu andnud ka suurema nihketugevuse, kui katsekehad D11 ja D16, mis mõlemad purunesid liimist. Katsekeha D12 tegelik temperatuur liimvuugis oli 266°C, katsekehadel D11 ja D16 oli temperatuur liimvuugis pisut kõrgem 270°C. See võib olla põhjus miks nihketugevus katsekehal D12 on suurem, kui teistel sama liimiga katsekehadel.



Joonis 52 Tootja B ahjukatse ajaline võrdlus koonuskatse nihkekandevõimega

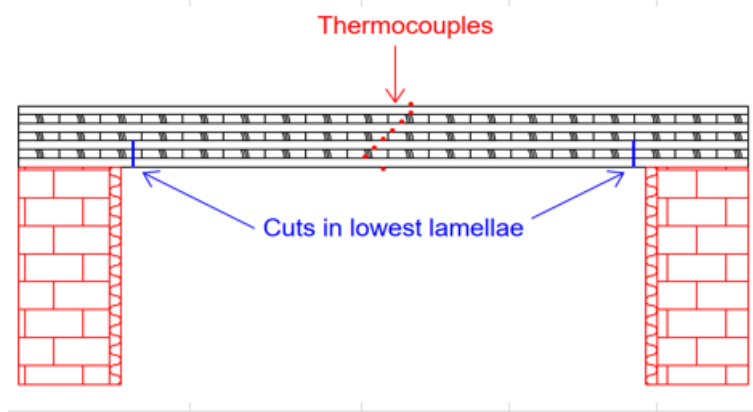
5.3.5 Tootja B 20 mm lamelli võrdlus 35 mm lamelliga

Tootja B erineva lamellipaksusega katsekehade nihkekandevõime katsete põhjal selget seost, kas üks annab suurema tugevuse kui teine, luua ei saa. Mõne liimi puhul oli kõrgemal temperatuuril tugevam 35 mm lamelliga katsekeha, mõne teise liimiga vastupidi, tugevam oli 20 mm lamelliga katsekeha. Joonised 28, 29 ja 30 esitavad erineva lamellipaksusega Tootja B katsekehade nihkekandevõimed.

Kindla erinevusena võib välja tuua katse ajalise pikkuse. Paksema lamelliga katsekeha sihttemperatuurini liimvuugis jõudmine kõikidel katsetel ligi 25-30 minutit pikem. See tähendab, et sama aja sees saab väiksemaid katsekehasid katsetada pea kaks korda rohkem, mis teeb sellest ajaefektiivsema katsemeetodi. 20 mm on ka ristkihtliimpuitpaneelides kõige õhukesem lubatud lamellipaksus, seega ka kõige kriitilisem.

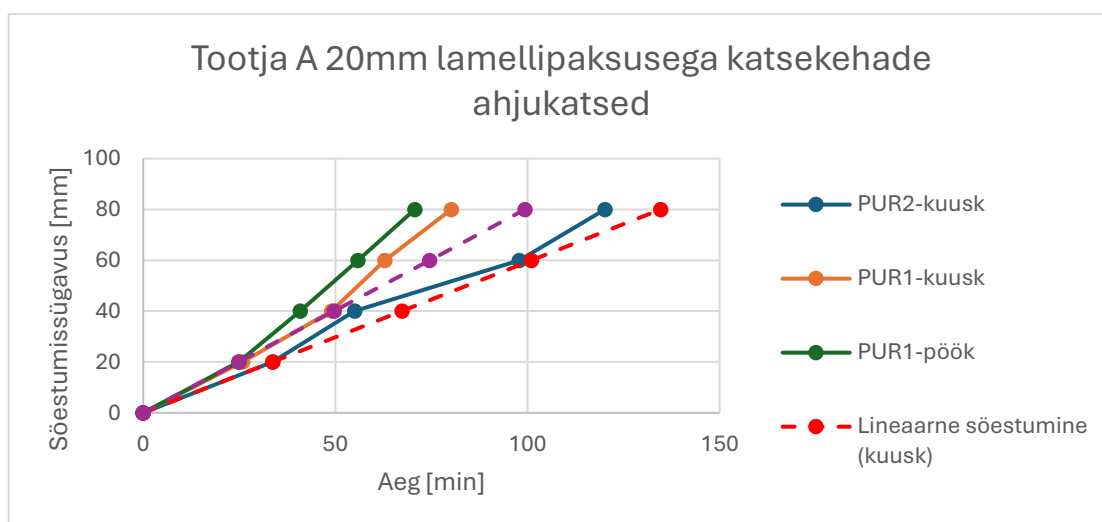
5.3.6 Tampere ahjukatsed võrreldes TalTechi ja Lundi koonuskatsetega Tootja A katsekehadega

