

Energiatehnoloogia instituut

**KÜTTEREŽIIMIDE MÕJU LENDTUHA TEKKELE
TULIKIVI TU1000/50 KAMINAHJU MUDELIL**

**IMPACT OF HEATING MODES ON THE FORMATION OF
FLY ASH ON TULIKIVI TU1000/50 FIREPLACE MODEL**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ander Lillemaa
/nimi/

Üliõpilaskood 192402MASM

Juhendaja: Alar Konist, Professor
/nimi, amet/

Tallinn 2021

(Tiitellehe pöördel)

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.

"25" Mai 2021.

Autor: Ander Lillemaa

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ander Lillemaa (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 13.08.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kütterežiimide mõju lendtuha tekkele Tulikivi TU1000/50 kaminahju mudelil“, (*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Alar Konist,

(*juhendaja nimi*)

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.*

Ander Lillemaa /allkirjastatud digitaalselt/

25.05.21 (*kuupäev*)

TalTech Energiatehnoloogia Instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ander Lillemaa 192402MASM (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peaariala: MASM02/18 – Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika (kood ja nimetus)

Juhendaja(d): Professor, Alar Konist (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kütterežiimide mõju lendtuha tekkele Tulikivi TU1000/50 kaminahju mudelil

(inglise keeles) Impact of Heating Modes on the Formation of Fly Ash on Tulikivi TU1000/50 fireplace model

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Mõõta ja analüüsida erinevate kütterežiimide mõju lendtuha tekkele TU1000/50 kaminahju mudelil
2. Katseteda PM_{sum} impaktori sobivust tulemuste saamiseks

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Seadmetega tutvumine ja katsetamine	03.2021
2.	Katsete teostamine ja andmete kogumine	05.2021
3.	Andmete analüüs ja töö vormistamine	05.2021

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "26" Mai 2021a

Üliõpilane: Ander Lillemaa "25" Mai 2021a

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: ".....".....201....a

/allkiri/

Konsultant: ".....".....201....a

/allkiri/

Programmijuht: ".....".....201....a

/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	9
SISSEJUHATUS	10
1. Puit ja selle energeetilised omadused	12
1.1 Põlemise protsess	12
1.2 Muud puitkütuse termokeemilise muundamise viisid.....	12
2. Lendtuhk, selle teke ja tervisemõjud	14
2.1 Lendtuha teke ja seda mõjutavad tegurid	14
2.2 Mõju tervisele ehk teema olulisus	15
3. Katse kirjeldus.....	16
3.1 Katse eeldatavad parameetrid	16
3.2 Katse objekt.....	17
3.3 Kasutatud katseseadmed	19
4. Katse kava	21
4.1 Puude asetuse mõju	21
4.2 Süütematerjali ja süütamiskoha valik	23
4.3 Olemasolevad õhuvoolu parameetrid	24
4.4 Ahju parameetritest, süütemetoditest ja mõõtmiseks kasutatavast tehnoloogiast tulenev lõplik katsete kirjeldus	26
4.5 Katsete reaalne ajaline kava	28
5. Tulemused	32
5.1 Arvutused protokollides	32
5.2 Süütekatsete tulemused ja analüüs.....	34
5.3 Süütekatsete analüüsi kokkuvõte.....	42
5.4 Statsionaarse režiimi katsete tulemused ja analüüs.....	43
5.5 Järelkütmise mõju tulemused ja analüüs lendtuha tekkele	51
5.6 Statsionaarse oleku analüüsi kokkuvõte.....	59
5.7 Puude lisamise mõju tulemused ja analüüs	60
5.8 Puude lisamise mõju kokkuvõte	66
KOKKUVÕTE	67
SUMMARY.....	69
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	71

Jooniste loetelu

Joonis 1 TU1000/50 ahju joonis.....	17
Joonis 2 Ahjust väljuv gaasitoru, millesse on sisestatud separaator koos filtriga	18
Joonis 3 Ahjust väljuv gaasitoru, pildil on näha separaator koos filtriga (paremal) ja gaasiliste ainete analüsaator koos termobaariga (vasakul).....	18
Joonis 4 Suur kuivatikolonn külmas vees (vasakul) ja väiksem kuivatikolonn koos vaakumpumba, voolumeetri ja gaasikellaga (paremal)	19
Joonis 5 Kuumkaal.....	20
Joonis 6 Näide risti laotud puudest, representiivseks pildiks on võetud 15.03 tehtud esimese katse jaotus, millega mõõdeti statsionaarse olukorra heitmeid külma aju kütmisel	22
Joonis 7 Puude kuhja pealt süütamine ajalehega (vasakul) ja pealt süütekuubikutega (paremal).....	23
Joonis 8 Alt süütamine paberiga (vasakul) ja tule liikumine esimesel minutil (paremal)	24
Joonis 9 Kasutatud süütekuubikud	24
Joonis 10 Resti hoova liigutamise mõju, hoob on avatud asendis (vasakul) ja kinnises asendis (paremal).....	25
Joonis 11 Peenike õhuvahe põlemiskambri keskel	25
Joonis 12 Ahju õhuavad tuhakambri juures avatud asendis (vasakul) ja poolkinnises asendis (paremal).....	26
Joonis 13 Ahju õhuava täiesti kinnises asendis	26
Joonis 14 Süütekatse temperatuurigraafikud, süütamine pealt süütetablettidega	34
Joonis 15 Süütekatse temperatuurigraafikud, süütamine pealt ajalehega.....	36
Joonis 16 Süütekatse temperatuurigraafikud, süütamine alt paberiga.....	38
Joonis 17 Süütekatse temperatuurigraafikud, pealt süütamine paberiga, resti hoob on kinni	40
Joonis 18 Süütekatsete kokkuvõte	42
Joonis 19 Kütmise temperatuurigraafikud, katsed statsionaarsel olekul	43
Joonis 20 Kütmise temperatuurigraafikud, katse stationaarsel olekul, resti hoob on kinni	45
Joonis 21 Kütmist temperatuurigraafikud, katsed statsionaarses olekus poolkinnise õhu hoovaga	47
Joonis 22 Kütmist temperatuurigraafikud, katsed statsionaarsel olekul, kütmine kuusega	49
Joonis 23 Järelkütmist temperatuurigraafikud, katsed statsionaarses olekus.....	51
Joonis 24 Järelkütmist temperatuurigraafikud, katsed stationaarses olekus, resti hoob on kinni.....	53

Jooniste loetelu jätk

Joonis 25 Järelkütmete temperatuurigraafikud, katsed statsionaarses olekus kui õhu hoob on poolkinni	55
Joonis 26 Järelkütmete temperatuurigraafikud, katsed statsionaarses olekus kui toimus kuusega kütmine	57
Joonis 27 Külma ahju ja sooja ahju kütmise koonddiagramm statsionaarse oleku analüüsis	59
Joonis 28 2 puu lisamise temperatuurigraafikud	60
Joonis 29 3 puu lisamise temperatuurigraafikud	62
Joonis 30 4 puu lisamise temperatuurigraafik	64
Joonis 31 Puude lisamise mõju koonddiagramm	66

Tabelite loetelu

Tabel 1 Katsete reaalne ajakava	29
Tabel 2 Süütekatse tulemused, pealt süütamine süütetablettidega	35
Tabel 3 Süütekatse tulemused, süütamine pealt ajalehega	37
Tabel 4 Süütekatse tulemused, süütamine alt paberiga	39
Tabel 5 Süütekatse tulemused, süütamine pealt süütamine paberiga kui resti hoob on kinni	41
Tabel 6 Statsionaarse oleku katse tulemused	44
Tabel 7 Statsionaarse oleku katse tulemused kui resti hoob on kinni	46
Tabel 8 Statsionaarse oleku katse tulemused kui õhu hoob on poolkinni	48
Tabel 9 Statsionaarse oleku katse tulemused kui toimus kuusega kütmine	50
Tabel 10 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine	52
Tabel 11 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine kui resti hoob on kinni ..	54
Tabel 12 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine kui õhu hoob on poolkinni ..	56
Tabel 13 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine kuuse kütmisel	58
Tabel 14 Tulemused 2 puu lisamisel	61
Tabel 15 Tulemused 3 puu lisamisel	63
Tabel 16 Tulemused 4 puu lisamisel	65

EESSÕNA

Töö teema on valitud Alar Konist juhendamisel ja teostatud 2021 aastal Tallinna Tehnikaülikooli kuuenda korpuse katsehallis asetseval TU1000/50 kaminahjul. Ma soovin tänada juhendajat professor Alar Konistet, professor Tõnu Pihu ja vanemteadur Oliver Järvikut antud abi eest töö tegemisel.

SISSEJUHATUS

Biomassi kasutamine on üks taastuvenergia tootmise viis, mis võimaldab vähendada energia tootmise kahju keskkonnale võrreldes fossiilsete kütustega. Biomassi kasutamine on maailmas pika traditsiooniga: sooja vee ja elektri tootmiseks, söögi tegemiseks, küttena või sotsiaalses olukordades tule tegemiseks.[1] Biomassi, täpsemalt puidu, kasutamisel on siiski omad puudused ja arvestatavad keskkonnamõjud. Näiteks on puit madala kütteväärtusega, jäädes üldiselt vahemikku 18-20 MJ/kg, massiline metsade raiumine kütuseks võib olla kahjulik looduse elurikkusele ning puidu kasutamine tekitab suurel hulgal lenduvaid peeneid osakesi, mis mõjutavad inimeste tervist ja eluviisi.[2-4] Viimase uurimine on ka käesoleva töö eesmärgiks. Biomassi põletamine on oluline tahkete osakeste allikas ja on näiteks talvekuudel moodustanud kuni 2/3 PM_{2,5} vabas õhus võetud proovides Ameerika Ühendriikide Sandy Way randades.[5] Austrias on täheldatud PM₁₀ osakaalu kasvu talvekuudel 10 - 20% just puidu põletamisest.[2]

Tahkete heitmete, ehk lendtuha, uurimine on seetõttu tähtis valdkond inimeste ja keskkonna heaolu seisukohalt ja on saanud suuremat tähelepanu viimastel aastatel. Tahkete kütuste, nagu söe ja biomassi, põletamine kodumajapidamistes on üks põhiline tegur tahkete osakeste heitmete tekitamisest Euroopas. Suurtes kivisütt ja biomassi kasutavates elektri ja soojusjaamades on tahkete heitmete osakaal suures mahus vähendatud erinevate põlemisõhku puhastavate tehnoloogiate poolt, kuid väiksemates kodumajapidamises kasutatavate ahjude korral neid üldiselt ei kasutata.[6]

Kodumajapidamistes kasutatavate küttekollete töö hindamiseks kasutatakse tavaliselt katseid, mis on tehtud laboratoorses tingimustes, kuid testide tegijad on teadlikud, et päriselus tingimustes on emissioonid palju kõrgemad ja varieeruvad rohkem. Erinevus tuleneb suurematest variatsioonidest kütuse kvaliteedis, erinevatest kütustest, hoolduses ja isegi küttekolde installatsiooni meetodites endas.[1]

Käesolevas töös uuritakse kuidas mõjutab kütterežiim tahkete heitmete teket Tallinna Tehnikaülikooli katsehallis asetseva kaminahju mudelil reaalses tingimustes, kasutades selleks ühe filtriga PM_{sum} impaktorit. Kasutatav tehnoloogia mõjutab katsetulemusi ja nende tõlgendusi äärmiselt tähtsalt. Hetkel kasutatav PM_{sum} impaktor koos klaasfiibrilise filtriga, mida kasutatakse üldjuhul tahkete heitmete mõõtmiseks statsionaarses olukorras ja kogub filtri pinnale kõikides suuruses osakesi, raskendab katsete olemust sellepärast, et ahjus ja suitsutorus valitsevad tingimused on ajas kiiresti muutuvad suurused.

Et saavutada maksimaalne efektiivsus käesoleva tehnoloogia kasutamisest on katsed jaotatud süütekatsseteks, kus toon välja süütetablettide ja paberi kasutamise ning lisaks pealt ja alt süütamise vahe, katseteks statsionaarsetel olekutel, kus on välja toodud külma ahju ja juba soojaks köetud ahju heitmete vahel, ning lisaks uurin veel lühidalt, kuidas mõjutab heitmeid väikese puukoguse lisamine kuumadele sütele. Süütekatsete ja statsionaarse režiimi tulemustele lisanduvad muutused ahju parameetreid reguleeritavates hoobades. Kõiki katseid on korratud 3 korda.

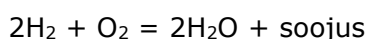
Töö käigus proovin anda ülevaate TU1000/50 ahjust koos põlemisgaasidega väljuva lendtuha hulka erinevatel ahju parameetritel ja põletamismeetoditel ning võimaluse korral pakkuda kindlaimaid aluseid tulevikus teostatavate katsete suhtes. Välja on toodud ka temperatuuriprofiili lühikirjeldus iga katseseeria kohta ning arutatakse katse tulemuste kokkulangevust mõõtmiseks kasutatava tehnoloogia näol. Tuleb rõhutada, et kogutud andmed on aplikeeritavad üksnes Tulikivi TU1000/50 ahju mudelitele ja tahkete osakeste püüdmisel kasutatud tehnoloogia suhtes, kuid neid saab kasutada võrdlusmomendina teiste ahju mudelite ja mõõtemetodite suhtes.

1. Puit ja selle energeetilised omadused

Puit koosneb põhiliselt ligniinist (18 – 35%) ning süsivesikutest (65 – 75%), tselluloos ja hemitselluloos, millest ligniinil on kõige suurem kütteväärtus süsiniku ja vesiniku kõrgest sisaldusest. Üldiselt sisaldub kuivas puidus 48 – 50% süsinikku, 6,0 – 6,5% vesinikku ja 38 – 42% hapnikku, mis moodustavad koos ligikaudu 99% puidu kuivmassist. Vähesel määral leidub puidus ka muid aineid (lämmastik, väävel, kloor jne).[4,7] Kuiva lepa kütteväärtus on keskmiselt 19 MJ/kg.[4] Puidul on kiuline struktuur, mis muudab selle purustamise raskeks ja energiamahukaks.[8]

1.1 Põlemise protsess

Soojuse eraldumine toimub põhiliselt süsiniku (C), vesiniku ja väävli reaktsioonil õhuhapnikuga järgmiste reaktsioonide alusel:[4]



Põlemist võib jaga neljaks faasiks. Esimesena toimub kütuse kuivamine, kus temperatuuri kasvades hakkab puu pealt ja seest eralduma seal olev niiskus. Teisena hakkavad eralduma lenduvad ained, nagu süsivesinikud, kui temperatuur tõuseb üle 100°C. Kolmanda faasina süttivad lenduvad aurud. See protsess toimub tavaliselt 220 ja 300°C vahel. Viimasena toimub 800-900°C juures süte põlemine ning lõpuks kustumine.[4]

1.2 Muud puitkütuse termokeemilise muundamise viisid

Biomassi termokeemiline muundamisel on eesmärk muuta biomass kasutamine efektiivsemaks energia tootmiseks, transpordikütusena või kasutamiseks teistes keemilistes protsessides lähteainena.[4,9]

Pürolüüs on biomassi muundamine vedelateks, tahketeks ja gaasilisteks fraktsioonideks kuumutades lähteaineid 500 °C juures. Sellega toodetakse sütt, bioõli ja küttegaasi ning protsessi parameetreid on võimalik muuta, et toota eelisjärgus rohkem mingit kindlat fraktsiooni.[9]

Torrefikatsioon, teatud ka kergpürolüüsi nime all, on biokütuse termokeemiline muundamine madalatel temperatuuridel, vahemikus 200–300 °C. Protsess põhineb

hapniku eemaldamisel biomassist vähendades hapniku ja süsiniku suhet, mis suurendab energiatihedust lagundades hemitselluloosi. Torrefikatsioon võib olla ka biomassi eeltöötluks enne gaasistamist vähendades termodünaamilisi kadusid.[8–10]

Gaasistamine on biomassi osaline oküdeerimine temperatuuril üle 800 °C, et toota süngaasi. Süngaasi saab kasutada soojuse ja elektri tootmiseks, võimaldab toota transpordis kasutatavaid kütuseid nagu metanool ja vesinik, keemiatööstuses kemikaalide valmistamisel, abiks muude kütuste põletamisel või muudeks spetsiifilisteks otstarveteks, näiteks väga madala kvaliteediga biomassi kasutamiseks eelmainitud protsessides.[4,8,9]

Bioloogiline muundamine käigus kasutatakse fermentatsiooni ehk kääritamist või anaeroobilist lagundamist. Fermentatsiooni käigus muudetakse ensüümide kaudu toodetud suhkur etanooliks, mis eraldatakse destillatsiooni kaudu, kuid selle protsessi kasutamine puise biomassi puhul on keerulisem pikemate polüsahhariidide molekulide tõttu. Anaeroobilise lagundamise protsessis muudetakse bakterite abil biomass otse gaasiks, mis koosneb põhiliselt metaanist (CH₄) ja süsihappegaasist (CO₂).[9]

2. Lendtuhk, selle teke ja tervisemõjud

Lendtuhk tähistab põlemise jääke, mis liiguvad koos põlemisgaasidega põlemiskoldest välja ja koosneb erineva suurusega tahketest osakestest. Lenduvad tahked osakesed on segu õhus liikuvatest tahketest osakestest ja vedelikupiiskadest. Keskkonnaseirete ja tervise seisukohalt kasutatakse mõisteid, mis eristavad neid nende aerodünaamilise diameetri kaudu. Kirjanduses kasutatakse mõisteid PM_{10} , mis tähistab osakesi kuni 10 mikromeetri suuruse diameetriga ja $PM_{2,5}$, mis tähistab osakesi kuni 2,5 mikromeetri suuruse diameetriga. Suuremaid kui 2,5 mikromeetri suuruse diameetriga osakesi klassifitseeritakse jämedateks ja osakesi, mis on väiksemad kui 2,5 mikromeetri suuruse diameetriga peeneteks osakesteks. Samas erinevad kirjandusallikad klassifitseerivad osakest jämedateks kui need on suuremad kui 1 mikromeeter.[6] Vahepeal on kirjanduses kasutuses ka ultrapeenete osakeste mõiste, mis koondab enda alla väiksemad kui 0,1 mikromeetri suuruse diameetriga osakesed.[11,12] Käesolevas töös uuritakse põlemiskoldest väljuvate kõikide tahkete osakeste summa, tähistatud PM_{sum} tähisega, kontsentratsiooni muutust erinevatel ahju kütterežiimidel.

2.1 Lendtuha teke ja seda mõjutavad tegurid

Lendtuha tekkeks koldes on kaks erinevat viisi. Esimese viisina mittelenduvad anorgaanilised ühendid (kaltsium, räni, magneesium ja teised) muutuvad otse suuremateks osakesteks kui 1 mikromeeter. Teisena muutuvad anorgaanilised aurud (kaltsiumhüdrosiid, kaltsiumkloriid, kaltsiumkarbonaat ja teised) väiksemateks osakesteks kui 1 mikromeeter pärast nukleatsiooni, kondensatsiooni, pinnareaktsioone, koagulatsiooni ja aglomeratsiooni protsesse.[6] Väiksematel peenetel ja ultrapeenetel osakestel on suurem võimalus liikuda läbi põlemisgaaside puhastustehnoloogiate ja sealt edasi ümbritsevasse keskkonda, mille tõttu on lenduvad tahked osakesed saanud viimastel aastatel suuremat tähelepanu oma mõjude poolest tervisele.[13]

On leitud, et tahkete heitmete põhilisteks mõjutajateks on kütusekulu ajaühiku kohta, mida on kõige parem vaadelda suitsugaasides sisalduva CO_2 ja CO kontsentratsioonidest, erinevused külma ahju käitamisel ehk süütamisel, muutused õhu pealeandmises ja kütuse niiskus. Niiskem puitkütus on kirjanduses välja toodud katsetes andnud suurema hetmetega tulemusi. Üldiselt ei ole leitud suuri muutusi tahkete osakeste emissioonides lehtpuu ja okaspuu vahel, kuigi nende vahel on mitmeid erinevusi, näiteks süttib lehtpuu üldiselt $220^{\circ}C$ juures ja okaspuu $300^{\circ}C$ juures.[4,14] Nendest tulenevalt arutletakse selles töös ka tehtavate katsete üle.