Soomes katsetati Tootja A PUR1 ja PUR2 liime samade puiduliikidega ahjukatsetes. Soome katsekehad olid seitsme 20 mm lamellipaksusega paneelid. Joonis 53 kirjeldab Soomes läbiviidud ahjukatset.



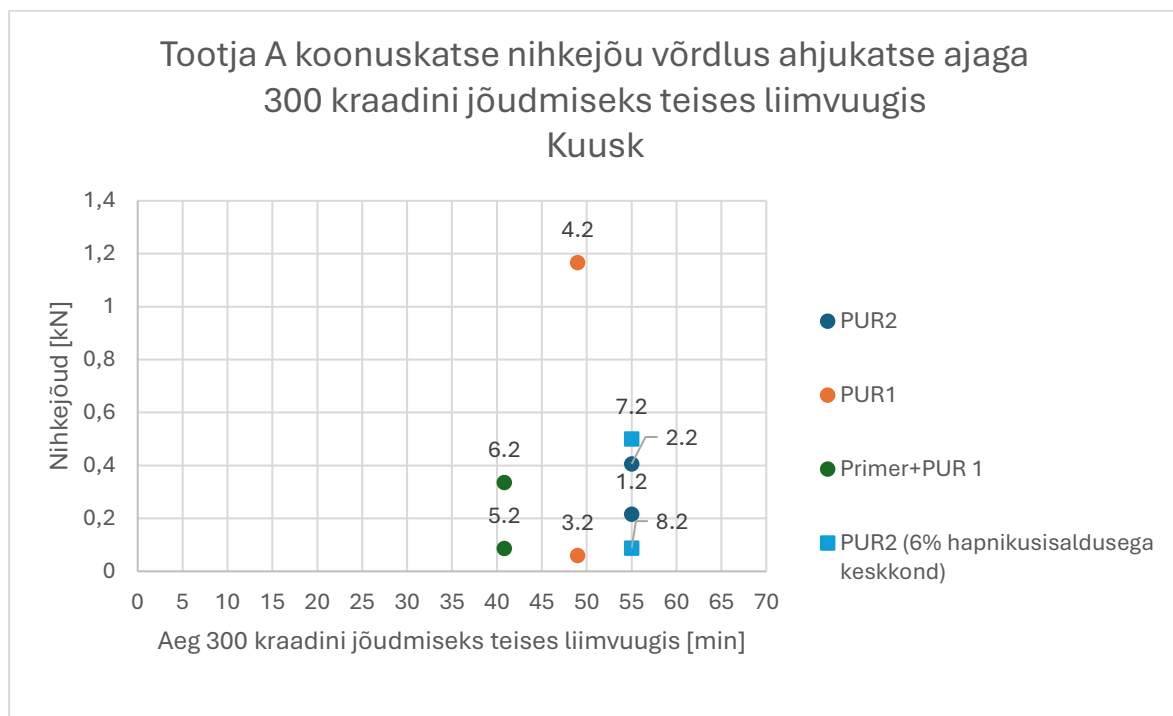
Joonis 53 Tootja A katsekehade ahjukatse Soomes

Joonisel 54 on 20 mm lamellipaksusega Tootja A ahjukatsekehade söestumiskiirused võrreldes lineaarse söestumismudeliga. Lineaarse söestumismudeli katkendjoon on võetud esimese lamelli söestumise järgi katsekehadel PUR2-kuusk ja PUR1-pöök. Kõikide katsekehade puhul on näha söestumiskiiruse tõusu pärast esimese lamelli söestumist. Seetõttu tuleb arvestada astmelise söestumismudeliga. Kõige lähedasem lineaarsele söestumismudelile on katsekeha PUR2-kuusk söestumine. PUR2-kuusk katsekehal on näha söestumiskiiruse langust pärast teise lamelli söestumist, mis viitab sellele, et teine lamell pole nii kiiresti delamineerunud kui esimene. Kõige suurem söestumiskiirus oli katsekehal PUR1-pöök.



Joonis 54 Tootja A ahjukatsete söestumiskiiruse graafik

Joonis 55 võrdleb TalTechis ja Lundis läbi viidud koonuskatseid Soome ahjukatsetega. Horisontaaltelg kuvab kolme Soomes läbiviidud ahjukatse aja 300 kraadini jõudmiseks teises liimvuugis. Iga ahjukatse ajanäidu kohale on lisatud nihketugevused sama liimi ja puiduga koonuskatsekehade kohta sihttemperatuuril 220°C. Rohelise värviga on märgitud põõgist katsekehad, teised on kõik kuusest. Ruudukujulised on koonuskatsekehad, mis katsetati Lundi Ülikoolis kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas. Ahjukatsete omavaheline ajaline võrdlus näitab samuti, et põõgist söestus kõige kiiremini, sama juhtus ka koonuskatsetel. Keskmine söestumiskiirus on nii ahjukatsetel kui ka koonuskatsetel tavakeskkonnas olnud PUR1 katsekehadel. Kõige pikem söestumisaeg PUR2 katsekehadel. Katsekeha 4.2 nihketugevus on suurem kui teistel katsekehadel. Seda võib põhjendada sellega, et katsekeha 4.2 purunes liimipuidu koosmõjul, seevastu kõik teised kuusest katsekehad purunesid sellel sihttemperatuuril ainult liimist. Koonuskuumuti katsekehade temperatuurigraafik tavakeskkonnas on näidatud joonistel 15, 16 ja 17.



Joonis 55 Tootja A ahjukatse ajaline võrdlus koonuskuumuti katsekehade nihkejõuga

5.4 Järeldused

Tootja A kolme erineva PUR liimiga läbiviidud koonuskalorimeetri katsete tulemused tavakeskkonnas näitasid üheselt, et kõik testitud PUR liimid kaotavad olulise osa oma nihkekandevõimest juba temperatuurivahemikus 180°C kuni 220°C. Temperatuuril 290°C oli liimvuugi tugevus enamasti nullilähedane või täielikult kadunud. See kinnitab,

et Tootja A PUR liimide termiline lagunemine toimub varem kui puidu intensiivne söestumine (umbes 300°C), mistõttu on liimvuuk CLT konstruktsiooni tulepüsivuse üks kriitilisemaid tegureid. Kahe kasutatud puiduliigi võrdluses oli näha, et pöögist valmistatud katsekehadel toimus söestumine kõige kiiremini, mis tähendab, et liimi lagunemine algab varem ning see võib tulekahjuolukorras saada otsustavaks teguriks.

Kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas oli nihketugevuse langus samades temperatuurivahemikes Tootja A katsekehadel sarnane tavakeskkonnale, kuid pisut lineaarsem. Kontrollitud keskkonnas ei täheldatud ülemise lamelli pragunemist ning söestumine oli ühtlasem. Tavakeskkonnas esines seevastu mitmel katsekehal ebaühtlast kuumenemist, ülemise lamelli pragunemist ning olukordi, kus söestumine jõudis ühel pool liimvuuki juba järgmise lamellini, samal ajal kui teisel pool oli temperatuur tunduvalt madalam. Selline ebaühtlane liimvuugi kuumenemine on suure tõenäosusega põhjustanud mõningatel katsekehadel liimi-puidu koosmõjul purunemist. Sellest tulenevalt võib öelda, et kontrollitud katsekeskkonnas on söestumine pisut ühtlasem, küll aga on selline katsetusmeetod ajakulukam ja kallim, kui tavaline koonuskalorimeetri katse.

Tootja A PUR2 liimidega katsekehade nihkekandevõime võrdlus kahes erinevas katsetuskeskkonnas näitas, et tulemused on üsna sarnased mõlema keskkonna puhul. Ettepanek katsetusmeetodi ühtlasemaks muutmiseks oleks see, et katsekeha ettevalmistuses tuleks veenduda, et katsekeha sälgud ja küljed oleks korralikult isoleeritud, et ei juhtuks varajast kuumenemist lamelli külgedel. Tavakeskkonnas tehtud katsed, kus temperatuurinäidud termopaarides erinesid suurelt, näitasid hiljem visuaalsel analüüsil seda, et leek oli pääsenud katsekeha külgedele ning see hakkas külgedelt söestuma. See põhjustas kiirema temperatuuritõusu ühel pool liimvuuki.