2.2 Mõju tervisele ehk teema olulisus

Tahkete kütuste kasutamine väikestes põlemiskolletes võib põhjustada kõrgete kontsentratsioonidega tervisele kahjulikke emissioone, näiteks tahked osakesed (PM_{10} ja $PM_{2,5}$) vääveldioksiid, lämmastikoksiid ja muud. Siiski on puidu kasutamine väga levinud ja mõnes riigis on puidu kasutamine isegi julgustatud kliimapoliitika eesmärkide täitmiseks. 2030-ks aastaks ennustatakse, et EU-28 riikides toimub 36% suurenemine biomassi kasutuses kodumajapidamistes.[1]

Tahkete kütuste kasutamine kodumajapidamistes varieerub märkimisväärselt riikide vahel, aga näiteks moodustas 2005 aastal kodumajapidamistes kasutatav biomass 1,9% primaarse energia kasutamisest EU-28 riikides. Kuigi kasutatav energia oli madal, siis need põhjustasid 36% $PM_{2,5}$ emissioonidest.[1] Kuna tavalistes kütteprotsessides tekib väga palju peeneid ja ultrapeeneid osakesi, siis nende kõige suuremat mõju on tunda tiheda asustustihedusega alades, milles ei kasutata puhtamate emissioonidega tehnoloogiad, nagu maagaasi, keskkütte võrgustikku ja muid.[15,16]

PM_{10} pikaajalist sissehingamist on seostatud kõrgema suremusega ja kroonilistes respiratoorsetes haiguste, nagu astma, bronhiit ja emfüseem, suurema levikuga.[3] On täheldatud, et osakestel suurusega vahemikus 2,5 ja 10 mikromeetrit on suurem põletikuline toime immuunsüsteemi rakkudele kui veel väiksematel osakesetel.[17] Hinnanguliselt võib 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tõus PM_{10} kontsentratsioonis põhjustada 0,7% suuremat suremust.[18] Samas võivad alla 2,5 mikromeetri suurused osakesed olla inimese tervise seisukohalt suurema tähtsusega, sest need võivad jõuda sügavamale kopsudesse.[19]

Maailma Terviseorganisatsioon on hinnanud, et tahkete kütuste põletamisest tulenev sise- ja välisõhu tahkete osakeste saaste põhjustab aastas üle 2 miljoni enneaegse surma.[20] Inimese tervise kaitseks on Maailma Terviseorganisatsiooni sõnul $PM_{2,5}$ soovituslikuks maksimumiks aasta keskmiseks piirnormiks 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja päeva keskmiseks piirnormiks 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. PM_{10} 24 tunnine piirtase on 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mida ei tohi ületada 7 korda, ja aastane piirtase 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. [20] Sama on ka nõudnud Euroopa Liit.[21]

3. Katse kirjeldus

Kasutatav tehnoloogia mõjutab oluliselt heitmete uurimist. Töö käigus kasutatav PM_{sum} impaktor on mõeldud tahkete heitmete mõõtmiseks statsionaarses olukorras. See tähendab olukorda, kus suitsutorus valitsevad tingimused on terve katse aja möödudes stabiilsed. Süstemaatilist katsete teostamist käesoleva tehnoloogiaga raskendab asjaolu, et väikestes kodudes kasutatavates puiduahjudes on põlemine perioodiline ja ahjus valitsevad tingimused äärmiselt varieeruvad ning põlemisgaaside ja lenduvate peenosakeste kontsentratsioonid ei pruugi olla stabiilsed isegi lühikese aja jooksul. Käesoleva ahjutäie kütuse põletamine ajani kuni jäävad järgi ainult hõõguvad söed võtab üldiselt alla 1 tunni, samas kui peenosakeste mõõtmine võtab vähemalt 10 minutit aega ning võib võtta isegi 20 minutit või rohkem, et filtrile koguda korrekselt mõõdetav kogus lenduvaid osakesi. Selle raames on tähtis korrekselt ja hoolikalt valida peenosakeste mõõtmise ajastus, et erinevate katsete vahele paralleele tuua.

Ahjutäie põletamisel on aluseks võetud olukord kui temperatuur suitsutorus enam ei tõuse, et määrata osakeste kontsentratsioone ligilähedaselt statsionaarsele olekule. Sellele lisanduvad proovid süütamise ajal ning järgnevatel minutitel kui temperatuur tõusma hakkab, mida võrreldakse erinevate süütamise vahendite ja meetoditega. Süütamise faasis on mõõtmine ja mõõtetulemuste analüüs märgatavalt raskendatud, sest põlemisprotsess ja sellest tekitatud gaasivool on ajas kiirelt muutuvad suurused.

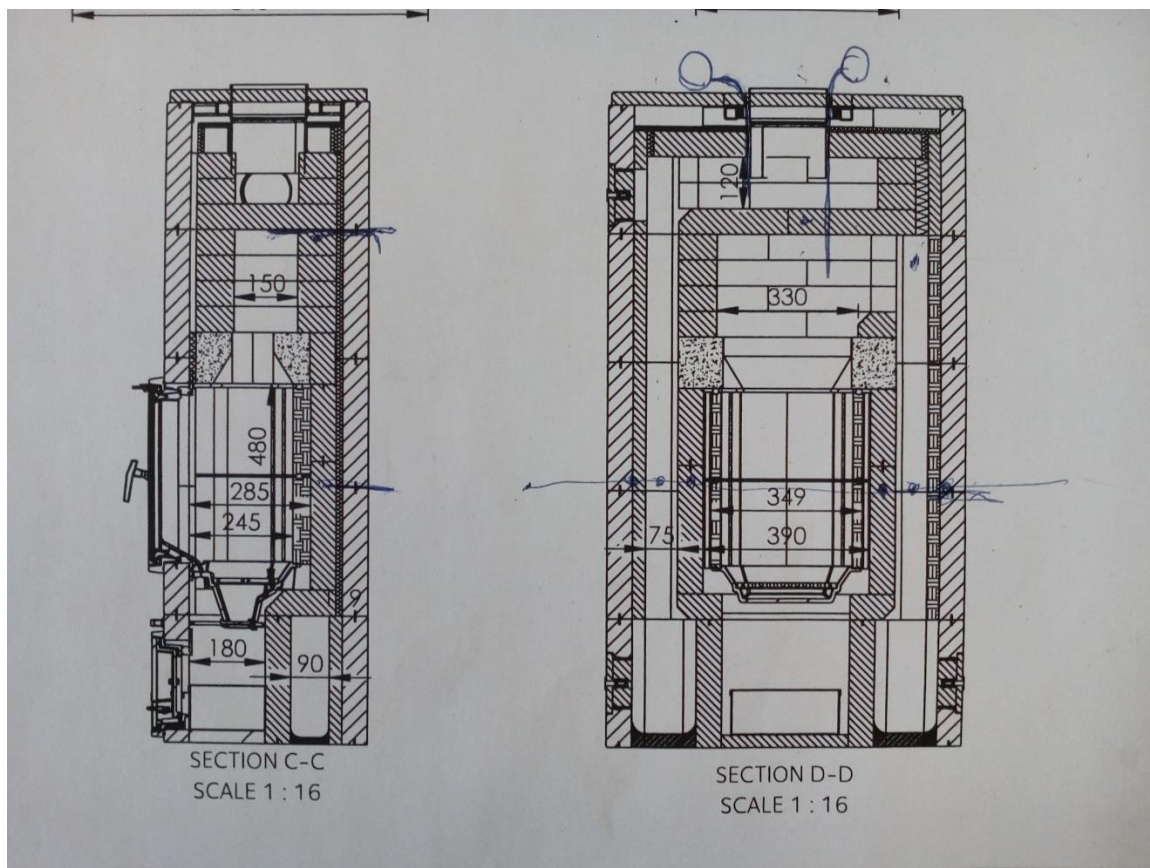
3.1 Katse eeldatavad parameetrid

Võrdluse tekitamiseks on vajalik läbi proovida laialdaselt kasutatavaid meetodeid puitahjude kütmise kohta. Samuti on vaja arvestada põletuskambri suurusega. Näiteks käesoleva ahju katsetamisel on tekkinud olukordi, kus üksikud puuhalud on liiga pikad, et korrekselt põlemiskambrisse mahtuda. See tuleneb sellest, et kamber ise on ligilähedaselt sama lai kui ostetud ~30 cm pikkused puud, milles võivad üksikute halgude pikkused varieeruda mitme sentimeetri ulatuses.

Kambri ees, klaasi juures, on samuti erinevad tingimused. See ulatub kambri põhjas olevast restist eemale rohkem kui teised alad, sinna liikuv õhuvool on väiksem ja soojuse kadu märgatavalt suurem võrreldes ülejäänud kambriga. Nende tegurite tõttu ei pruugi sinna ulatuvad tahke kütuse osad korralikult koos ülejäänud kütusega põleda.

3.2 Katse objekt

Käesolevate katsete eesmärk on teostada peenosakeste mõõtmine Tulikivi firma loodud volukivi TU seeria 1000/50 ahju mudelil (Joonis 1), mis on transporditud Tallinna Tehnikaülikooli kuuenda korpuse katsehalli. Ahi on seisnud aastaid peaaegu kasutamata ning seetõttu teostati proovikatsed, et esialgselt hinnata ahju korrasolekut ja vormistada korrektsed meetodid proovide võtmiseks.

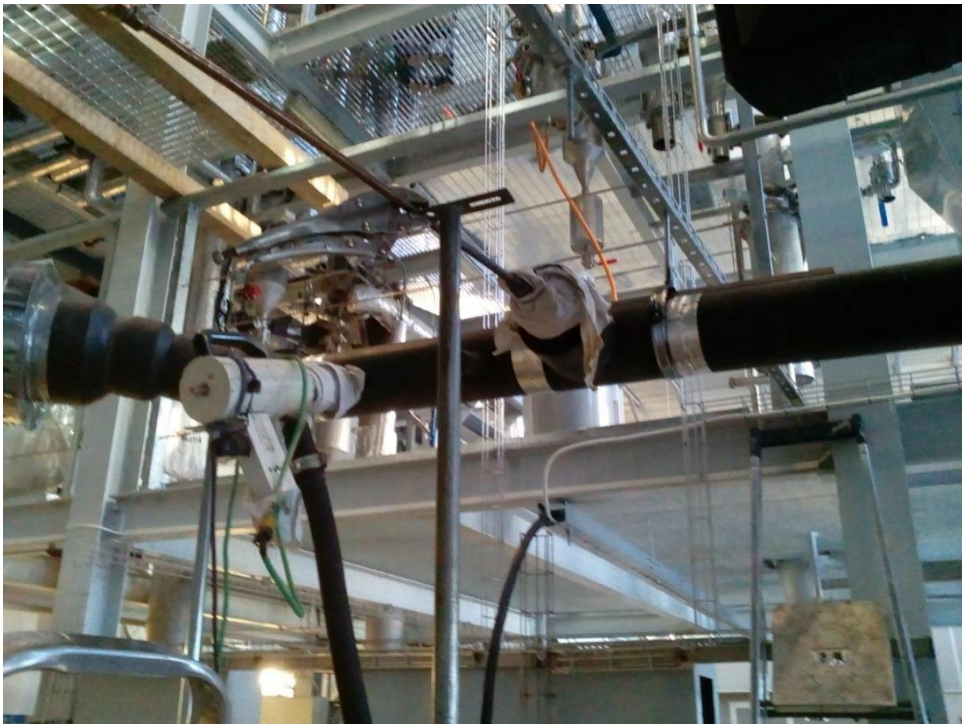


Joonis 1 TU1000/50 ahju joonis

Käesolevate katsete jooksul mõõdeti teise töö raames samade kütterežiimidega ka gaasiliste heitmete koostist. Ahjust väljuvas suitsutorus on 3 ava, mille kaudu saab võtta proove. Esimest ja kõige suuremat ava kasutati tahkete osakeste mõõtmiseks, teist ja väiksemat ava kasutati rõhu mõõtmiseks (Joonised 2 ja 3). Ning viimases avas on gaasiliste ainete mõõtmise seade, millega koos on ahju pandud termobaar ahju temperatuuri mõõtmiseks. Kõik avad kaeti seadme ümbert kuumakindla riidega. See tähendab, et gaasiliste ainete mõõtmise seade, mille ots on kuumutatud üle 100°C, on väga lähedal termobaarile. See ei ole ideaalne katseseadmete paigaldus, aga pikemad mõõtmised toatemperatuuril oleva ahjuga on näidanud, et korrektselt paigaldatud termobaari mõjutab see marginaalselt. Proovikatsete ning järgnevate katsete hulgas oli katsetajate paigaldatud termobaari paigalduses ainult 0-4°C vahe toatemperatuuriga.



Joonis 2 Ahjust väljuv gaasitoru, millesse on sisestatud separaator koos filtriga



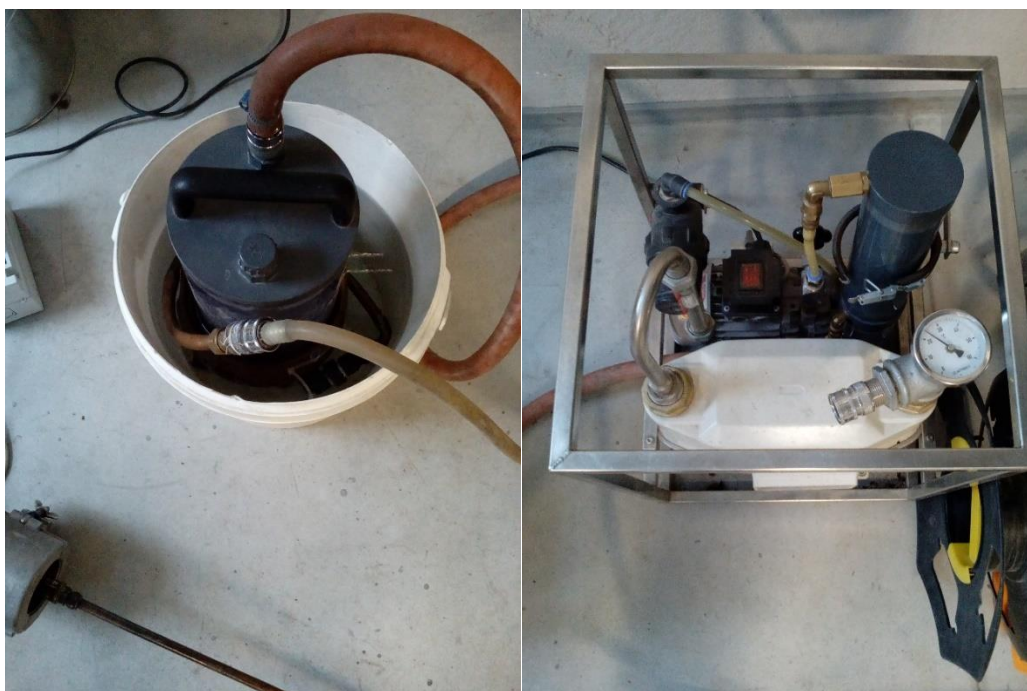
Joonis 3 Ahjust väljuv gaasitoru, pildil on näha separaator koos filtriga (paremal) ja gaasiliste ainete analüsaator koos termobaariga (vasakul)

3.3 Kasutatud katseseadmed

Katseadmetena on kasutuses PAUL GOTHE GmbH BOCHUM Plane-filter-device (VDI 2066, 7/EN 13284-1) separaator, mis koosneb titaanist ehitatud kehast ja mille sisse on võimalik paigaldada üks filter. Seadme maksimaalne lubatud voolukiirus on 4 m³/h. Seadme otsa asetatakse düüs, mis reguleerib õhu kiirust seadmes. Hetkel on valitud põlemisgaaside madalate kiiruste tõttu kasutamiseks kõige suurem käesolev düüs, mille diameeter on 14 mm.

Seade on voolikuga ühendatud kahe kuivatuskolonniga, pärast mida läbib jahutatud ja kuivatatud põlemisgaas vaakumpumpa, voolumeetrit ja lõpuks gaasikella (Joonis 4). Esimeses suuremas kuivati kolonni ümber toimub filtri läbinud põlemisgaaside jahutamine ämbrisse valatud külma vee mõjul. Mõlemas kuivatuskolonnis asetseb granulaarne silikageel is absorbeerib niiskuse endasse. Silikageel on kasutamata kujul tugevalt roheline värvusega, kuid pärast kasutamist muutub see kollaseks. Kui kolonni sisu on muutunud piisavalt kollaseks, siis on vaja silikageel ära vahetada ning kasutatud geeli on võimalik regenereerida.

Filtrina on kasutuses klaasfiibriline filter, mille osakeste püüdmise efektiivsus on 99,5 % kui keskmine osakese diameeter on 0,3 µm ja 99,9 % kui keskmine osakese diameeter on 0,6 µm. Filter kaalutakse enne ja pärast möötmist kuumkaalumise teel (Joonis 5) nii kaua kuni saavutatakse kokkulangevad tulemused.



Joonis 4 Suur kuivatikolonn külmas vees (vasakul) ja väiksem kuivatikolonn koos vaakumpumba, voolumeetri ja gaasikellaga (paremal)



Joonis 5 Kuumkaal

Rõhu mõõtmiseks on kasutuses TSI DP-Calc mikromanomeeter, millega on võimalik mõõta dünaamilist ja statsionaarset rõhku koos Pitot' toruga.

4. Katse kava

Katsekava on kokku pandud põhimõttega, et uurida laialdaselt kasutatavate põletamise meetodite mõju lendtuha tekkele. Selleks on läbi proovitud puude asetus, kütuse kogus, õhuvoolu parameetrid kindlal ahjul, süütematerjal ja süütamise koht. Katseid korratakse kindluse mõttes mitu korda ja selle töö käigus on võetud umbkaudseks piirnormiks 3 paralleeli, mis annab võimaluse ka kõrvalejäeva tulemuse vajaduse korral välja jätta, sest see võib näidata olukorrale, kus katse parameetrid võisid teadmata oludel muutuda. Samas tuleb rõhutada, et kõik tulemused on mainitud ja võimaluse korral ka parimate teadmiste järgi seletatud.

4.1 Puude asetuse mõju

Kuna ahju mõõtmed on äärmiselt piiratud on puude asetus ja nende kogus vajalikud andmed, mis määravad õhuvoolu puude ümber, kui palju soojust nad suudavad anda ja kui kiiresti. Oluline on ka kütuse asetuse muutumine, sest puude põledes muutuvad halud hapraks ja algselt ahju sisse laotud struktuur kukub kokku. Ahju resti ääred on kergelt kallutatud, mis suunab kokku varisevad halud üksteise peale resti kohale. Samas halude suurus ja ahju piiratud mõõtmed võivad seda protsessi mõjutada.

Põhiliseks halgude asetuseks on käesolevas töös risti asetus (Joonis 6), mis garanteerib parema õhu liikuvuse puude vahelt ja ümbert. TU1000/50 ahju puhul on kolle niivõrd väike, et väiksema pikkusega üldkasutatavad puuhalud, milleks on katsetes võetud ~30 cm, jätavad puude ja kolde seina vahele vähem kui sentimeetri jagu vaba ruumi, kus kohast saaks põlemisõhk vabalt liikuda.



Joonis 6 Näide risti laotud puudest, representiivseks pildiks on võetud 15.03 tehtud esimese katse jaotus, millega mõõdeti statsionaarse olukorra heitmeid külma aju kütmisel

4.2 Süütematerjali ja süütamiskoha valik

Erinevate süütematerjalidena on kasutatud süütamiskuubikuid (Joonis 9), paberit ja ajalehti (Joonis 7). Süütamise koha valikul on võetud 2 ekstreemsust, pealt (Joonis 7) ja alt süütamine (Joonis 8). Paberi ja ajalehe heitmed on töös võrdsustatud. Süütekatsetega määratakse temperatuur ja peenosakeste kogus süütamise hetkel ja temperatuuri tõusul, et uurida erinevusi erinevate süütematerjalide ja süütamise koha vahel. See tähendab, et katse parameetrid ei ole stabiilsed sellepärast, et ajas muutuvad temperatuur, heitmete omadused ja suitsutorus valitsev rõhk ja testide paralleelkatsete tulemused ei pruugi olla stabiilsed.



Joonis 7 Puude kuhja pealt süütamine ajalehega (vasakul) ja pealt süütekuubikutega (paremal)



Joonis 8 Alt süütamine paberiga (vasakul) ja tule liikumine esimesel minutil (paremal)

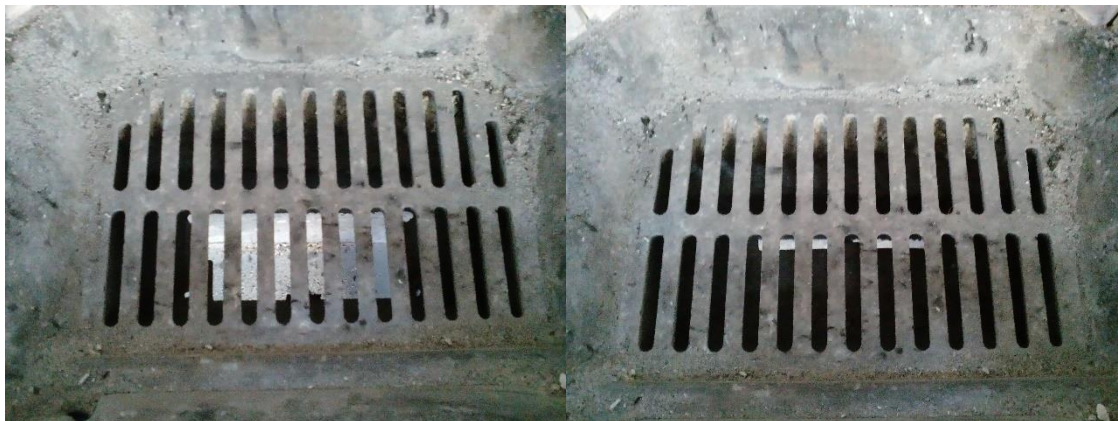


Joonis 9 Kasutatud süütekuubikud

4.3 Olemasolevad õhuvoolu parameetrid

Käesoleva ahju mudelil on õhuvoolu reguleerimiseks 2 võimalust. Vastavalt kambri ehitusele võetakse õhk sisse tuhakambri alt ja liigub, kas otse läbi resti (Joonis 10) või

läbi sisseehitatud õhukäikude, väljudes põletuskambri keskelt (Joonis 11). Viimase punkti puhul tuleb rõhutada, et võttes arvesse piiratud ruumi võivad laotud puud veel edasi piirata õhu liikumist kambri seintelt, sest need katavad ära suure osa kambri keskel asetsevast õhuvahest.



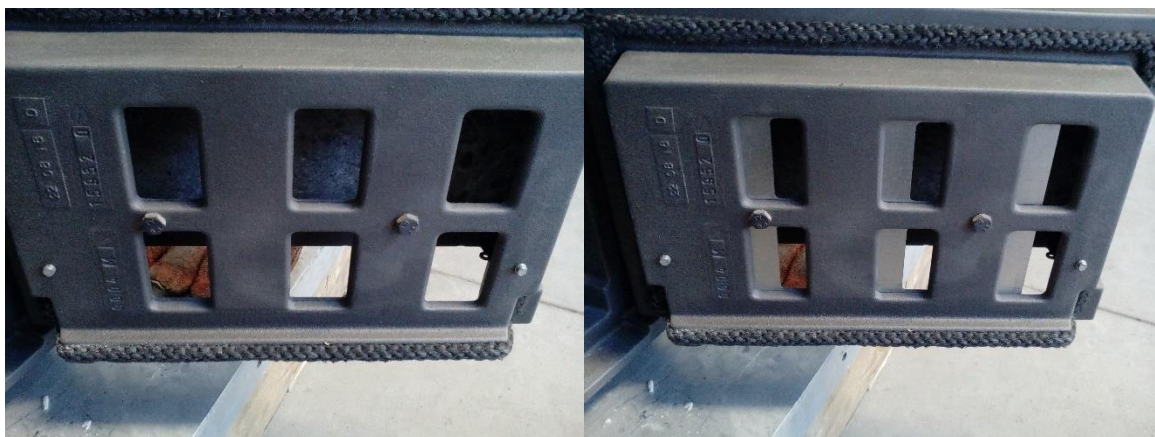
Joonis 10 Resti hoova liigutamise mõju, hoob on avatud asendis (vasakul) ja kinnises asendis (paremal)



Joonis 11 Peenike õhuvahet põlemiskambri keskel

Õhu hoob on tuhakambri ees olev liigutatav hoob, millega reguleeritakse pealeantava õhukäigu suurust (Joonised 12 ja 13). Resti hoob on tuhakambri kohal, kuid resti all

olev hoob millega on võimalik osaliselt tuhakamber katta ja sellega piirata kambri alt tulevat õhuvoolu ning suunata rohkem õhku läbi kambri väiksemate õhuvahede, mille tõttu on suurendatud põletuskambri keskelt sisenev õhuvool.



Joonis 12 Ahju õhuavad tuhakambri juures avatud asendis (vasakul) ja poolkinnises asendis (paremal)



Joonis 13 Ahju õhuava täiesti kinnises asendis

4.4 Ahju parameetritest, süütemetoditest ja mõõtmiseks kasutatavast tehnoloogiast tulenev lõplik katsete kirjeldus

Ahju kolde osa ja tuhakamber tuleb puhastada iga kord enne kui alustatakse külma ahju kütmist, et võimalikult palju välistada katsega mitteseotud koldes asetseva tuha kaasa võtmist õhuvooluga ja nende osakeste sattumist filtrile. Kasutatav filter mõõdetakse kuumkaalumise teel enne kasutamist nii mitu korda kuni saavutatakse tulemuste osas kokkulangevad väärtused. Kaalutakse väike ja suur kuivati, ning ühendatakse need pumbasüsteemiga. Suur kuivati asetatakse külma vette, mis katab vähemalt 1/3 ja soovitatavalt pool tervest kuivati kolonnist. Fikseeritakse gaasikella algväärtus ja PM_{sum} impaktor koos filtriga pannakse soojenema.

Süütekatsed tehakse põlemise algaasis ja see näitab süütamise ajal, ning järgnevatel minutitel tekkivat tahkete heitmete kogust. Süütekatses kasutatakse valitud süütematerjali, mis asetatakse valitud asendisse puude kuhjas. Süütematerjali üheks asenditeks on puude kuhja peal, mida tuleb võrrelda teise olukorraga, kus süütematerjal on täielikult kuhja all. Pealt süütamise võrdlemine alt süütamisega võib anda kõige suurema vahe temperatuuriprofiilis ja hetmete koguses kuna ühel juhul liiguvad kuumad põlemisgaasid alt üles kontakteerudes teiste puude halgudega ja süüdates need kiiremini, samas kui ülevalt süüdates kontakteeruvad alumised puud kuumade gaasidega arvatavasti märgatavalt vähem ja süttivad rohkem teiste tegurite, näiteks soojuskiirguse, teel. Lisaks tehakse katseid, kus ahju resti hoob on lahti või kinni, mis määrab väga erinevad tingimused koldesse pealeantavas õhuvoolus. Katse käik näeb välja selline, et filter sisestatakse gaasikäiku ja pump pannakse tööle samal ajal kui süütematerjal pannakse põlema. Mikromanomeetriga mõõdetakse vajaduse korral rõhk tahkete osakeste mõõtmise ajal ja pärast mõõtmise lõppu, fikseerides rõhu mõõtmise aja. Mõõtmine lõpetatakse kui filtrile on kogunenud piisavalt osakesi, et pumbaga ühendatud voolumeeter näitab märgatavat rõhulangu, mis on üldiselt võrdeline ujuki enda pikkusega, või kui temperatuur hakkab näitama stabiliseerumise märke.

Lendtuha mõõtmist teostatakse ka statsionaarsele olekule ligilähedases olukorras, mis tähendab, et mõõtmist alustatakse kui temperatuur on jõudnud või on kohe jõudmas haripunkti. Selle olukorra mõõtmiseks süüdatakse puude kuhi ja oodatakse kuni temperatuur näitab stabiliseerumise märke või on juba stabiliseerunud, mis tähendab, et temperatuur rohkem ei tõuse. Vajaduse korral mõõdetakse mikromanomeeriga rõhk gaasikäigu sees enne tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmist. Seejärel sisestatakse filter gaasikäiku ja pannakse pump tööle. Mõõtmine lõpetatakse kui filtrile on kogunenud piisavalt osakesi, et pumbaga ühendatud voolumeeter näitab märgatavat rõhulangu, mis on üldiselt võrdeline ujuki enda pikkusega, või kui on märgata juba põhiliselt süte põlemine.

Järelokütmise mõju uuritakse juba sooja ahju kütmisel. Ahi köetakse soojaks eelmise katsega, kus aja kokkuhoiu mõttes ja aja maksimaalse äraksutamise huvides uuritakse statsionaarse olukorra heitmeid külma ahju kütmisel. Seejärel lastakse viimastel sütel ära kustuda ja ahju laotakse uus kuhi puid sama põhimõttega, mis pannakse samamoodi põlema. See näitab, kuidas eelkõetud soe ahi ja temperatuuri tõstmine mitmekümne kraadi võrra kogu katse jooksul mõjutab lendtuha teket. Lendtuha mõõtmist teostatakse sama põhimõtte järgi nagu eelnevalt statsionaarsele olukorrale on kirjas. Vajaduse korral mõõdetakse mikromanomeeriga rõhk gaasikäigu sees enne tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmist. Mõõtmine lõpetatakse kui filtrile on kogunenud piisavalt

osakesi, et pumbaga ühendatud voolumeeter näitab märgatavat rõhulangu, mis on üldiselt võrdeline ujuki enda pikkusega, või kui on märgata juba põhiliselt süte põlemine.

Lisaks eelnevalt väljatoodud katsetele uuritakse mitme halu lisamise mõju. Katse kohaselt köetakse ahi soojaks eelmise katsega, kuni ahjus on veel kuumad söed sisestatakse filter gaasikäiku ja kohe pärast seda lisatakse veel kuumadele sütele valitud kogus puud. Kuumad söed süütavad lisatud puud ja vajaduse korral mõõdetakse mikromanomeeriga rõhk gaasikäigu sees tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmise ajal ning pärast mõõtmise lõpetamist. Tahkete osakeste mõõtmine lõpetatakse kui filtrile on kogunenud piisavalt osakesi, et pumbaga ühendatud voolumeeter näitab märgatavat rõhulangu, mis on üldiselt võrdeline ujuki enda pikkusega, või kui puud on põlemise lõpufaasis. Katse näitab kuidas kuumadele sütele lisatavad puud mõjutavad lendtuha teket.

Katse lõppedes kaalutakse filter kuumkaalumise teel nii mitu korda kuni saavutatakse tulemuste osas kokkulangevad väärtused. Pumbaga ühendatud väike kuivati kaalutakse kohe, aga suur kuivati kuivatatakse selle peal olevast veest, et vähendada kõrvalise niiskuse mõju. Fikseeritakse gaasikella lõppväärtus. Väljavõetud tuha ja juba kaalutud filtri saab säilitada suletavates kilekottides tulevikus teostatavate katsete jaoks.

Rõhu mõõtmiseks kasutatakse Pitot' toru, mis on ühendatud mikromanomeetriga. Sellelt võetakse 3 väärtust. Dünaamilise rõhu saamiseks asetatakse mõõtmise ajal Pitot' toru avad voolusuunda ja näidud võetakse gaasikäigu mõlema poole seina lähedalt, kuid mitte lähemalt kui 2cm. Kahe dünaamilise väärtuse põhjal leitakse nende keskmine, mida kasutatakse põlemisgaasi kiiruse arvutamisel gaasikäigus. Töös kasutatav põlemisgaaside tihedus standardtingimustel võrdsustatakse arvutustes õhu tihedusega. Statsionaarse rõhu leidmiseks ühendatakse mikromanomeetri üks ühendustoru Pitot' toruga lahti ja selle toru avad asetatakse gaasikäigus voolusunaga risti ning samuti võetakse väärtus toru seina lähedalt, kuid mitte lähemalt kui 2 cm. Statsionaarne rõhk lahutatakse maha üldisest õhurõhust ja saadakse gaasikäigus olev absoluutne rõhk. Gaasikäigu ava kaetakse tihedalt kuumakindla riidega rõhu mõõtmise ajal, et tulemused oleksid võimalikud täpsed.

4.5 Katsete reaalne ajaline kava

Tabelis 1 on katsete parameetrid on jagatud mitmesse kategooriasse: katse aeg, millal tahkete osakeste proov võetakse, milline on puude asetus, süütematerjal, kas süüdatakse ülevalt või alt, ja millised on õhuvoolu parameetrid. Allolevas tabelis on välja toodud reaalne katseplaani.

Tabel 1 Katsete reaalne ajakava

Kuupäev	Proovi võtmine	Puude asetus	Süüte materjal	Süütekoht	Õhuvool
10.03.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
10.03.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
12.03.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
12.03.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
16.03.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
16.03.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
17.03.21	Süütekatse	Risti	Tablett	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
17.03.21	Lisamine, 2 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
19.03.21	Süütekatse	Risti	Tablett	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
19.03.21	Lisamine, 2 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
23.03.21	Süütekatse	Risti	Tablett	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
23.03.21	Lisamine, 2 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
30.03.21	Süütekatse	Risti	Ajaleht	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
30.03.21	Lisamine, 4 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
31.03.21	Süütekatse	Risti	Ajaleht	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
31.03.21	Lisamine, 4 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
06.04.21	Süütekatse	Risti	Ajaleht	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti

06.04.21	Lisamine, 4 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
07.04.21	Süütekatse	Risti	Paber	Alt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
07.04.21	Lisamine, 3 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
13.04.21	Süütekatse	Risti	Paber	Alt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
13.04.21	Lisamine, 3 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
16.04.21	Süütekatse	Risti	Paber	Alt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
16.04.21	Lisamine, 3 halgu	Müür	-	-	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
20.04.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
20.04.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
21.04.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
21.04.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
23.04.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
23.04.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
27.04.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob pool lahti
27.04.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob pool lahti
28.04.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob pool lahti
28.04.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob pool lahti
30.04.21	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob pool lahti

30.04.21	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob pool lahti
04.05.21 *	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
04.05.21 *	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
05.05.21 *	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
05.05.21 *	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
07.05.21 *	Külma ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
07.05.21 *	Sooja ahju kütmine. Statsionaarsel režiimil	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob avatud, õhu hoob lahti
11.05.21	Süütekatse	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
14.05.21	Süütekatse	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti
18.05.21	Süütekatse	Risti	Paber	Pealt	Resti hoob kinni, õhu hoob lahti

*04-07.05.21 kavandatud katsed olid tehtud kuusepuuga, et tekitada esimene võrdlusmoment teise puuliigiga.

5. Tulemused

Saadud tulemused on võrreldavad ainult Tulikivi TU1000/50 ahjumudeliga ja katsete kordamine teiste ahjumudelitega võib oluliselt muuta katsete tulemusi. Eesmärk on välja selgitada konkreetsele ahju mudelile, millised on ahju lendtuha heitmed erinevatel kütterežiimidel. Kõikides katsetes, kus pole öeldud teistmoodi, on kasutatud kütusena katse tegemiseks halli leppa. Ainult statsionaarsetes katsetes on tulemusi võrreldud kuuse põletamisega, et anda lühike arusaam puiduliikide vahel. Nende lühikeste katsete eesmärk oli saada teadmisi, milline võib olla lehtpuu ja okaspuu heitmete vahe.

5.1 Arvutused protokollides

Põlemisgaaside niiskuse arvutus:

$$w = \frac{\frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}}{V_{wa} + \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}} \cdot 100\%$$

Kus

m_{H_2O} on kuivatuskolonnide kaalude vahe enne ja pärast katset, ehk adsorbeeritud vee mass katse jooksul;

ρ_{H_2O} on vee gaasi tihedus normaaltingimustel, ehk 0,8045 kg/m³;

V_{wa} on gaasiproovi maht;

Keskmine Pitot' toru rõhuvahe määratakse valemist:[22]

$$\Delta\bar{p} = \frac{1}{n^2} \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta p_i} \right)^2$$

Kus

Δp_i on üks dünaamilise rõhu (rõhuvahe) suurus punktis i.

Põlemisgaaside keskmine voolukiirus leitakse valemist:[22]

$$\bar{v} = KC \sqrt{\frac{T_s \Delta\bar{p}}{P_e M_s}}$$

Kus

- C võrdub $129 \text{ (m/s) [kg/(kmol}\cdot\text{K)]}^{1/2}$;
- T_s on heitgaasi keskmine temperatuur kelvinites;
- M_s on gaasi molaarmass; loetakse võrdseks väärtusega 29 kg/kmol , v.a juhul, kui molaarmass on alla 27 kg/kmol või üle 31 kg/kmol ; käesolevas töös on eeldatud, et põlemisgaaside molaarmass on ligilähedane õhu molaarmassiga (29 kg/kmol);
- K on Pitot' toru tegur; standardis välja toodud joonise 2 spetsifikatsiooni järgimisel võib kaslibreerimisteguriks K võtta $0,84$;
- P_e on absoluutne gaasirõhk kilopaskalites;
- $\Delta\bar{p}$ on keskmine Pitot' toru rõhuvahe kilopaskalites;

Tahkete osakeste kontsentratsiooni arvutamine normaalkuupmeetritele:

$$\text{tahkete osakeste kontsentratsioon} = \frac{m_{\text{tahked}}}{V_{\text{wa}} \cdot \frac{273}{273 + T_a} \cdot \frac{P_b}{101,3}}$$

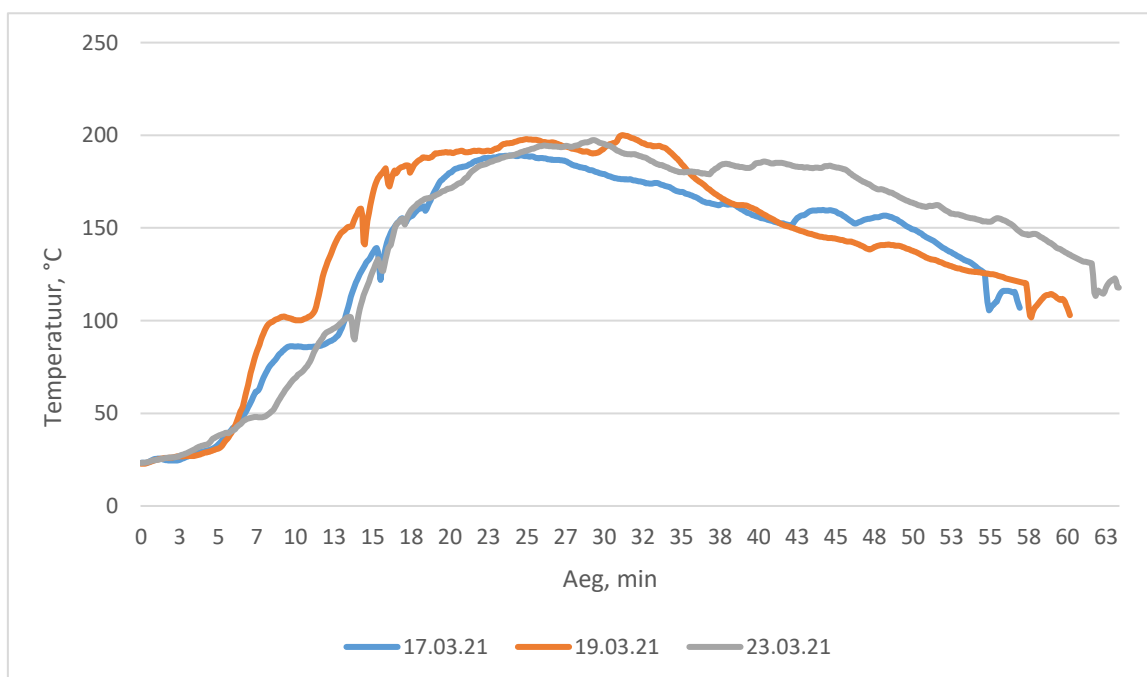
Kus

- V_{wa} on gaasiproovi maht;
- m_{tahked} on filtrile kogutud osakeste mass;
- T_a on gaasikella temperatuur °C;
- P_b on õhurõhk;

5.2 Süütekatsete tulemused ja analüüs

Esimesed süütekatsed toimusid süütetablettidega, mille käigus 4 tabletti asetati ahju sisse risti laotud puude peale, 2 väikese süütepuu vahele. Tahkete osakeste analüsaatori pump pandi tööle pärast süütamist ja katse kestis 10-11 minutit. Põhjused, miks pump pandi tööle alles pärast süütamist oli katsetajate ebakindlus, kas selliste parameetritega läheb laotud kuhi üldse põlema. Õhu hoob ja resti hoob olid avatud asendis terve katse vältel.