Võrreldes Tootja A koonuskalorimeetri katseid Soomes läbi viidud samade liimide ahjukatsetega, siis võib öelda, et korreleeruvus on olemas ajaliselt. Söestumiskiirus pöögist valmistatud katsekehadel oli kõige suurem nii ahjukatsetes kui ka koonuskatsetes. Suuruselt teise söestumiskiirusega olid katsekehad PUR1 kuusest ning kõige väiksema söestumiskiirusega PUR2 kuusest katsekehad nii ahju- kui koonuskatsetes.

Tootja B koonuskalorimeetri katsetes kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas kahe erineva lamellipaksusega katsekehadega näitas, et seos lamellipaksuse ja nihketugevuse vahel pigem puudub. Sarnaselt Tootja A liimidele oli ka Tootja B katsekehadel näha liimide sidususe kadu temperatuuri tõusmisel liimvuugis. Liimi AD6 puhul oli temperatuuril 260 °C tugevam 20 mm lamelliga katsekeha, samas kui liimi AD7 puhul andsid 270°C juures paremaid nihketugevuse tulemusi 35 mm lamelliga

katsekehad. Kuna ajaliselt on 35 mm lamelliga katse tunduvalt pikem ning lämmastikku kulub rohkem, siis ajaefektiivsem ja odavam oleks teha 20 mm katseid. Kui rõhk panna korduste arvule, siis jõuab sama ajaga teha kaks katset 20 mm lamelliga, aga ainult ühe katse 35 mm lamelliga.

Tootja B koonuskatsete puhul ilmnes kahe keskkonna vahel suurem erinevus. Kontrollitud hapnikusisaldusega keskkonnas olid temperatuurigraafikud ühtlasemad, pragunemine väiksem ja liimvuugi purunemispinnad homogeensemad. Tavakeskkonnas oli söestumine oluliselt ebaühtlasem. Teades, et söestumine algab ligi 300°C juures, siis oli sihttemperatuuril 270°C visuaalsel katsejärgsel analüüsil näha, et ühel pool liimvuugis oli 300°C juba järgmise lamellini jõudnud, aga teisel pool võis temperatuur olla ligi 250°C. Seda kinnitas ka termopaaride suur temperatuurinäitude erinevus. Suurem erinevus Tootja B katsekehade vahel eri keskkondades on ilmselt põhjustatud erinevast katsekeha ettevalmistusviisist, kui Tootja A katsekehadel. Tootja B katsekehadel puudus tulekindel kips. Selle asemel oli ainult metallkarp, mis katsekeha kuumuse eest nii hästi ei isoleerinud ning söestumine külgedel oli suurem.

Tootja B väikemahuliste koonuskatsete ja ahjukatsete vahel ilmnes nõrk korrelatsioon. Näiteks liimi AD6 puhul, mis koonuskatsetes andis parima nihkekandevõime ja ahjukatses jäi väga väikese ajalise erinevusega teiseks. Liim AD5 andis 20 mm lamelliga koonuskatsetes kõige väiksema nihketugevuse sihttemperatuuril 270°C, samuti oli söestumiskiirus ahjukatses kõige suurem. 20 mm lamelliga liimi AD7 katsekeha andis nii koonuskatses kui ka ahjukatses parema tulemuse, kui liim AD5.

Mõlema tootja katsekehade tulemusi analüüsides selgub, et PUR liimide puhul tuleb kasutada astmelist söestumismudelit, mis arvestab delaminatsiooni riski. Hästi ettevalmistatud koonuskuumuti katsed tavakeskkonnas annavad hea võimaluse ennustada ahjukatsete käitumist. Sama tähelepanek kehtib ka kahe katsetuskeskkonna võrdluses. Tootja A katsekehad andsid mõlemas keskkonnas üsna sarnaseid tulemusi, mis viitab, et edaspidi võiks nende liimide puhul piisata lihtsamatest ja odavamatest tavakeskkonna koonuskatsetest. Tootja B puhul oli erinevus kahe keskkonna vahel märgatavalt suurem, mis on suuresti tingitud katsekehade erinevast ettevalmistusest. Kipsiga külgedelt isoleerimine andis oluliselt ühtlasemaid tulemusi võrreldes ainult metallkarbi kasutamisega. Seetõttu on koonuskuumuti katsete reprodutseeritavuse ja usaldusväärsuse parandamiseks määrava tähtsusega katsekeha korrektne ettevalmistus.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk oli hinnata polüuretaanliimidega valmistatud ristkihtliimpuidu liimvuukide tulepüsivust väikemahulistes koonuskuumuti- ja täismõõdulistes ahjukatsetes. Katsetati kahe erineva liimitootja liime nii tavakeskkonnas kui ka kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas.

Praktilises osas viidi läbi väikesemahulised koonuskuumuti katsed (ISO 5560-1) TalTechi ja Lundi Ülikooli laborites, kasutades soojusvoogu 50 kW/m². Katseid tehti Tootja A kahe erineva liimi ja puiduliigiga (kuusk ja pöök) ning Tootja B nelja erineva liimi ja kahe erineva lamellipaksusega. Lisaks viidi Lundi Ülikooli tulelaboris läbi ahjukatsed vastavalt Eurokoodeks 5 Lisa B nõuetele, et saada võrdlusmaterjali väikesemahuliste katsete tulemustega. Uuriti ka hapniku kontsentratsiooni mõju söestumise ühtlusele ja liimvuukide nihkekandevõimele. Võrreldi Tootja A katsekehade koonuskuumutikatseid Soomes Tampere Ülikoolis läbiviidud ahjukatsetega.

Katsetulemused kinnitasid, et PUR liimid on temperatuuritundlikud. Liimvuukide nihketugevus langes oluliselt temperatuurivahemikus 180°C kuni 220°C ning 290°C juures oli tugevus peaaegu kadunud. Pöögist valmistatud katsekehad näitasid kiiremat temperatuuritõusu ja söestumist, rõhutades puiduliigi olulisust CLT tulepüsivuse koha pealt kandekonstruktsioonides. Kontrollitud 6% hapnikusisaldusega keskkonnas toimus puidu pürolüüs ja söestumine ühtlasemalt kui tavakeskkonnas, pragude teke oli väiksem ja temperatuurimõõtmised reprodutseeritavad. Tootja A liimide puhul olid tulemused mõlemas keskkonnas suhteliselt sarnased, samas kui Tootja B katsekehadel ilmnis suurem erinevus katsetulemustes kahe erineva katsetuskeskkonna vahel.

Töö tulemused toetavad astmelise söestumismudeli rakendamist PUR liimidega ristkihtliimpuidu puhul, kuna delaminatsiooni oht on suur. Kaks liimi näitasid päris lähedasi tulemusi lineaarse söestumismudelile (Tootja A liim PUR2 ja Tootja B liim AD6). Samas annavad hästi ettevalmistatud väikesemahulised koonuskuumuti katsed väärtuslikku teavet liimide tulepüsivuse hindamiseks enne kulukaid täismõõdulisi katseid.

Magistritöö näitab, et PUR liimidega valmistatud ristkihtliimpuidu liimvuugis esineb liimvuugi varajane terviklikkuse kadu temperatuuri tõustes. Kuna tegemist on inseneripuidu tulepüsivuse seisukohalt väga olulise teemaga, siis tuleb sellega edasi tegeleda. Edasistes uuringutes oleks vajalik rohkemate korduste tegemine.

SUMMARY

The aim of this master`s thesis was to evaluate the fire resistance of bond lines in cross-laminated timber (CLT) manufactured with polyurethane (PUR) adhesives through small-scale cone calorimeter tests and full-scale furnace tests. Adhesives from two different manufacturers were tested in both normal atmospheric conditions and in a controlled environment with 6% oxygen concentration.

In the experimental part, small-scale cone calorimeter tests (ISO 5660-1) were conducted at Tallinn University of Technology and Lund University, using a heat flux of 50 kW/m². Tests were performed with two different adhesives and wood species (spruce and beech) from Manufacturer A and with four different adhesives and two lamella thicknesses from Manufacturer B. In addition, furnace tests were carried out at Lund University`s fire laboratory according to Eurocode 5 Annex B to provide comparative data for the small-scale test results. The effect of oxygen concentration on the uniformity of charring and the shear strength of the bond lines was also investigated. The cone calorimeter results for Manufacturer A`s specimens were compared with full-scale furnace tests performed in Tampere, Finland.