Jooniselt 14 on näha temperatuuri aeglast tõusu süttimise faasis. Põhjuseks võib pidada süütekuubikute madalat põlemise intensiivsust. Samas kui põlemise intensiivsus oli madal, oli see pidev ja pikaajaline, süüdates pealmised puud, mis omakorda süütavad alumised read. Iga katse keskel toimus paari minutiline temperatuuri seisak, mis on tõenäoliselt põhjustatud alumiste puuridade süttimise viibest. Selline viivitus on vähem märgatav 23.03 toimunud katses, kus temperatuuri tõud oli aeglasem, kuid sujuvam.



Joonis 14 Süütekatsede temperatuurigranulid, süütamine pealt süütetablettidega

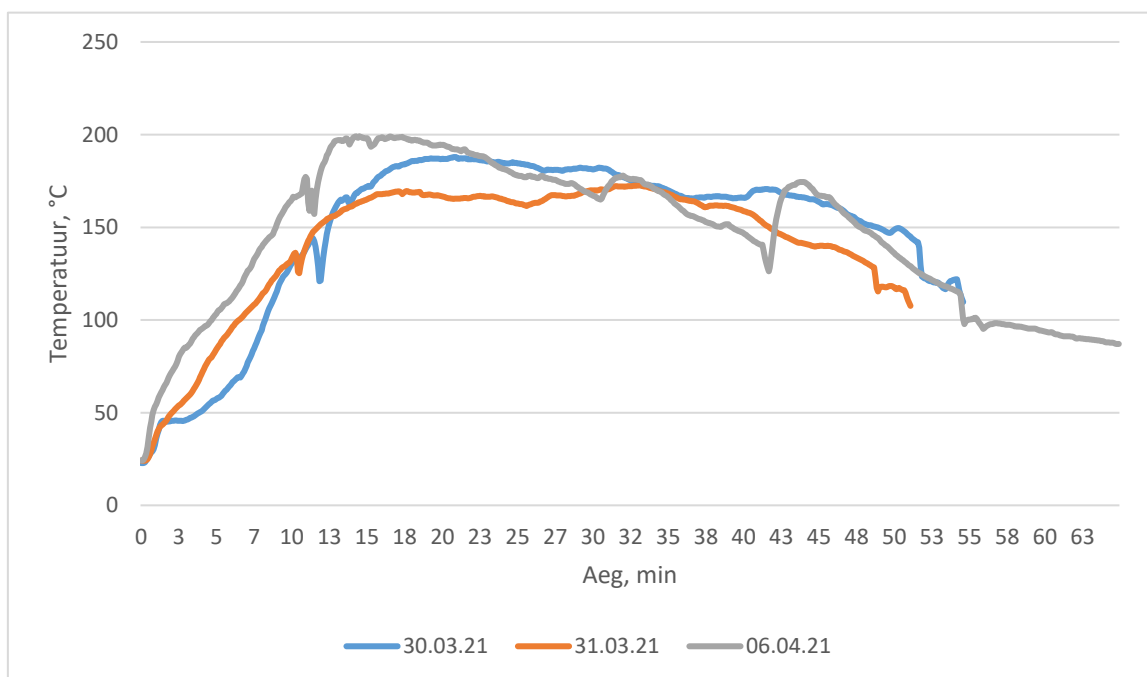
Tabelis 2 välja toodud filtrile kogutud lendtuha mõõtmiste paralleelid näitavad suurt varieerumist esimese kahe ja viimase katse vahel. 23.03 toimunud süütamisel oli lendtuha kogumisel põlemisgaaside temperatuurid palju madalamad, ulatudes vaeu üle saja kraadi katse lõppedes, samas kui laotud puude kogus ei olnud märkimisväärselt erinev eelnevatest katsetest.

Tabel 2 Süütekatse tulemused, pealt süütamine süütetablettidega

Kuupäev	17.03	19.03	23.03
Puude kogus, kg	5,03	5,54	5,06
Süütekoht	Ülevalt		
Süütematerjal	Tablett, 4tk		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	5-15	3-14	3-14
Katse kestvus, min	10	11	11
Temp. vahemik, °C	31-139	27-160	28-102
Keskmine temp., °C	81	88	58
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	81	93	36
Põlemisgaasi niiskus, %	4,0	2,9	2,3
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,5	102,2	101,2
Gaasi kiirus PM _{sum} mõõtmise ajal			
Ajavahemik graafikult, min	6-8	4-6	4-6
Katse kestvus, min	2	2	2
Temp. vahemik, °C	40-66	29-45	32-41
Keskmine temp. , °C	52	34	36
Gaasi kiirus, m/s	2,1	2,1	2,0
Gaasi kiirus pärast PM _{sum} mõõtmist			
Ajavahemik graafikult, min	17-18	16-17	15-17
Katse kestvus, min	1	1	2
Temp. vahemik, °C	154-159	182-180	133-155
Keskmine temp. , °C	158	180	141
Gaasi kiirus	3,5	4,6	3,6

Järgmiste süütekatsena toimusid süütamised ajalehega, kus 25 – 30 g suvaliselt valitud ajalehti asetati ülemiste väikeste süütepuude peale, alla ja vahele. Kohe enne süütamist pandi lendtuha analüsaatori pump tööle. Õhu hoob ja resti hoob olid mõlemad avatud.

Selliste parameetritega süütamine süütas ülemised puud peaaegu koheselt ja suure intensiivsusega. 30.03 tehtud katses toimus kohe alguses teadmata põhjusel temperatuuriseisak, aga paari minutiga hakkas temperatuur uuesti tõusma ja tema tipp ei jäänud väiksemaks võrreldes teiste katsetega. 06.04 tehtud katses märgatav järsk temperatuuritõus 42. minutil oli põhjustatud süte liigutamise katsetajate poolt, sest sellel ajal ei olnud põlenud puud veel oma raskuse all kokku varisenud. Seda tehti puhtalt põlemisprotsessi kiirendamise eesmärgil, et alustada järgmise katsega, milleks oli 4 puu lisamine hõõguvatele sütele, mis irooniliselt kukkus läbi (Joonis 15).



Joonis 15 Süütekatses temperatuurigrafikud, süütamine pealt ajalehega

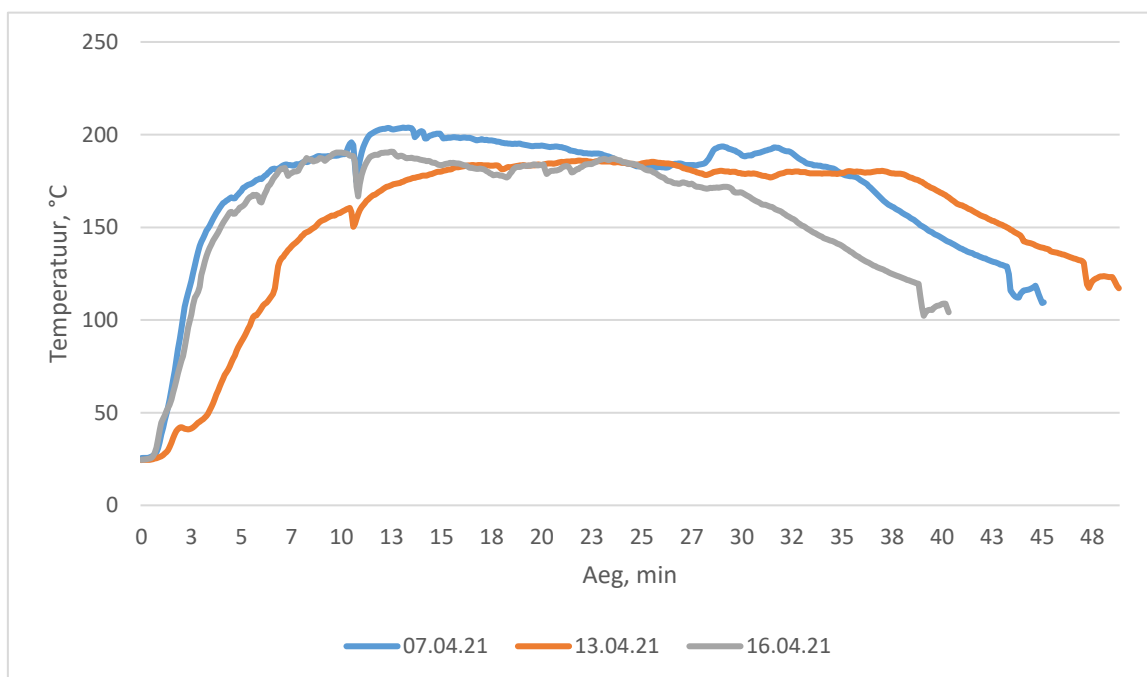
Tabelis 3 on näha, et iga paralleeli puude kaal oli peaaegu identne kuid lendtuha kogus normaalkuupmeetri kohta varieerus märgatavalt, 79, 103 ja 139 mg/Nm³ esimese teise ja kolmanda katse kohta. Süütekatses puhul on alati raske määrata, mis tulemusi nii palju mõjutab ja nende katsete seeria sellest ei erine. Hetkel näitab kõige suuremat korrelatsiooni põlemisgaaside niiskusega, mis võib viidata, et niiskus on tähtis osa lendtuha tekkel süütamise faasis võrdlemisi madalatel temperatuuridel, hetkel 80-120 °C, kuid praeguste andmete peale toetudes ei saa seda kindlalt öelda. Samas saab graafikult näha, et lendtuha kogus suurenes ka koos temperatuuri kiirema tõusuga.

Tabel 3 Süütekatse tulemused, süütamine pealt ajalehega

Kuupäev	30.03	31.03	06.04
Puude kogus, kg	5,23	5,34	5,26
Süütekoht	Ülevalt		
Süütematerjal	Ajaleht		
Süütematerjali kaal, g	25,2	26,7	26,7
Ajavahemik graafikult, min	1-11	0-10	1-11
Katse kestvus, min	10	10	10
Temp. vahemik, °C	41-144	24-136	58-170
Keskmine temp., °C	80	84	119
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	79	103	139
Põlemisgaasi niiskus, %	3,0	4,1	4,9
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,1	100,1	98,5
	Gaasi kiirus PM _{sum} mõõtmise ajal		
Ajavahemik graafikult, min	5-6	4-5	6-7
Katse kestvus, min	1	1	1
Temp. vahemik, °C	58-69	73-86	108-128
Keskmine temp. , °C	64	80	117
Gaasi kiirus, m/s	2,1	3,0	3,8
	Gaasi kiirus pärast PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	13-15	17-19	14-15
Katse kestvus, min	2	2	1
Temp. vahemik, °C	165-172	169-168	197-198
Keskmine temp. , °C	168	169	198
Gaasi kiirus	4,0	4,4	4,7

Järgmises katse seerias asetati süütepaber otse resti peale ning 2 väikest süütepuud laotati kuhja alla, võrreldes pealt süütamisega, kui need 2 süütepuud pandi kuhja peale. Ahju resti ja õhu hoovad olid avatud asendis. Lendtuha kollektori pump pandi tööle samal ajal kui paber süüdati.

Jooniselt 16 on näha teise paralleeli võrdlemisi aeglast temperatuuri tõusu. Üheks võimalikuks põhjuseks võib olla suurem puude kogus, mis takistas õhu liikumist ahju sees. Sellest katsest tuli välja ka kõige suurem hulk lendtuhka, kuigi temperatuurid olid sellest seeriast kõige madalamad ja kasvasid aeglaselt. Teisalt iseloomustab alt süütamist kiire temperatuuri kasv võrreldes teiste katsete seeriaga. Esimeses ja kolmandas katses jõudis põlemine ligilähedalt statsionaarsele olekule, kus temperatuurimuutus on väike, 5-10 minutiga. Teises katses toimus see 10-20 minutiga. Teistes katsete seerias toimus see 15-25 minutiga.



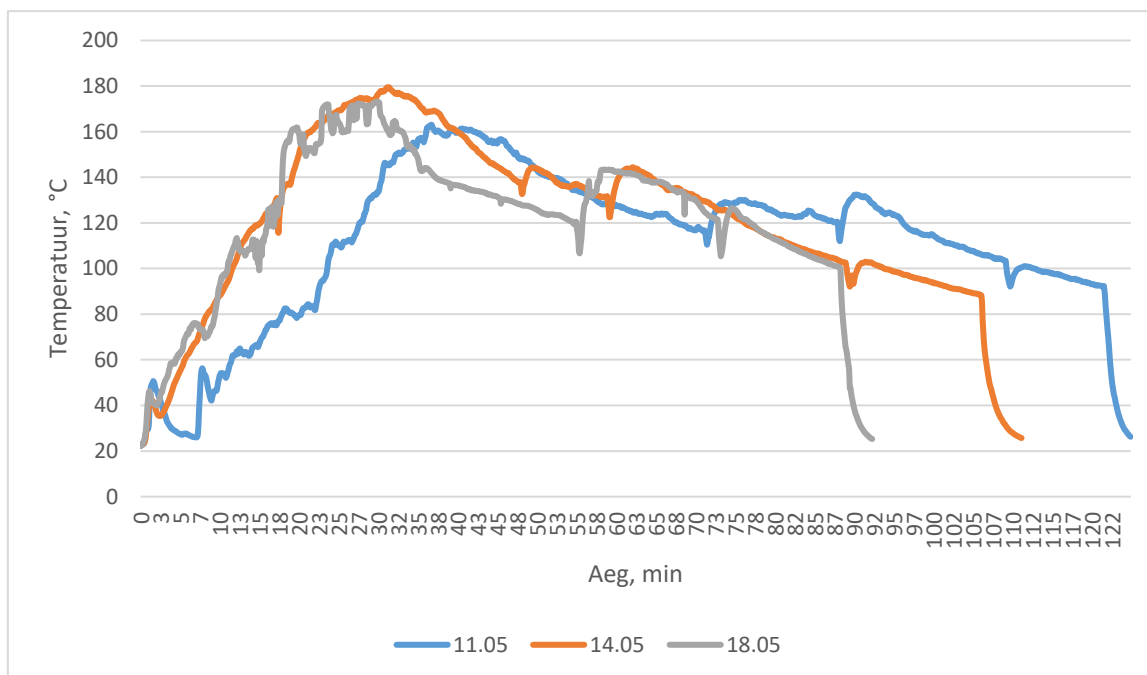
Joonis 16 Süütekatse temperatuurigrافیkid, süütamine alt paberiga

Tabelist 4 on märgata, et üldiselt varieerusid lendtuha mõõtmise tulemused vähe, kuid asetsesid püsivalt kõrgel. Siinkohas tuleb ära mainida, et puude kogus varieerus rohkem kui poolteist kilo, põlemisgaasi niiskuse varieeruvus oli märgatav ja asetses samuti püsivalt kõrgel.

Tabel 4 Süütekatse tulemused, süütamine alt paberiga

Kuupäev	07.04	13.04	16.04
Puude kogus, kg	4,98	5,92	4,29
Süütekoht	Alt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	27,7	28,1	27,4
Ajavahemik graafikult, min	0-11	1-10	0-11
Katse kestvus, min	11	9	11
Temp. vahemik, °C	26-196	25-160	25-188
Keskmine temp., °C	149	95	144
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	118	142	141
Põlemisgaasi niiskus, %	5,8	4,4	5,2
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	99,5	101,3	102,6
Gaasi kiirus PM _{sum} mõõtmise ajal			
Ajavahemik graafikult, min	5-7	6-8	6-7
Katse kestvus, min	2	2	1
Temp. vahemik, °C	166-182	102-145	168-182
Keskmine temp. , °C	174	124	182
Gaasi kiirus, m/s	3,9	4,4	4,5
Gaasi kiirus pärast PM _{sum} mõõtmist			
Ajavahemik graafikult, min	13-13	17-18	20-21
Katse kestvus, min	0	1	1
Temp. vahemik, °C	203-204	184-183	184-183
Keskmine temp. , °C	203	183	181
Gaasi kiirus	4,9	4,9	3,4

Kõige pikemad katsed tulid välja siis, kui ahju resti hoob oli kinni pandud. (Joonis 17) Siin iseloomustab põlemist pikemaajaline soojusärastus, mis viitab kõrgemale kasutegurile. Võib öelda, et teiste katsetega võrreldes on põlemine umbkaudselt poole pikem. Esimeses katses ei läinud ahi korralikult põlema. Peale paberi põlemist olid väiksemad puud põlema läinud, kuid mõnekümne sekundiga kustusid need ära, kogu ahi täitus suitsuga ja suits hakkas resti all olevast õhuavast välja tulema. On selge, et esimese korraga ei saavutatud korralikku tõmmet. Mõne minuti pärast täideti ahi uue paberiga, ja sellel korral läks ahi korralikult põlema.



Joonis 17 Süütekatse temperatuurigraafikud, pealt süütamine paberiga, resti hoob on kinni

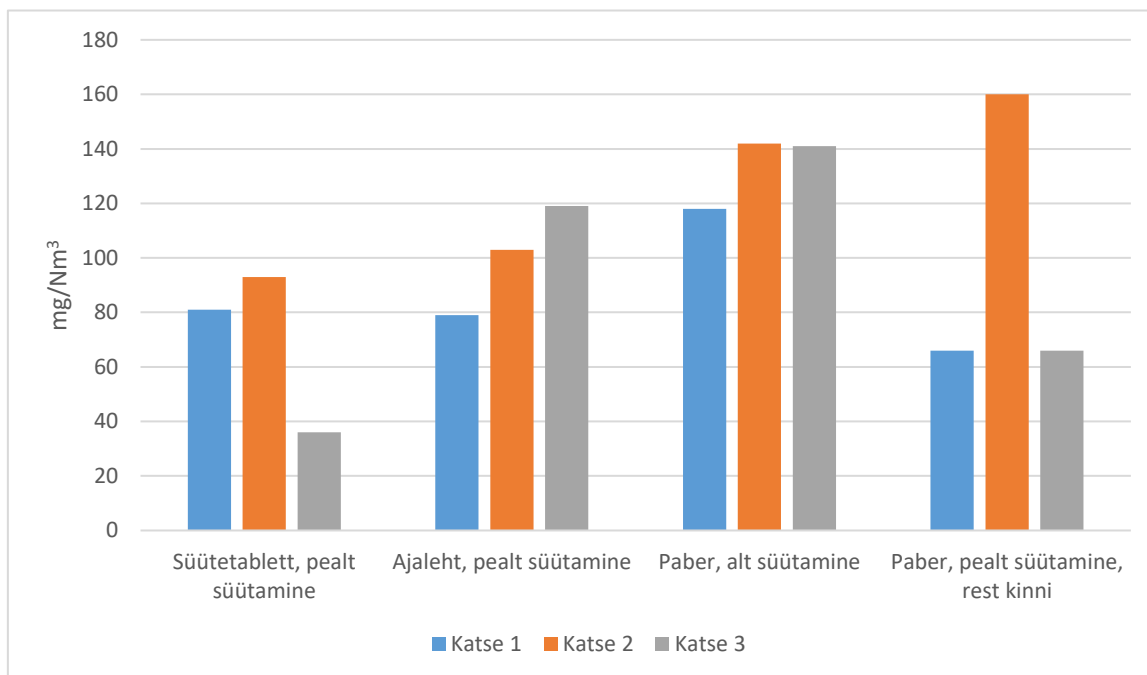
Lendtuha mõõtmise tulemused näitavad suurt varieerumist. (Tabel 5) Esimene ja kolmas katse näitavad suhteliselt madalt tulemust, kuid teine näitab rekordsuurust süütekatsete jooksul. Võimalik põhjus on hetkel teadmata. See viitab asjaolule, et neid katseid on vaja veel teha.

Tabel 5 Süütekatse tulemused, süütamine pealt süütamine paberiga kui resti hoob on kinni

Kuupäev	11.05	14.05	18.05
Puude kogus, kg	5,22	5,62	4,91
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	-	29,7	27,1
Ajavahemik graafikult, min	0-22	0-17	0-14
Katse kestvus, min	22	17	14
Temp. vahemik, °C	23-84	23-131	23-112
Keskmine temp., °C	56	80	75
Pm _{sum} tulemus, mg/Nm ³	66	160	66
Põlemisgaasi niiskus, %	2,1	3,6	2,5

5.3 Süütekatsete analüüsi kokkuvõte

Süütekatsete koondigrammis ei ole arvestatud ahju lisatud puude kogusega, ega keskmise temperatuuriga. Selline teguviis on valitud selle tõttu, et ei puude mass ega keskmine temperatuur muuda katsete paralleelide tulemusi kokkulangevamaks. See võib viidata asjaolule, et katsete varieerumist ühe seeria sees võib põhjustada rohkem puude suuruse muutus, puude asetsuse muutus ahjus või hoopis süütematerjali arvesse võtmata isepärasused, kui puude kaal ja temperatuur.



Joonis 18 Süütekatsete kokkuvõte

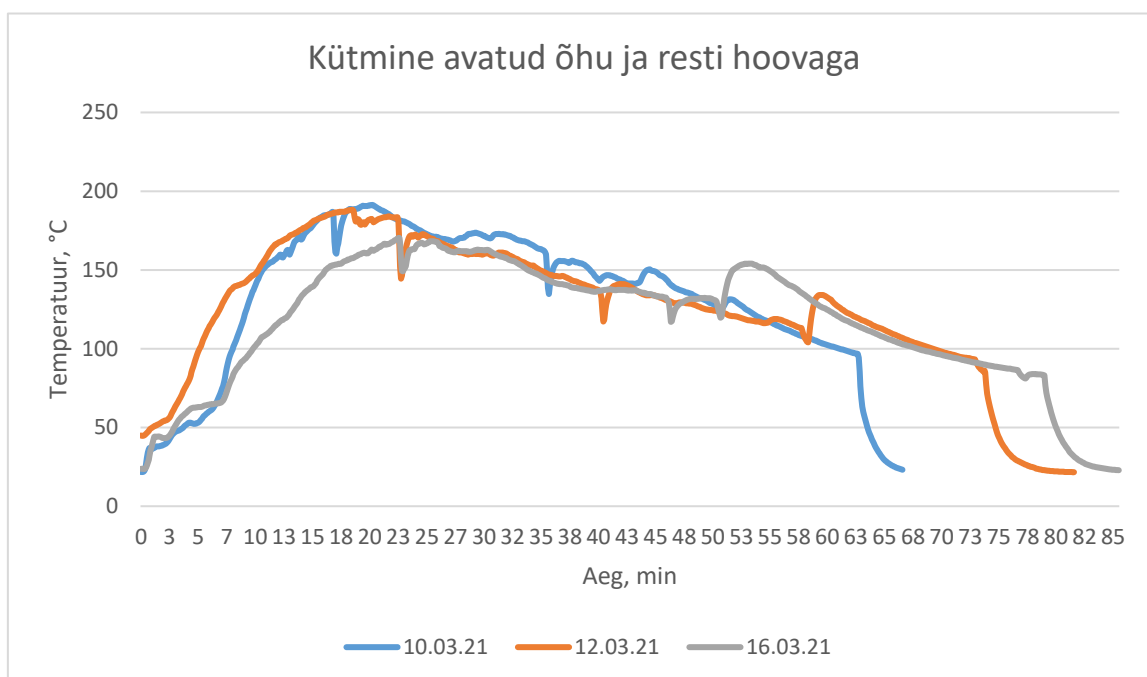
Kuigi varieeruvus on suur, võib välja tuua trendi, et süütekatsed, kus süütamiseks kasutati süütablette, näitavad enamjaolt paremat tulemust võrreldes ajalehega. (Joonis 18) Hetkel on eeldatud, et ajaleht ja tühi paber põlevad enam vähem võrdse heitmekogusega. Vahe võib ka välja tuua pealt ja alt süütamise vahel. Võimalik põhjus peitub selles, et pealt süütamisel hakkab alumises puukuhjas niiskuse eraldumine ja hiljem põlevate gaaside eraldamine järjest alumistel puude ridadel ning nende ainete viibeag kolde kõrge temperatuuriga alas on suurem, mis võimaldab neil paremini ära põleda. Võrreldes seda alt süütamisega, kus ainete eraldumine toimub väga kiiresti kogu kuha ulatudes. Pealmistest kihtidest toimub ainete eraldumine kuid need surutakse alt tuleva tõmbe tõttu kiiresti kolde kõrge temperatuuriga alast välja.

Katsete kohta, kus resti hoob on kinni, ei ole võimalik kindalt midagi öelda. Süütamine on küll palju aeglasem, kuid teisel katsel toimuv anomaalia ei luba järeldusi teha. Kindlalt on selle kohta vaja rohkem katseid teha.

5.4 Statsionaarse režiimi katsete tulemused ja analüüs

Nagu eelnevalt mainitud on statsionaarse režiimi perioodi raske määrata perioodilise ahju kütmisega ja selletõttu on võetud representiivseks periood kui temperatuur jõuab haripunkti ja enam ei tõuse. Üldiselt kattub periood selle ajaga kui viimased puud ahju laetud riidast lähevad põlema. Eelnevalt lendtuha proovi võtmisele mõõdetakse toru sees dünaamiline ja statsionaarne rõhk. Filtri sisestamise ja välja võtmise aeg on nähtaval temperatuurigraafikul. Suuremad hüpped pärast lehtuha proovide võtmist 12 ja 16.03 tehtud katsetes näitavad süte segamist operaatorite poolt, et need põleksid ahjus kiiremini ära. 12.03 tehtud katses toimus viga temperatuurianduri paigalduses ja sellepärast algavad temperatuuri andmed kõrgemalt tasemelt.

Siinsetes katsetes oli resti hoob ja õhu hoob avatud positsioonis. Selline konfiguratsioon lubab kõige tugevamat õhu pealevoolu resti alt. Temperatuurid saavutasid maksimaalse taseme umbes 15-20 minutiga. Kui oli märke temperatuuride stabiliseerumisest, siis mõõdeti rõhk toru sees peale mida alustati lendtuha proovi võtuga. Proovide kestuseks kujunes 18-24 minutit. (Joonis 19)



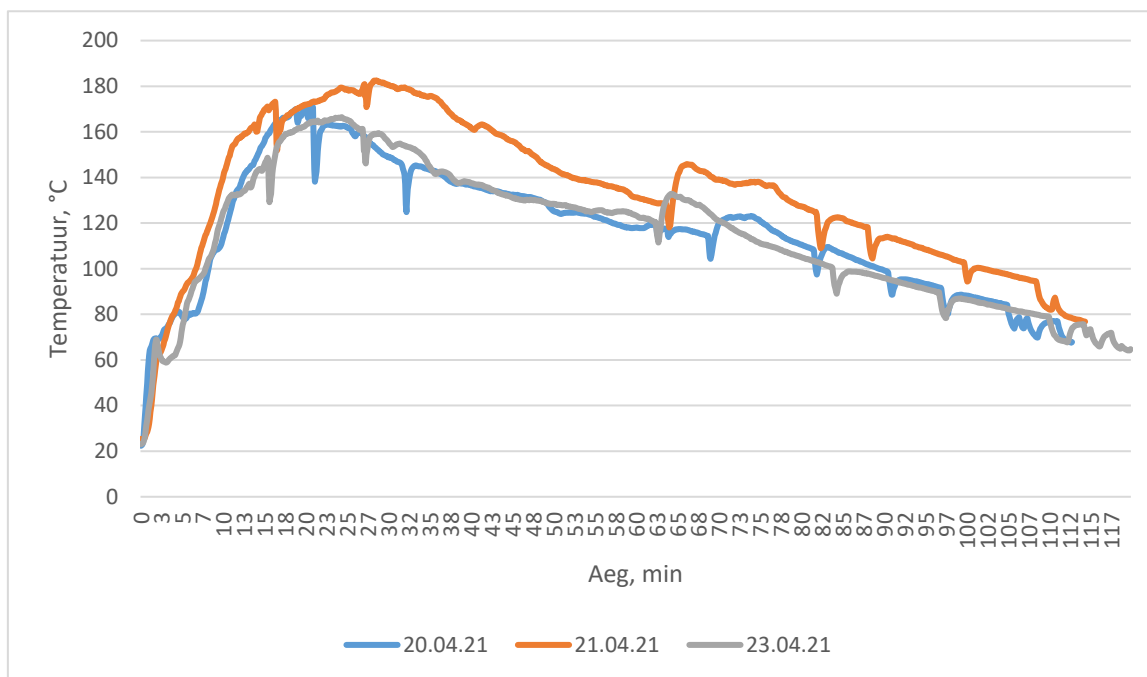
Joonis 19 Kütmise temperatuurigraafikud, katsed statsionaarsel olekul

Tahkete osakeste proovid näitasid head kokkulangevust võrreldes teiste katse parameetrite ja meetoditega, olles suhtelistelt madalad võrreldes eelnevalt vaadatud süütekatssetega. Tulemused on 37, 48 ja 50 mg/Nm³ esimese, teise ja kolmanda katse kohta vastavalt. (Tabel 6) Need on keskmiselt 2,4 korda madalamad, kui süütekatses ajalehega pealt süüdatud katsed ja ainult 1,6 korda madalamad võrreldes tablettidega süüdatud katsed.

Tabel 6 Statsionaarse oleku katse tulemused

Kuupäev	10.03	12.03	16.03
Puude kogus, kg	5,06	5,46	5,47
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	17-35	22-40	26-50
Katse kestvus, min	18	18	24
Temp. vahemik, °C	187-161	184-136	168-130
Keskmine temp., °C	176	157	144
Pm _{sum} tulemus, mg/Nm ³	37	48	50
Põlemisgaasi niiskus, %	5,0	3,0	1,63
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	102,0	98,3	101,2
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	14-16	20-22	23-25
Katse kestvus, min	2	2	2
Temp. vahemik, °C	172-185	183-183	170-167
Keskmine temp. , °C	178	183	161
Gaasi kiirus, m/s	3,8	4,5	4,4

Kinnise resti hoovaga tulid välja kõige pikemad ja madalaima maksimum temperatuuriga katsed. Maksimaalne temperatuur saavutati 20-30 minutiga. Samamoodi nagu eelnevalt vaadatud süütekattes, kus rest oli kinni, on sarnast temperatuuri profiili näha ka siin. Tahkete osakeste mõõtmisega alustati suhtelistelt lähedalt maksimaalsele temperatuurile. (Joonis 20)



Joonis 20 Kütmise temperatuuriprofiilid, katse stationaarsel olekul, resti hoob on kinni

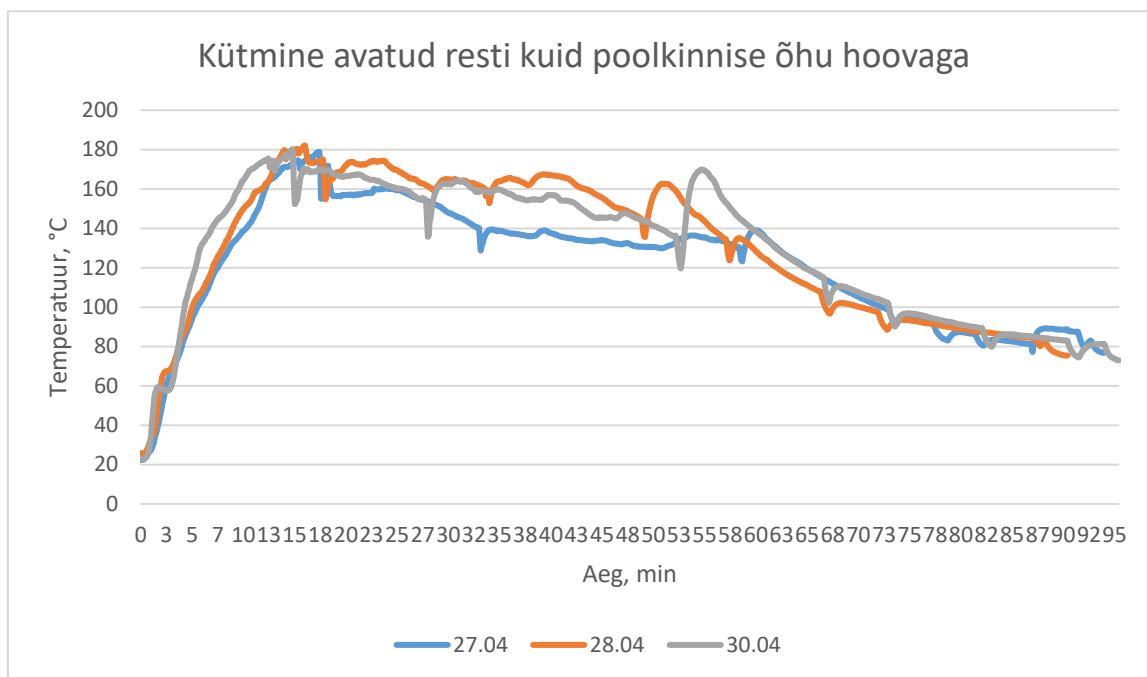
Tahkete osakeste mõõtmise tulemused on äärmiselt madalad ning käesolevatest katsetest kõige madalamad, olles 15, 45 ja 19 mg/Nm³ esimese, teise ja kolmanda katse kohta vastavalt (Tabel 7). Kahjuks ei saa seda hästi võrrelda kinnise resti hoovaga tehtud süütekattsetega, sest selle seeria teise katse tulemus on väga kõrge võrreldes ülejäänuga. Kui süütekatse teine tulemus välja jätta, siis näitavad stationaarses olukorras tehtud katsed keskmiselt 2,5 korda madalamat tulemust kui samade ahju parameetritega süütamise faasis. Võrreldes stationaarse olekuga, kus resti hoob oli lahti, on tahkete osakeste kontsentratsiooni tulemused keskmiselt 1,7 korda madalamad. Kui välja jätta teine katse on tulemused keskmiselt 2,6 korda madalamad.

Katseid iseloomustab suur varieeruvus ahju laotud puude kaalus. Teise katsesse laoti peaaegu 1,3 korda raskem puude kogus võrreldes esimese ja viimase katsega. Samuti on näha teises katses ka suurt tõusu tahkete osakeste kontsentratsioonis stationaarses olekus koos kõrgema keskmise temperatuuriga katse ajal.

Tabel 7 Statsionaarse oleku katse tulemused kui resti hoob on kinni

Kuupäev	20.04	21.04	23.04
Puude kogus, kg	4,87	6,2	4,82
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	29,3	26,7	30,0
Ajavahemik graafikult, min	21-32	16-27	16-27
Katse kestvus, min	11	11	11
Temp. vahemik, °C	171-145	173-181	148-161
Keskmine temp., °C	156	173	161
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	15	45	19
Põlemisgaasi niiskus, %	2,9	2,5	4,5
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,4	100,0	100,3
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	19-20	14-15	13-14
Katse kestvus, min	1	1	1
Temp. vahemik, °C	170-170	163-171	137-144
Keskmine temp. , °C	168	166	140
Gaasi kiirus, m/s	3,4	3,8	4,3

Järgmises katsete seerias on välja toodud poolkinnise õhuhoovaga tehtud katsed. Temperatuuriprofiilis ei ole tekkinud suuri muutusi võrreldes täiesti lahtise õhuhoovaga. Ahi saavutas maksimaalse temperatuuri 10-15 minutiga ja hakkas peaaegu koheselt aeglaselt langema. Temperatuuritõusud 50 ja 60 minuti vahel on sellest, et katsetajad liigutasid ahjus olevaid sütt et põlemist kiirendada (Joonis 21).



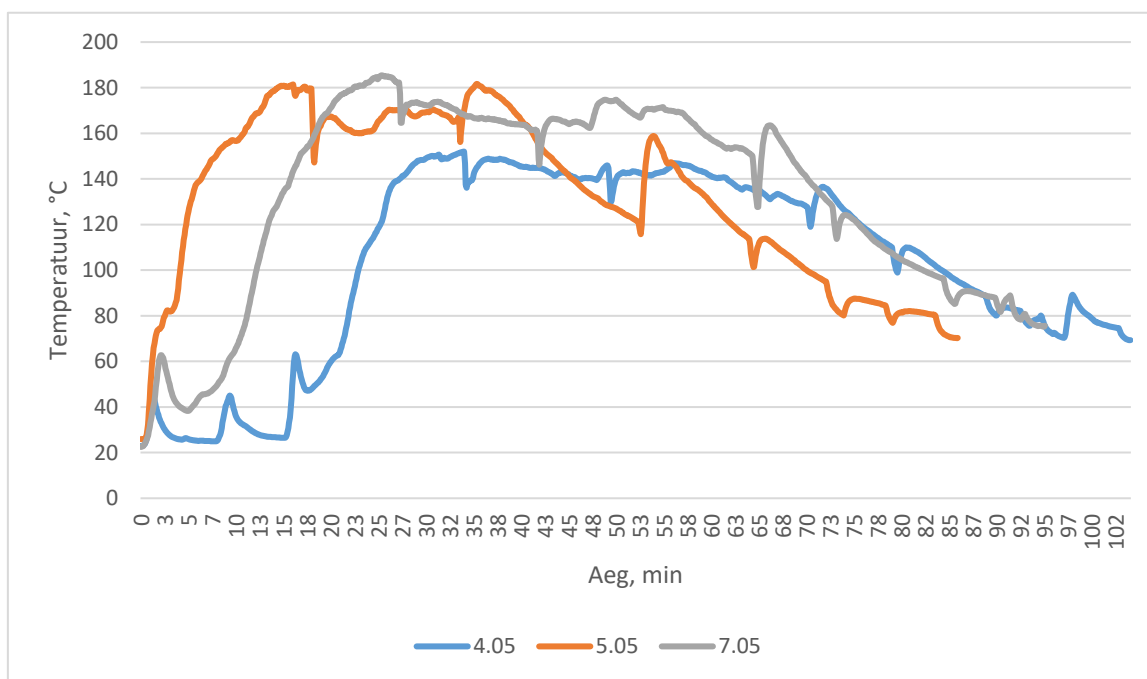
Joonis 21 Kütmete temperatuurigraafikud, katsed statsionaarses olekus poolkinnise õhu hoovaga

Tulemustest võib näha, et põlemisgaasi kiirus on keskmiselt kergelt madalam võrreldes lahtise õhu hoovaga katsetel ja samas on tahkete osakeste kogus statsionaarses olekus keskmiselt kergelt kõrgem, kuid tulemuste varieeruvus on piisavalt suur, et kindlalt seda väita ei saa. Pooliku õhu hoovaga on PM_{sum} tulemus on 39, 84 ja 57 mg/Nm^3 (Tabel 8) võrreldes 37, 48 ja 50 mg/Nm^3 katsetega, kus õhu hoob oli täielikult lahti. Põlemisgaaside kiirus oli keskmiselt 0,6 m/s madalam ja ahju laotud puude kogus oli peaaegu identne.