The test results confirmed that PUR adhesives are temperature-sensitive. The shear strength of the bond lines decreased significantly in the temperature range of 180°C to 220°C and at 290°C the strength was nearly or completely lost. Specimens made of beech showed faster temperature rise and charring, highlighting the importance of wood species in the fire performance of CLT load-bearing structures. In the controlled 6% oxygen environment, wood pyrolysis and charring occurred more uniformly than in normal atmosphere, with less cracking and more reproducible temperature measurements. For Manufacturer A`s adhesives, the results were relatively similar in both environments, whereas Manufacturer B`s specimens showed a more pronounced difference between the two test conditions.

The results of the thesis support the use of the stepped charring model for CLT manufactured with PUR adhesives, due to the significant risk of delamination. Two adhesives (Manufacturer A`s PUR2 and Manufacturer B`s AD6) showed behaviour relatively close to the linear charring model. At the same time, well-prepared small-scale cone calorimeter tests provide valuable information for assessing the fire performance of adhesives before conducting expensive full-scale tests.

The master`s thesis demonstrates that bond lines in CLT produced with PUR adhesives experience early loss of integrity as temperature increases. Given the critical importance of this topic for the fire resistance of engineered wood products, further research is

necessary. In future studies, it would be beneficial to increase the number of test repetitions.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Annette Harte, "Introduction to timber as an engineering material", in book: ICE Manual of Construction Materials, 2009.
- [2] Karacabeyli, E., & Gagnon, S. (Eds.), Canadian CLT Handbook (2nd ed.), 2019.
- [3] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, A. Thiel, Cross laminated timber (CLT): overview and development, 2016.
- [4] Frihart, C. R., Wood adhesion and adhesives, 2005.
- [5] Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-2: Üldist. Tulepüsivusarvutus, EVS-EN 1995-1-2:2025.
- [6] Yasir, M., Ruane, K., Fire performance of Cross-Laminated Timber: A Review of Standards, Experimental Testing, and Numerical Modelling Approaches, 2025.
- [7] Buchanan, A. H., & Abu, A. K., Structural Design for Fire Safety. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [8] Frangi, A., Fontana, M., Knobloch, M. & Bochicchio, G., Fire Behaviour of Cross-Laminated Solid Timber Panels, 2008.
- [9] M. Klippel, "Fire safety of bonded structural timber elements", 2014.
- [10] Hunt, C. G., Dunky, M., Analysis of Future Prospects and Opportunities for Wood Adhesives: A Review, 2023.
- [11] Aksar, S. Cross-Laminated Timber as a Sustainable Building Material, 2025.
- [12] Brandner, R. Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art report, 2013.
- [13] Aicher, S. et al. Bond line shear strength of structural wood adhesives at high temperatures up to wood carbonization. Results in Engineering, 23, 102762, 2024.
- [14] Vihmann, J.L. et al. The Performance of Bond Lines of Engineered Wood in Cone Heater Testing. Fire and Materials. 2025.
- [15] Olofsson, R. Et al. Model scale fire tests with cross-laminated timber. Firewood. 2022.
- [16] Zelinka, S. et. Al. Performance of wood adhesives for cross laminated timber under elevated temperatures. 2018.
- [17] Fernandez, J. et al. Predicting rolling shear failure of cross-laminated panels using a multiscale domain decomposition approach, 2026.
- [18] Sikora, K. S., McPolin, D. O. & Harte, A. M., Shear Strength and Durability Testing of Adhesive Bonds in Cross-laminated Timber. The Journal of Adhesion., 2016.
- [19] Brandon, D., Klippel, M. & Frangi, A. Glueline Integrity in Fire. RISE Report 2021:107.
- [20] Tsantaridis, L. D. & Östman, B. A.-L. Charring of Protected Wood Studs. Fire and Materials, 1998.
- [21] Sjöström, J., Sokoti, H., Li, Y. Z. & Brandon, D., Pyrolysis and thermal properties of wood and high-density polyethylene. RISE Report 2024.

[22] Just, A., Brandon, D., Mäger, K. N., Pukk, R., Sjöström, J., Kahl, F., CLT Compartment Fire Test, 2018.