Tabel 8 Statsionaarse oleku katse tulemused kui õhu hoob on poolkinni

Kuupäev	27.04	28.04	30.04
Puude kogus, kg	5,55	5,51	5,16
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	17-33	18-34	15-28
Katse kestvus, min	16	16	13
Temp. vahemik, °C	179-140	175-158	180-155
Keskmine temp., °C	155	167	164
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	39	84	57
Põlemisgaasi niiskus, %	3,8	3,9	3,8
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,0	101,3	100,5
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	15-17	15-17	12-14
Katse kestvus, min	2	2	2
Temp. vahemik, °C	175-176	180-175	175-177
Keskmine temp. , °C	174	179	174
Gaasi kiirus, m/s	3,4	4,0	3,5

Edasi on välja toodud võrdlus kuuse kütmisega ahju parameetritel, kus õhu ja resti hoovad on avatud. Tahkeid heitmeid mõõdeti statsionaarses olukorras. Siinsetes katsetes oli katsetajatel raskusi kuuse süütamisel. Graafikul märgatavad piigid katsete alguses, kuid kohesed temperatuuri langused näitavad paberi põlemist kuis puit ei ole veel korralikult põlema läinud. Esimes katses oli vajalik 3 korda samas koguses süütematerjali põletada puude kuhja peal, et need läheksid korralikult põlema. Viimases katses on näha samasugust temperatuuri piiki, kuid paar minutit pärast langust hakkas temperatuur uuesti tõusma, mis tähendab, et pealmised puud läksid põlema, aga seda väga vaevaliselt (Joonis 22).



Joonis 22 Kütmete temperatuurigraafikud, katsed statsionaarsel olekul, kütmine kuusega

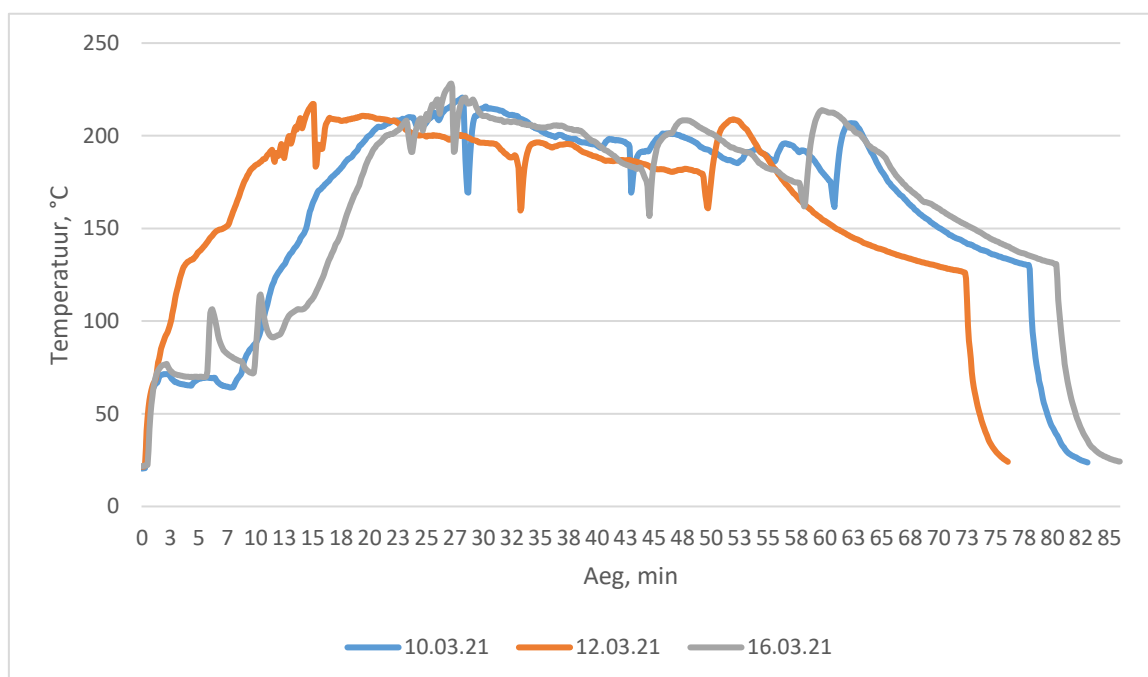
Temperatuurigraafik näitab suhteliselt samasuguseid maksimaalseid temperatuure võrreldes lepa põletamisega samades tingimustes, kuid graafikud näitavad pikemaajalist olukorda ligilähedaselt statsionaarsele olukorrale. Kui lepa põletamisel hakkas temperatuur pärast paari minutit langema, siis kuuse põletamisel püsis temperatuur kõrge 20-30 minutit. Tahkete osakeste kontsentratsioon ei ole muutus väga suur, kuid on siiski märgatav, olles keskmiselt 1,2 korda kõrgem kui lepa põletamisel samades tingimustes.

Tabel 9 Statsionaarse oleku katse tulemused kui toimus kuusega kütmine

Kuupäev	04.05	05.05	07.05
Puude kogus, kg	5,49	5,32	6,32
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	34-49	18-33	27-42
Katse kestvus, min	15	15	15
Temp. vahemik, °C	152-145	180-167	182-161
Keskmine temp., °C	144	166	168
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	60	53	49
Põlemisgaasi niiskus, %	3,5	3,8	3,2
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	100,3	99,6	100,1
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	31-33	16-17	25-27
Katse kestvus, min	2	1	2
Temp. vahemik, °C	150-150	181-180	184-184
Keskmine temp. , °C	149	179	185
Gaasi kiirus, m/s	4,1	4,6	4,6

5.5 Järealkütmise mõju tulemused ja analüüs lendtuha tekkele

Järealkütmise mõju uuriti juba sooja ahju uuesti kütmisel keskmiselt sama kogusega nagu külma ahju kütmisel. Ahi küteti soojaks eelmise katsega, kus uuriti statsionaarse olukorra heitmeid külma ahju kütmisel. Seejärel lasti viimastel sütel ära kustuda ja ahju laoti uus kuhi puid sama põhimõttega, mis pandi samamoodi põlema. Esimese ja kolmanda katse alguses toimus viivitus enne kuhja süütamist ja kolmandas katses oli raskusi ahju laotud kuhja süütamisel. Seda märgivad teravad temperatuuri piigid 5 ja 10 minuti vahel, kus paber tekitas temperatuuri tõusu, kuid puit ei läinud esimese korraga põlema. Teisel korral läks puit korralikult põlema (Joonis 23).



Joonis 23 Järealkütmise temperatuurigraafikud, katsed statsionaarses olekus

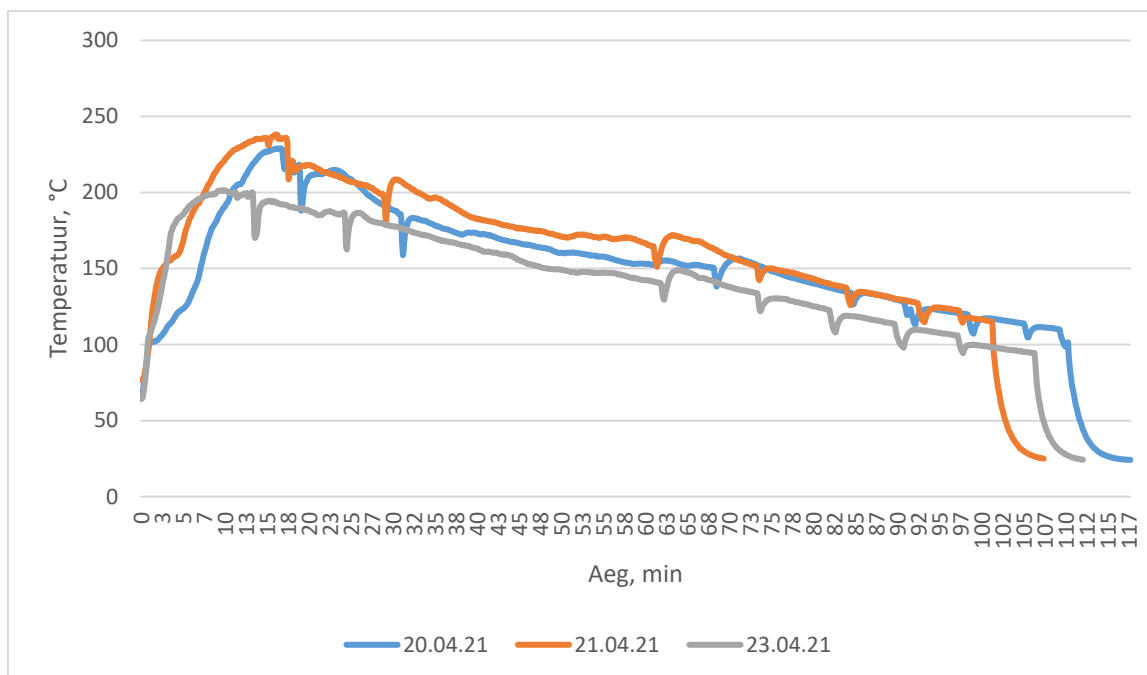
Võrreldes külma ahju kütmisega on näha marginaalset heitmete kontsentratsiooni tõusu. Tulemused näitavad iseeneses head korrelatsiooni, andes 43, 65 ja 53 mg/Nm³ vastavalt paralleelidele (Tabel 10) võrreldes külma ahju korral 37, 48 ja 50 mg/Nm³. Keskmiselt on märgata 1,2 kordset tõusu tahkete osakeste kontsentratsioonis statsionaarse oleku lähedal. Suitsutorus liikuv põlemisgaaside temperatuur oli peaaegu identne tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmise ajal. Katses kasutatud puidu koguse kaalus varieerusid 1 kg ulatuses, kuid kõige kõrgema puidukogusega katses tuli välja kõige madalam heitmete kontsentratsioon, samas kui gaasi kiirus torus on kõige kõrgem.

Tabel 10 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine

Kuupäev	10.03	12.03	16.03
Puude kogus, kg	6,60	5,56	5,60
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	28-43	15-33	27-44
Katse kestvus, min	15	18	17
Temp. vahemik, °C	221-194	217-185	226-173
Keskmine temp., °C	203	202	202
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	43	65	53
Põlemisgaasi niiskus, %	3,0	0,21*	3,4
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	102,0	98,3	101,2
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	26-28	14-15	25-26
Katse kestvus, min	2	1	1
Temp. vahemik, °C	211-219	210-217	212-215
Keskmine temp. , °C	214	211	215
Gaasi kiirus, m/s	5,2	4,6	4,9

*Tulemuste analüüsis võis tekkida viga suure kuivati kolonni kaalu üles märkimisel

Kinni resti hoovaga tehtud järelkütmine näitab temperatuuri kiiremat kasvu. Maksimaalne temperatuur saavutati 10-20 minutiga, võrreldes seda külma ahju kütmisega, maksimaalne temperatuur saavutati 20-30 minutiga. Hiljem langes temperatuur peaaegu lineaarselt. Teisel katsel toimus temperatuuri anomaalia, kus pärast filtri sisestamist jäi temperatuur madalamale tasemele kui katsele eelnev ja järgnev temperatuuriprofiil annaks mõista. Võimalik, et filtri sisestamisel jäi gaasikäigu ava korralikult sulgemata ja katmiseks kasutatud riidetükk lasi külma toaõhku liiga palju läbi (Joonis 24).



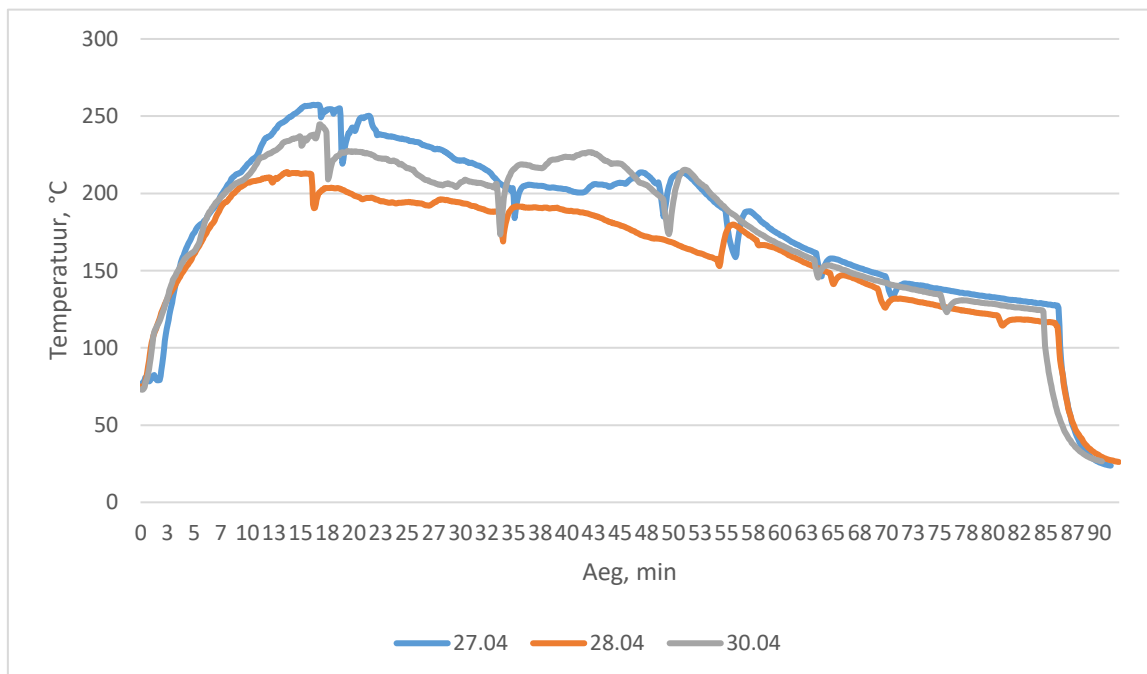
Joonis 24 Järelkütmistele temperatuuriprofiilidele, katsed stationaarses olekus, resti hoob on kinni

Tahkete osakeste mõõtmise tulemused näitavad kõrgemaid kontsentratsioone kui külma ahju kütmine samadel ahju parameetritel. Siin on tulemused vastavalt 59, 28 ja 31 mg/Nm³ (Tabel 11) võrreldes külma ahju korral 15, 45 ja 19 mg/Nm³. Tulemused on suhteliselt varieeruvad, kuid kõrgema temperatuuriga on keskmiselt märgata 1,5 kordset kasvu tahkete heitmete kontsentratsioonis. Kui välja jätta mõlema katse eemale seisvad tulemused on heitmete kasv 1,8 kordne. Märgata on ka põlemisgaaside kiiruse kasvu 3,8 m/s 4,7 m/s lähedale, tõenäoliselt temperatuuride vahet.

Tabel 11 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine kui resti hoob on kinni

Kuupäev	20.04	21.04	23.04
Puude kogus, kg	5,46	5,98	4,80
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	27,5	-	28,2
Ajavahemik graafikult, min	19-31	17-29	13-24
Katse kestvus, min	12	12	11
Temp. vahemik, °C	218-186	233-199	200-186
Keskmine temp., °C	203	211	189
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	59	29	31
Põlemisgaasi niiskus, %	3,5	5,0	3,8
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,4	100,0	100,4
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	17-18	15-16	12-13
Katse kestvus, min	1	1	1
Temp. vahemik, °C	228-221	236-238	198-200
Keskmine temp. , °C	220	236	199
Gaasi kiirus, m/s	4,7	4,9	4,6

Pooliku õhu hoovaga tehtud järekütmise katse seerias on märgata, et maksimaalne temperatuur saavutati 10-15 minutiga, mis on samasugune võrreldes külma ahju kütmisega. Temperatuur tõusis igas katses üle 200 kraadi (Joonis 25). Katseid iseloomustab suurem kütuse kaal.



Joonis 25 Järelkütmise temperatuurigrafikud, katsed statsionaarses olekus kui õhu hoob on poolkinni

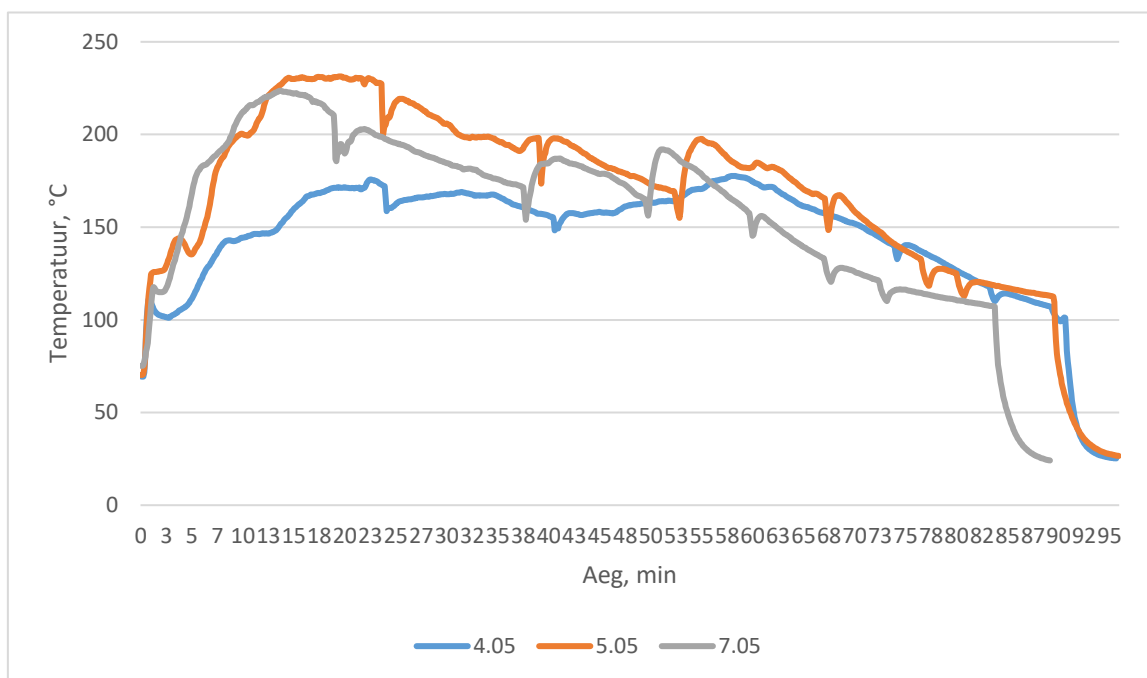
Tahkete osakeste kontsentratsioonid on 54, 68 ja 44 mg/Nm³ (Tabel 12) võrreldes külma ahju kütmisega 39, 84 ja 57 mg/Nm³. Keskmiselt langes tahkete heitmete kontsentratsioon marginaalselt ainult 1,1 korda, kuid samas ei saa nende tulemuste põhjal kindlalt järelada heitmete langustrendi, sest varieeruvus on selle jaoks liiga suur. Võrreldes külma ahju kütmisega lisati ahju keskmiselt 1,1 korda raskem puidu kogus.

Kui pooliku õhuhoovaga järelkütmise katseid võrrelda teiste ahju parameetritega, siis on keskmiselt märgata peaaegu samasugust heitmete kontsentratsiooni võrreldes avatud õhu ja resti hoovaga, milleks oli keskmiselt 53 mg/Nm³ vastavalt, ning 1,4 kordset langust võrreldes olukorraga kui resti hoob on kinnises asendis, milleks oli keskmiselt 40 mg/Nm³.

Tabel 12 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine kui õhu hoob on poolkinni

Kuupäev	27.04	28.04	30.04
Puude kogus, kg	6,40	5,81	6,03
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	23,6	-	31,3
Ajavahemik graafikult, min	19-35	16-34	17-33
Katse kestvus, min	16	18	16
Temp. vahemik, °C	255-203	212-187	241-206
Keskmine temp., °C	228	195	215
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	54	68	44
Põlemisgaasi niiskus, %	4,6	3,2	4,2
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,0	101,3	100,0
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	17-18	15-16	15-16
Katse kestvus, min	1	1	1
Temp. vahemik, °C	257-254	213-213	236-238
Keskmine temp. , °C	254	213	235
Gaasi kiirus, m/s	5,1	4,6	4,6

Lisaks on kasulik välja tuua võrdlus okaspuu, hetkel kuuse, järelkütmisega. Katse protsess oli sama võrreldes teiste järelkütmise katsetega. Esimesel katsel toimus anomaalia, kus temperatuur ei tõusnud nii kõrgele kui teistes, samas kui ahju laotud puude kogus oli katse seeria jooksul keskmine ja põlemisgaasi niiskus ei viidanud asjaolule, et puud on märjad. Samas iseloomustab esimest katset kõrge temperatuuri hoidmine rohkem kui 40 minutit kui teiste katsete temperatuurid hakkasid langema suhteliselt kiirelt pärast maksimaalse temperatuuri saavutamist (Joonis 26).



Joonis 26 Järelkütmise temperatuurigraafikud, katsed stationaarses olekus kui toimus kuusega kütmine

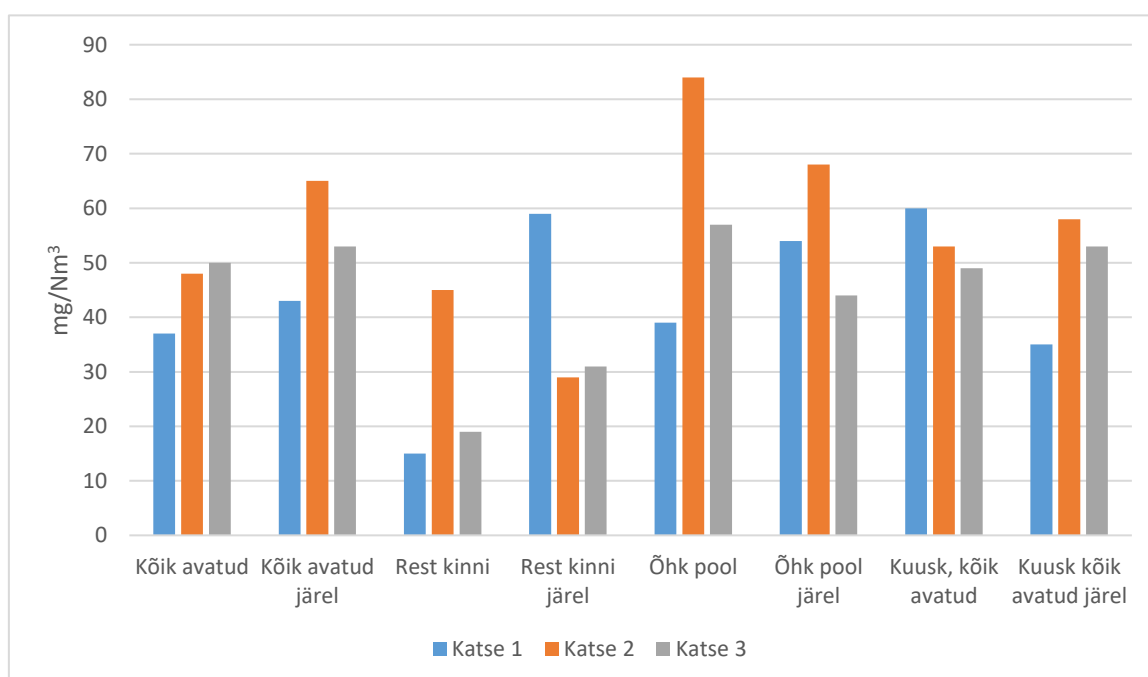
Tahkete osakeste tulemus olid 35, 58 ja 53 mg/Nm³ (Tabel 13) võrreldes külma ahjus kütmisega 60, 53, 49 mg/Nm³ vastavalt. Tulemused on varieeruvad, kuid näitavad keskmiselt 1,1 kordset langustrendi.

Tabel 13 Statsionaarse oleku katse tulemused, järelkütmine kuuse kütmisel

Kuupäev	04.05	05.05	07.05
Puude kogus, kg	6,35	6,50	5,90
Süütekoht	Pealt		
Süütematerjal	Paber		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	24-41	24-39	19-38
Katse kestvus, min	17	15	19
Temp. vahemik, °C	172-154	227-198	210-172
Keskmine temp., °C	164	204	188
PM _{sum} tulemus, mg/Nm ³	35	58	53
Põlemisgaasi niiskus, %	3,2	4,2	3,6
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,3	99,6	100,1
	Gaasi kiirus kohe enne PM _{sum} mõõtmist		
Ajavahemik graafikult, min	21-23	22-23	17-18
Katse kestvus, min	2	1	1
Temp. vahemik, °C	171-175	230-228	219-216
Keskmine temp. , °C	173	229	217
Gaasi kiirus, m/s	4,7	5,4	5,0

5.6 Statsionaarse oleku analüüsi kokkuvõte

Joonisel 27 välja toodud statsionaarse oleku analüüs näitab, et tahkete osakeste kontsentratsioon on kõige madalam kui resti hoob on kinni. See näitab, et suurem õhu liikumine põletuskambri keskelt kui kambri alt mõjutab oluliselt tahkete osakeste teket. Järgmisena tuleb katsete seeria kus mõlemad resti hoob ja õhu hoob on avatud asendis. Neid seeriaid iseloomustab keskmiselt suurem tahkete osakeste kontsentratsioon statsionaarses olekus ahju järelkütmise ajal. Teisalt on märgata, et pooliku õhu hoovaga on tahkete osakeste kontsentratsioon kõige suurem, kuid järelkütmise ajal see ei suurenenud. Pooliku õhuhoovaga külma ahju kütmist iseloomustab suur tulemuste varieeruvus, mis välistab kindla analüüsi tegemist.

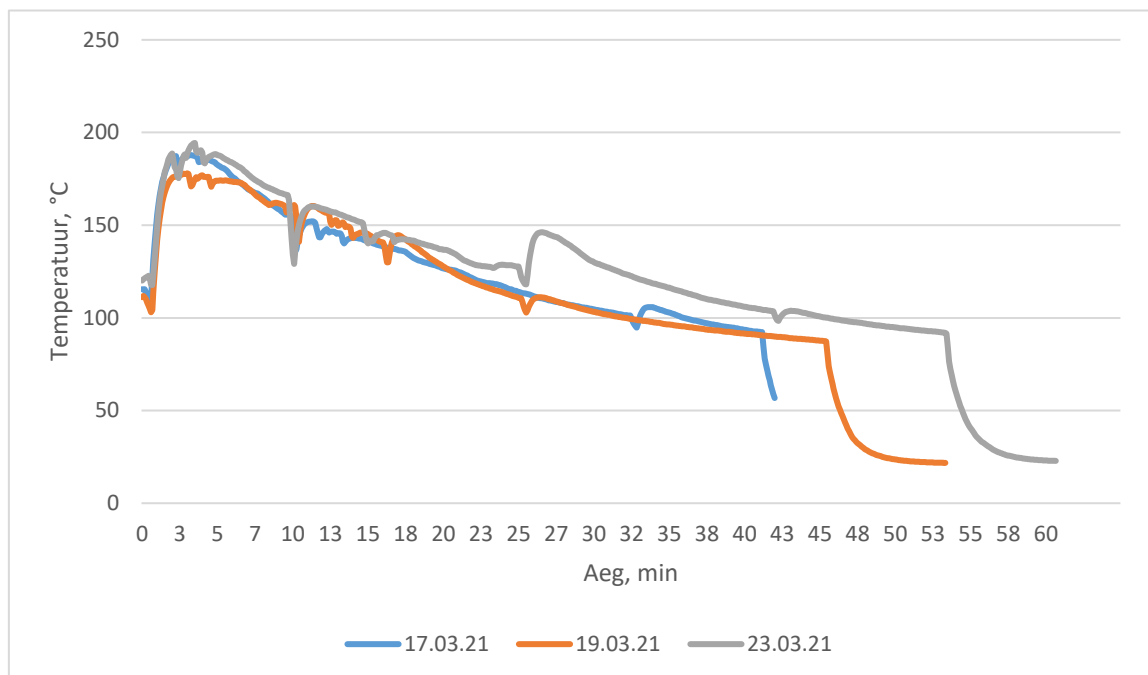


Joonis 27 Külma ahju ja sooja ahju kütmise koondiagramm stationaarse oleku analüüsis

Lisaks on eelneva lepa kütmist võrreldud kuuse kütmisega. Eesmärk oli näha, milline mõju on okaspuul tahkete heitmete tekkele samadel ahju parameetritel. Tulemustes on näha, et kuigi külma ahju kütmisel oli näha keskmiselt 1,2 kordset heitmete suurenemist, siis järelkütmisel oli märgata heitmete langust võrreldes lepa järelkütmisega samadel tingimustel, ning langust on märgata ka võrreldes külma ahju kütmisega kuusega.

5.7 Puude lisamise mõju tulemused ja analüüs

Puude lisamise mõju uurimiseks lisati hõõguvatele sütele eelmisest katsest valitud kogus puid, hetkel kaks. Puude lisades süttisid need peaaegu kohe, enne kui katsetajad jõudsid ahju ukse kinni panna. Temperatuurigraafikud näitavad, et maksimaalne temperatuur saavutati 2-5 minuti jooksul, millele järgnes väga lauge temperatuuri langemise kõver (Joonis 28). Katseid iseloomustab see, et tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmisel toimus ahjus suurem osa põlemisest juba ära.



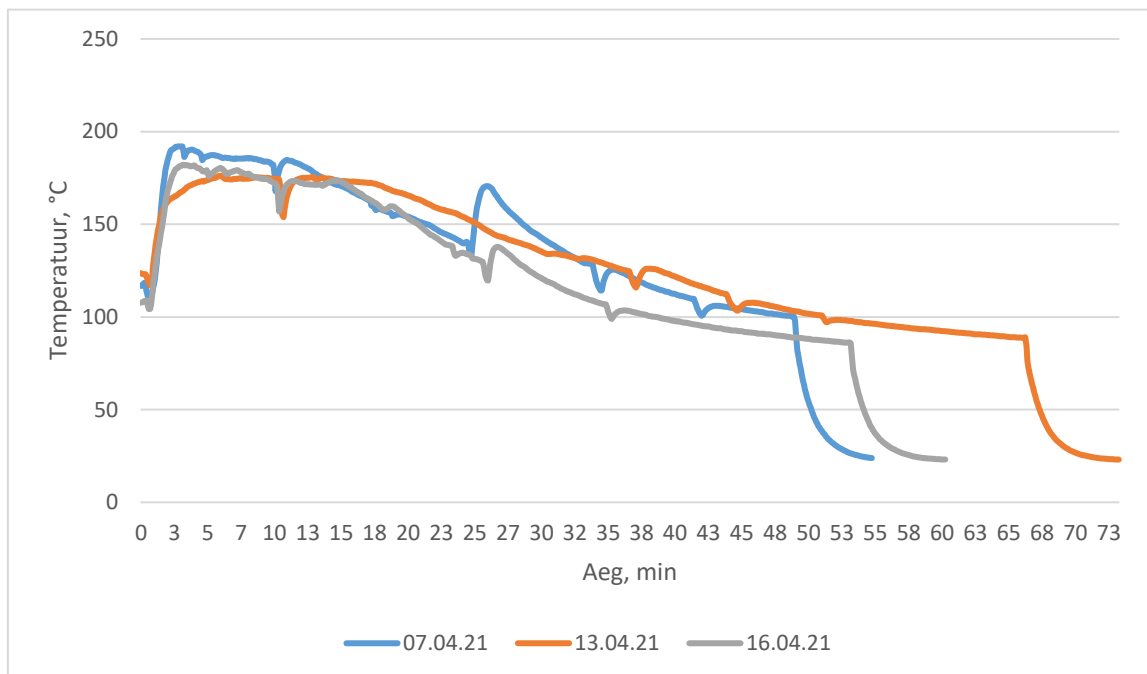
Joonis 28 2 puu lisamise temperatuurigraafikud

Kuigi temperatuuriprofiilid olid suhteliselt sarnased ning samuti sarnanesid katse alg-, maksimum- ja lõpptemperatuur, siis filtrile kogutud tahkete osakeste proovid näitavad suurt varieerumist, olles 89, 68 ja 131 mg/Nm³ vastavalt (Tabel 14). Samas tuleb rõhutada, et siin koa peal näitas puude kogus väga tugevat korrelatsiooni heitmete kogustega. Kui heitme kogused ühe kilogrammi puidu kohta ümber arvutada, siis oleksid tulemused 89, 91 ja 96 mg/Nm³kg vastavalt.

Tabel 14 Tulemused 2 puu lisamisel

Kuupäev	17.03	19.03	23.03
Puude kogus, kg	1,00	0,75	1,36
Süütekoht	-		
Süütematerjal	-		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	0-10	1-10	1-10
Katse kestvus, min	10	9	9
Temp. vahemik, °C	109-154	105-160	118-166
Keskmine temp., °C	171	166	177
Maksimum temp., °C	188	178	194
Pm _{sum} tulemus, mg/Nm ³	89	68	131
Põlemisgaasi niiskus, %	2,0	1,8	2,5
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,6	102,1	101,2
Gaasi kiirus PM _{sum} mõõtmise ajal			
Ajavahemik graafikult, min	2-4	3-5	2-4
Katse kestvus, min	2	2	2
Temp. vahemik, °C	187-187	178-176	189-189
Keskmine temp. , °C	186	175	187
Gaasi kiirus, m/s	4,5	4,7	4,6
Gaasi kiirus pärast PM _{sum} mõõtmist			
Ajavahemik graafikult, min	12-13	12-14	15-17
Katse kestvus, min	1	2	2
Temp. vahemik, °C	151-144	157-148	151-144
Keskmine temp. , °C	146	151	144
Gaasi kiirus	4,2	4,5	4,0

3 puu lisamist juba hõõgivatele sütele iseloomustab pikem statsionaarsele olekule lähedased tingimused võrreldes 2 puu lisamise katsetega. Puud lisati sama moodi resti kohale müüri taolise asendina. Samas on käesolevates katsetes märgata, et maksimaalsed temperatuurid oluliselt ei tõusnud (Joonis 29).



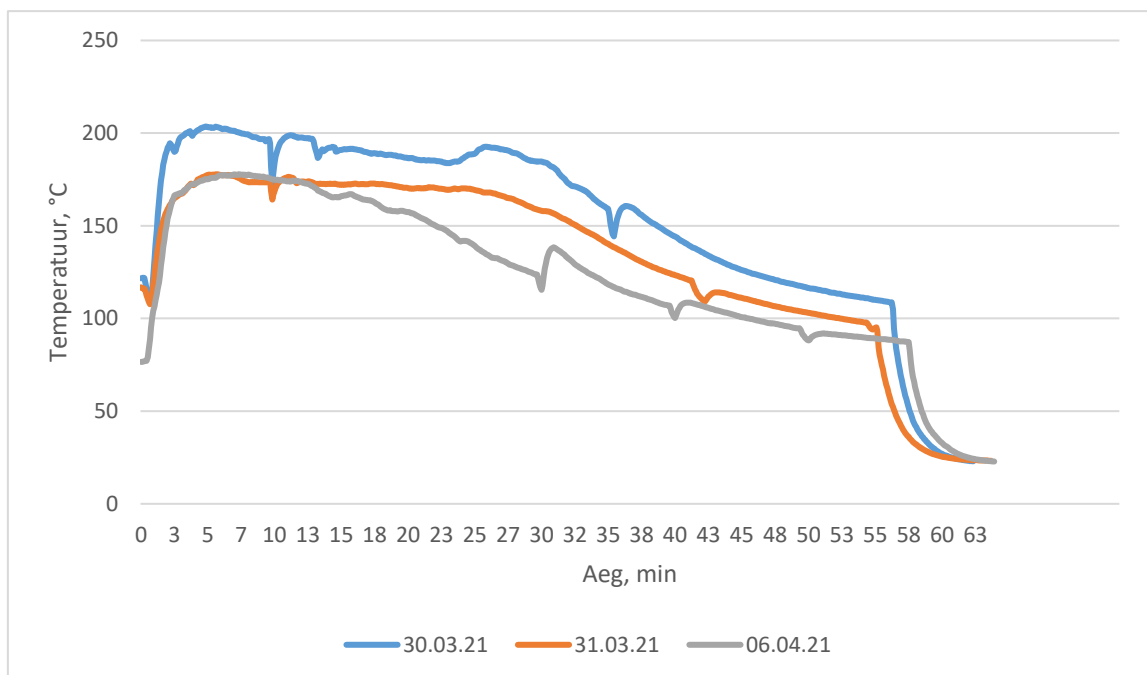
Joonis 29 3 puu lisamise temperatuurigraafikud

Selle koha peal olid katsetulemused 169, 85 ja 137 mg/Nm³ vastavalt (Tabel 15). Kui need tulemused arvutada ümber kg kohta, siis oleksid tulemused 86, 40 ja 78 mg/Nm³kg vastavalt. Samas võrreldes eelmise katseseeriaga on põlemise periood pikendatud ja kui eelnevat 2 puu lisamisel jõudis tahkete osakeste proovi võtmise ajal suurem osa laotud kujast ära põleda, siis siin jõudis põlemine alles poole peale.

Tabel 15 Tulemused 3 puu lisamisel

Kuupäev	07.04	13.04	16.04
Puude kogus, kg	1,97	2,15	1,75
Süütekoht	-		
Süütematerjal	-		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	1-10	1-10	1-10
Katse kestvus, min	9	9	9
Temp. vahemik, °C	109-182	117-174	104-172
Keskmine temp., °C	180	169	171
Maksimum temp., °C	192	176	182
Pm _{sum} tulemus, mg/Nm ³	169	85	137
Põlemisgaasi niiskus, %	4,3	2,8	3,7
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	99,5	101,3	102,6
Gaasi kiirus PM _{sum} mõõtmise ajal			
Ajavahemik graafikult, min	3-5	4-6	5-6
Katse kestvus, min	2	2	1
Temp. vahemik, °C	192-187	173-176	179-179
Keskmine temp. , °C	189	174	179
Gaasi kiirus, m/s	5,0	5,0	5,5
Gaasi kiirus pärast PM _{sum} mõõtmist			
Ajavahemik graafikult, min	17-19	13-14	-
Katse kestvus, min	2	1	-
Temp. vahemik, °C	163-156	175-175	-
Keskmine temp. , °C	158	175	-
Gaasi kiirus	4,4	4,7	-

Allolevates katse seerias oli kuumadele sütele lisatud 4 puud laotatud müürina resti põletuskambri keskele resti kohale. Joonisel 30 on näidatud, et neid katseid iseloomustab pikk periood, millal temperatuur on ligilähedane statsionaarsele olekule. Eelnevalt viimasele katsele lasid ahju katsetajad kuumadel sütel liiga palju jahtuda, mille tõttu ahju sisse laotud puud ei läinud ise põlema. Samas oli katseseadeldis juba tööle pandud, mille tõttu jäädvustati toimunud katse ebaõnnestunuks. Filter värvus selles katses pruunikaks, mis tähendab, et sinna peale kogunes selle aja möödudes peenosakesi, kuid nende mass oli liiga madal, et saada kaalumisel korrektset tulemust.



Joonis 30 4 puu lisamise temperatuurigraafik

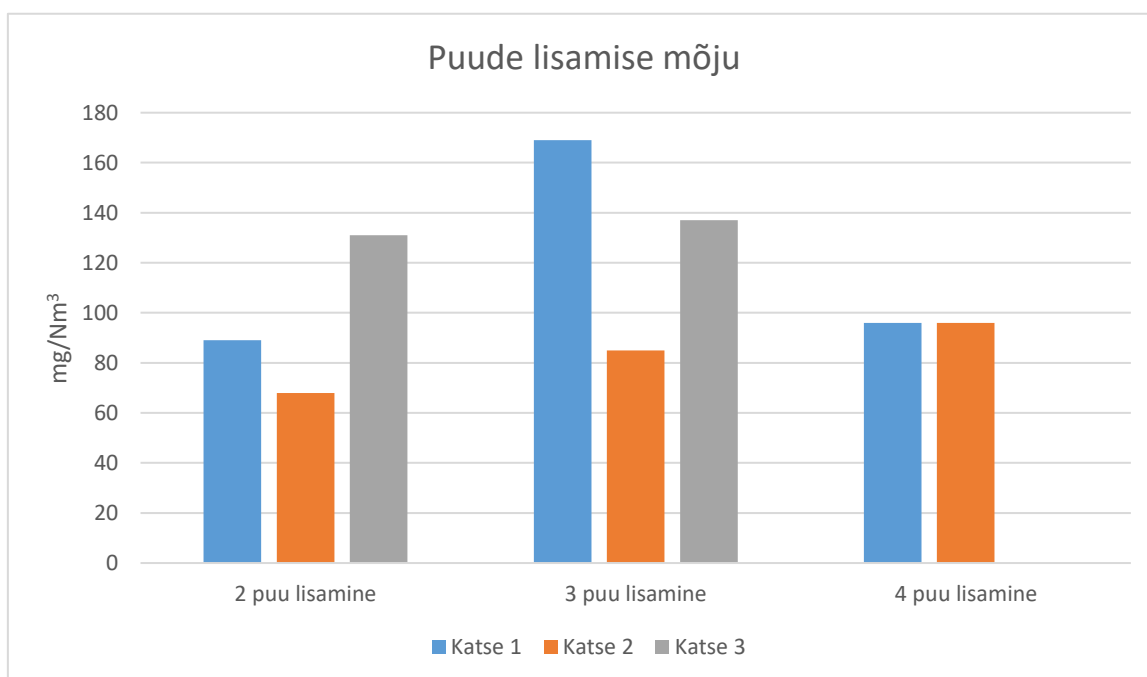
Selle koha peal olid katsetulemused 96 ja 96 mg/Nm³ vastavalt (Tabel 16). Kui need tulemused arvutada ümber kg kohta, siis oleksid tulemused 32 ja 35 mg/Nm³kg vastavalt. Võrreldes seda katseseeriat kahe eelmisega on põlemise periood veel rohkem pikendatud ja kui eelnevat 2 puu lisamisel jõudis tahkete osakeste proovi võtmise ajal suurem osa laotud kujast ära põleda, ning 3 puu lisamisel jõudis proovi võtmine poole peale, siis siin jõudis tahkete osakeste mõõtmise ajal käiv põlemise põhifaas alles 1/3 peale.

Tabel 16 Tulemused 4 puu lisamisel

Kuupäev	30.03	31.03	06.04
Puude kogus, kg	3,00	2,77	2,16
Süütekoht	-		
Süütematerjal	-		
Süütematerjali kaal, g	-	-	-
Ajavahemik graafikult, min	0-10	0-10	-
Katse kestvus, min	10	10	-
Temp. vahemik, °C	112-197	109-175	-
Keskmine temp., °C	192	167	-
Maksimum temp., °C	203	178	-
Pm _{sum} tulemus, mg/Nm ³	96	96	-
Põlemisgaasi niiskus, %	2,5	5,5	-
Absoluutne rõhk kanalis, kPa	101,6	102,1	-
Gaasi kiirus PM _{sum} mõõtmise ajal			
Ajavahemik graafikult, min	2-4	4-5	-
Katse kestvus, min	2	1	-
Temp. vahemik, °C	195-201	172-177	-
Keskmine temp. , °C	196	175	-
Gaasi kiirus, m/s	5,0	5,1	-
Gaasi kiirus pärast PM _{sum} mõõtmist			
Ajavahemik graafikult, min	13-15	12-13	-
Katse kestvus, min	2	1	-
Temp. vahemik, °C	196-192	174-173	-
Keskmine temp. , °C	191	174	-
Gaasi kiirus	4,8	4,5	-

5.8 Puude lisamise mõju kokkuvõte

Kolme erineva katse puhul, kus on lisatud 2 puud, 3 puud või 4 puud, on näha järkjärgulist temperatuuri languse aeglustumist, kuid maksimaalne temperatuur ei ole nende katsete keskel märgatavalt tõusnud. 2 puu lisamisel hoidis ahi põlemisgaaside temperatuuri maksimumi lähedal 3-6 minutit, 3 puu lisamisel 8-15 minutit ja 4 puu lisamisel kuni 20 minutit. Selleks maksimumiks kujunes üldjuhul 170-190 kraadi °C, välja arvatud 30.03 tehtud katse 4 puu lisamisega, kus maksimum temperatuur tõusis kergelt üle 200 kraadi °C. Viimati mainitud katses pandi ahju rekordilised 3,0 kg puid lisamiskatsetega võrreldes.



Joonis 31 Puude lisamise mõju koonddiagramm

Joonisel 31 on välja toodud, et 2 ja 4 puu lisamisega katsete tahkete osakeste kontsentratsioon oli keskmiselt sama, kuid 4 puu lisamisel jäi välja viimane katse, mis võib tekitada kahtlusi tulemuste interpreteerimisel. Kõige kõrgemad tulemused andsid 3 puu lisamine. Selle põhjus on hetkel teadmata. Tulemuste vaatlemisel tuleb meeles pidada, et 2 puu lisamisel on põlemise kestus lühike ja tahkete osakeste analüüs sisaldab peaaegu tervet süütamise ja maksimaalse põlemise perioodi. Katse kestus jäi kolme ja nelja puu lisamisel samaks, kuid põlemine on märgatavalt pikendatud. See tähendab, et kuigi erinevad analüüside seeriad näitavad suhteliselt väikest muutust kahe, kolme või nelja puu lisamisel, siis kogu põlemisproodi vältel on tahkete osakeste kogus märgatavalt suurendatud olenevalt sellest mitu puud lisatakse.

KOKKUVÕTE

Riikides kasutatakse üha enam väikseid majapidamises kasutatavaid põletusseadmeid, mis töötavad tahkete kütustega. Seda tehakse sooja vee, elektri ja soojuse tootmiseks ning neid kütteseadmeid kasutatakse ka ilu pärast. Sellised trendid kahjuks suurendavad tahkete osakeste emissioonide kontsentratsiooni õhus ja kõige rohkem on mõjutatud suurema asustusega alad, kus sääraseid tehnoloogiaid kasutatakse suuremas mahus. Tahketel osakestel on palju inimeste tervist mõjutavaid tegureid ja selle tõttu on vajalik uurida, kuidas need heitmed muutuvad erinevatel kütterežiimidel võttes arvesse ahju enda parameetreid.

Selleks kasutati ühe filtriga impaktorit, millega saab mõõta kõikide suurustega tahkete osakeste massi mingi kindla perioodi vältel. Katsetes on uuritud kuidas mõjutavad erinevad süütamise tegurid ja ahjus õhu liikumist reguleerivad hoovad tahkete osakeste teket. Proove võeti ahju suitsutorust ja tulemused on üksikasjalikult töös välja toodud. Katsete kütuseks oli enamjaolt hall lepp, kuid korra on võrdluseks välja toodud ka kuusega kütmine.

Katsete tulemused näitavad suurt varieerumist isegi üksikute paralleelkatsete vahel, mis olid tehtud ligilähedaselt samadel tingimustel. See mõjutab tulemuste interpreteerimist äärmiselt palju, kuid see võimaldab tuua välja trendid, kuhu poole saasteainete kontsentratsioonid liiguvad. Kõige kõrgemate heitmete kontsentratsioonidega paistavad välja süütamise faasis võetud proovid. Sealt on näha märkimisväärne alt ja pealt süütamise vahe. Alt süütamine annab keskmiselt 1,25 korda kõrgema tulemuse võrreldes pealt süütamisega, olles 134 ja 107 mg/Nm³ vastavalt. Süütamine valitud süütetablettidega annab kõige väiksema tulemuse, olles keskmiselt 70 mg/Nm³. Kinnise resti hoovaga tehtud katsed andsid liiga varieeruvad tulemused, et neid korrektselt interpreteerida

Põlemise haripunktis, kus temperatuur muutub suhteliselt vähe, ehk ligilähedaselt statsionaarsele olekule on tahkete heitmete hulgad palju korda madalamad, kui süütamise hetkel. See kinnitab ka teooriat. Hetkel on külma ahju kütmisel lahtise õhu ja resti hoovaga statsionaarse oleku heitmed 1,5-3 korda madalamad. Kõige parema tulemuse annab sellisel juhul kütmine, kus resti hoob on kinni ja kõige suurema kui õhu hoob on poolkinni, olles keskmiselt 26 ja 60 mg/Nm³ vastavalt. Lahtiste hoobadega kütmisel lepaga oli keskmiseks väärtuseks 45 ja kuusega 54 mg/Nm³ vastavalt, mis näitab marginaalset tõusu tahkete heitmete kontsentratsioonides lepa ja kuusega kütmise vahel vastavalt.

Juba eelnevalt soojaks köetud ahju kütmisel on mõnes katses märgata heitmete koguse suurenemist, teistes marginaalset vähenemist. Lahtiste hoobadega kütmisel tõusid heitmete kogused 45 pealt 54 mg/Nm³ peale ja kinnise resti hoovaga 26 pealt 40 mg/Nm³ peale. Samas on pooliku õhuhoovaga katses ja kuuse kütmisel olukorras kus kõik hoovad on lahti märgata, et heitmete kogused on 5 mg/Nm³ võrra langenud. See võib samuti olla ka anomaalia tulemuste suurtest kõikumistest.

Lisades 2-4 puud veel hõõguvatele sütele selliselt, et need süttivad ise näitavad süütekatsetele sarnaseid tulemusi, olles 96, 130 ja 96 mg/Nm³ vastavalt kahe, kolme ja nelja puu lisamisel ja nende katsete esimesel 10-l minutil. Põlemise aktiivsus, ei olnud kõigil katsetel sama. Kui 2 puu lisamisel võttis proovi võtmine aega peaaegu terve süütamise ja põlemise põhifaasi kestuse, siis 4 puu lisamisel võttis proovi võtmine aega umbes kolmandiku süütamise ja põlemise põhifaasi kestusest.

Katsete tulemustena tuleb tõdeda, et kasutatav tehnoloogia tekitab liiaga segadust katse tulemuste tõlgendamisel ja raskusi katsete läbiviimisel sellepärast, et nii kiire perioodilisusega kütmise katsetel ei ole võimalik täpseid tulemusi saada. Katse tulemuste varieerumisel ei saa eristada kasutatava tehnoloogia mõõteviga põlemise kiire perioodilisuse tõttu ja katsete enda varieerumist nende ülesehituses. Seetõttu soovitatakse katseid korrata kasutades tehnoloogiaid, mis võimaldavad jälgida tahkete osakeste detekteerimist reaajas. Nendeks mõõtesedmeteks võivad olla näiteks Dekati ELPI+ või Dekati eFilter.

Samas moodustavad kogutud tulemused üldise teadmiste põhja kui palju võivad katsed varieeruda isegi näiliselt ühte moodi koostatud katsetes, millised süütemeetodid ja ahju parameetrid lubavad paremat põlemisgaaside kvaliteeti, kus on vähem tervisele ohtlikke peenosakesi.

SUMMARY

Countries increasingly use small residential fireplaces, which use solid fuel. This is done for the purpose of producing hot water, electricity and heat in addition to leisure. These trend, unfortunately, increase particulate matter emissions and most affected are the ones with high population density, where such technologies are used. Particulate matter has a lot of factors that affect human health and that is why it is important to study emissions of a fireplace at different heating modes.

For this, an impactor with one filter has been used, which which one can measure particulate matter of all sizes within some timeframe. In these experiments we investigate different ignition factors and air movement controlling levers affect the formation of airborne particulate matter. Samples have been taken from the flue gas tube and results have been projected one by one. For the fuel we used mostly grey alder, but for comparison, results for burning spruce have been mentioned.

Experimental results show large variability between single parallel experiments, which had been done in about the same conditions. This affects the interpretation of results greatly but allows us to bring forth trends in which way pollutant concentrations move. The highest pollutant concentrations were experiments during the ignition phase. There is a remarkable difference seen between igniting the batch from the top or the bottom. Ignition from the bottom gave on average 1,25 times higher result in comparison with ignition from the top, being 134 and 107 mg/Nm³ accordingly. In addition, ignition with ignition tablets gave the smallest result, being on average 70 mg/Nm³. Experiments with closed grate lever show too much variation to be interpreted correctly.

In the culmination of the fire, where temperature changes relatively little, being close to a stationary state, the particulate matter emissions were several times lower in comparison with experiments done during ignition. This also confirms the theory. Heating of the cold fireplace with open air and grate levers show 1,5-3 times lower results. Heating with the closed grate lever shows the best result and heating with half closed air lever shows the highest being 26 and 60 mg/Nm³ accordingly. Heating with both levers open shows an average particulate emission of 45 mg/Nm³ for alder and 54 mg/Nm³ for spruce, which shows marginal increase in particulate emissions.

Heating an already hot fireplace shows increases in some test, but lower emissions in others. With open levers the emissions grew from 45 to 54 mg/Nm³ and with closed grate lever the emissions grew from 26 to 40 mg/Nm³. However, in experiments with

half closed air lever and burning spruce wood the emissions marginally decreased by 5 mg/Nm³ on average.

Adding 2-4 logs to embers in a fashion so they ignite by themselves show similar results to ignition tests, being 96, 130 and 96 accordingly for adding two, three and four logs and measuring the emissions on the first 10 minutes. The flaming activity, however, was not the same during those 3 test sessions. If taking the sample took almost the entire time it took the 2 added logs to burn, then it took only 1/3 of the time it took 4 logs to burn.

With the experimental results it needs to be said that the technology used shows too much confusion during analysis and hardships in making the tests, because it is not possible to get precise measurements on the fireplace with such high periodicity. The variations in the results from the measuring equipment can not be distinguished from the changes in the tests themselves. That is why it is recommended that more tests are carried out using technologies that allow real time detection of particulate matter. Such as Dekati ELPI+ or Dekati eFilter.

At the same time the collected results form a knowledge base on how much results can vary even between very similarly built and conducted tests and which ignition methods and fireplace parameters allow for cleaner flue gas where the concentration of hazardous particulate matter is lower.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Markus Amann, MEASURES TO ADDRESS AIR POLLUTION FROM SMALL COMBUSTION SOURCES, February 2, 2018
2. Caseiro, A., Bauer, H., Schmidl, C., Pio, C. A., & Puxbaum, H. (2009). Wood burning impact on PM10 in three Austrian regions. *Atmospheric Environment*, 43(13), 2186–2195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.012>
3. Abbey, D. E., Nishino, N., McDONNELL, W. F., Burchette, R. J., Knutsen, S. F., Lawrence Beeson, W., & Yang, J. X. (1999). Long-Term Inhalable Particles and Other Air Pollutants Related to Mortality in Nonsmokers. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 159(2), 373–382. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.159.2.9806020>
4. Villu Vares, Ülo Kask, Peeter Muiste, Tõnu Pihu, Sulev Soosaar, & Gudrun Knutsson. (2005). Biokütuse kasutaja käsiraamat.
5. Dr. Johann Engelbrecht, Dr. Alan Gertler, & Dr. Tony VanCuren. (n.d.). Lake Tahoe Source Attribution Study (LTSAS): Receptor Modeling Study to Determine the Sources of Observed Ambient Particulate Matter in the Lake Tahoe Basin. 52.
6. Zellagui, S., Trouvé, G., Schönnenbeck, C., Zouaoui-Mahzoul, N., & Brilhac, J.-F. (2017). Parametric study on the particulate matter emissions during solid fuel combustion in a drop tube furnace. *Fuel*, 189, 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.104>
7. Rowell, R. (Ed.). (1984). *The Chemistry of Solid Wood* (Vol. 207). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/ba-1984-0207>
8. van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748–3762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
9. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

10. Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2006). More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*, 31(15), 3458–3470. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.008>
11. HEALTH EFFECTS OF PARTICULATE MATTER, Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia, WHO/Europe
12. Chapter 7.3 Particulate matter, WHO/Europe
13. Bhanarkar, A. D., Gavane, A. G., Tajne, D. S., Tamhane, S. M., & Nema, P. (2008). Composition and size distribution of particulates emissions from a coal-fired power plant in India. *Fuel*, 87(10–11), 2095–2101. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.11.001>
14. Fachinger, F., Drewnick, F., Gieré, R., & Borrmann, S. (2017). How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions. *Atmospheric Environment*, 158, 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.027>
15. Markus Amann, MEASURES TO ADDRESS AIR POLLUTION FROM SMALL COMBUSTION SOURCES, February 2, 2018
16. Jan Polacik, Ladislav Šnajdarek, Michal Špilacek, Jiri Pospisil, & Tomas Sitek. (2018). Particulate Matter Produced by Micro-Scale Biomass Combustion in an Oxygen-Lean Atmosphere.
17. Jalava, P. I., Salonen, R. O., Pennanen, A. S., Sillanpää, M., Hälinen, A. I., Happonen, M. S., Hillamo, R., Brunekreef, B., Katsouyanni, K., Sunyer, J., & Hirvonen, M.-R. (2007). Heterogeneities in Inflammatory and Cytotoxic Responses of RAW 264.7 Macrophage Cell Line to Urban Air Coarse, Fine, and Ultrafine Particles From Six European Sampling Campaigns. *Inhalation Toxicology*, 19(3), 213–225. <https://doi.org/10.1080/08958370601067863>
18. Jonathan I. Levy, James K. Hammitt, John d. Spengler, Estimating the Mortality Impacts of Particulate Matter: What Can Be Learned from Between-Study Variability?

19. Osornio-Vargas Alvaro R, Bonner James C, Alfaro-Moreno Ernesto, Martínez Leticia, García-Cuellar Claudia, Ponce-de-León Rosales Sergio, Miranda Javier, & Rosas Irma. (2003). Proinflammatory and cytotoxic effects of Mexico City air pollution particulate matter in vitro are dependent on particle size and composition. *Environmental Health Perspectives*, 111(10), 1289–1293. <https://doi.org/10.1289/ehp.5913>
20. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005.
21. Nõukogu direktiiv 1999/30/EÜ, 22. Aprill 1999, vääveldioksiidi, lämmastikdioksiidi ning lämmastikoksiidide, tahkete osakeste ja plii piirtasemete kohta välisõhus.
22. EESTI STANDARDIKESKUS EVS:ISO 10780:2006.