



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia Instituut

LIIGÕHU MÕJU ÕHUHEITMETE TEKKELE VÄIKEKATELDES

IMPACT OF EXCESS AIR ON THE FORMATION OF AIR EMISSIONS IN SMALL BOILERS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Andres Koppel
/nimi/

Üliõpilaskood: 204221MASM

Juhendaja: Tõnu Pihu, professor
/nimi, amet/

(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.

“26” mai 2022

Autor: /allkirjastatud digitaalselt/

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“26” mai 2022

Juhendaja: /allkirjastatud digitaalselt/

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andres Koppel (sünnikuupäev 12.09.1982)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Liigõhu mõju õhuheitmete tekkele väikekateldes”,

mille juhendaja on professor Tõnu Pihu,

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.

„26” mai 2022

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

TalTech Energiatehnoloogia Instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Andres Koppel, 204221MASM (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: MASM02/18 - Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika
(kood ja nimetus)

Juhendaja(d): professor Tõnu Pihu, +3726203911 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Liigõhu mõju õhuheitmete tekkele väikekateldes

(inglise keeles) Impact of Excess Air on the Formation of Air Emissions in Small Boilers

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida liigõhu mõju õhuheitmete tekkele STI20-Malle, STI20VTP-Pelle ja LUK-35 väikekatelde mudelitel.
2. Määrata katelde kasutegurid erinevatel liigõhurežiimidel kaudse bilansi alusel.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Seadmetega tutvumine ja katsete planeerimine	4.2022
2.	Katsete teostamine ja andmete kogumine	5.2022
3.	Andmete analüüs ja töö vormistamine	5.2022

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "27" mai 2022 a

Üliõpilane: Andres Koppel "26" mai 2022 a
/allkiri/

Juhendaja: Tõnu Pihu "26" mai 2022 a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Eessõna	9
Lühendite ja tähistete loetelu.....	10
Sissejuhatus	11
1. Kütuste põlemine.....	12
1.1 Kütused.....	12
1.1.1 Kütuste koostis	12
1.1.2 Kütuse lendosised ja koks	13
1.1.3 Kütteväärtus.....	13
1.2 Põlemine	14
1.2.1 Gaaskütuse põlemine.....	14
1.2.2 Tahkekütuse põlemine	14
1.2.3 Liigõhutegur	15
1.3 Õhusaaste	15
1.3.1 Lämmastikoksiidid.....	15
1.3.2 Vääveldioksiid.....	16
1.3.3 Süsinikoksiid.....	16
1.3.4 Metaan	16
1.3.5 Lenduvad orgaanilised ühendid	17
1.3.6 Tahkeosakesed	17
2. Katse kirjeldus	18
2.1 Katseobjektid	18
2.1.1 Halupuukatel LUK-35	18
2.1.2 Pelletikatel STI20VTP-Pelle	19
2.1.3 Gaasikatel STI20-Malle	20
2.2 Katseseadmed ja -meetodid.....	21
2.2.1 Gaasiliste saasteainete mõõtmine.....	21
2.2.2 Tahkeosakeste mõõtmine.....	22
2.2.3 Katelde kasutegurite määramine.....	23
2.2.4 Katseplaan ja andmeanalüüs	24
3. Katsete käik ja tulemused.....	25
3.1 Katsed gaasikatlaga STI20-Malle	26
3.2 Katsed pelletikatlaga STI20VTP-Pelle.....	32
3.2.1 Gaasilised õhuheitmed katsetel katlaga STI20VTP-Pelle	33
3.2.2 Tahkeosakesed katsetel katlaga STI20VTP-Pelle.....	36
3.3 Katsed halupuukatlaga LUK-35.....	37
3.3.1 Gaasilised õhuheitmed katsetel LUK-35 katlaga.....	38

3.3.2 Tahked õhuheitmed katsetel katlaga LUK-35	40
3.4 Järeldused	42
3.4.1 Liigõhu mõju lämmastikoksiidide tekkele	42
3.4.2 Liigõhk vingugaasi kontsentratsiooni mõjutajana	42
3.4.3 Metaani esinemine põlemisgaasides liigõhust tingituna	43
3.4.4 Liigõhu roll lenduvate orgaaniliste ühendite tekkimisel	43
3.4.5 Tahkeosakeste kontsentratsiooni sõltumine liigõhust	44
Kokkuvõte	45
Summary	46
Kasutatud kirjanduse loetelu	47
Lisad	48

Jooniste loetelu

Joonis 1.1 Kütuse koostis [1]	13
Joonis 1.2 Gaaskütuse põlemine [3].....	14
Joonis 2.1.3 Katseobjektid (vasakult) LUK-35, STI20VTP-Pelle kütusemahutiga ja STI20-Malle Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katsehallis	20
Joonis 2.1.4 Õhuheitmete mõõtmised Paul Gothe Johnas II kaskaadimpaktori (vasakul) ja Gasmel DX-4000 FTIR spektromeetriga (paremal) Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katsehallis	21
Joonis 3.1 Liigõhu reguleerimine katlal STI20-Malle	26
Joonis 3.2 CO kontsentratsiooni muutus kolmandal katsel katlaga STI20-Malle	26
Joonis 3.3 Gaasikatla STI20-Malle teostatud katsete põlemisprotsesside ühise stabiilse lõigu leidmine (ajavahemik kollasel alal)	27
Joonis 3.4 Lämmastikuühendite kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel.....	28
Joonis 3.5 Vingugaasi (CO) kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	29
Joonis 3.6 Metaani (CH ₄) kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	29
Joonis 3.7 Lenduvate orgaaniliste ühendite (LOÜ) kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	30
Joonis 3.8 Muutused gaasiliste õhuheitmete kontsentratsioonides liigõhust sõltuvalt tulpdiaagrammil	30
Joonis 3.9 Muutused gaasiliste õhuheitmete kontsentratsioonides liigõhust sõltuvalt lineaarsel graafikul kujutatuna	31
Joonis 3.10 Liigõhu reguleerimine katla STI20VTP-Pelle pelletipõletil.....	32
Joonis 3.11 Lämmastikuühendite (NO _x) kontsentratsioonid gaasikatla STI20VTP-Pelle neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	33
Joonis 3.12 Süsinikoksiidi (CO) kontsentratsioonid gaasikatla STI20VTP-Pelle neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel.....	34
Joonis 3.13 Metaani (CH ₄) kontsentratsioonid gaasikatla STI20VTP neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	34
Joonis 3.14 Lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioonid gaasikatla STI20VTP neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	35
Joonis 3.15 Muutused gaasiliste õhuheitmete kontsentratsioonides liigõhust sõltuvalt	36
Joonis 3.16 Tahkeosakeste kontsentratsioon põlemisgaasides katsetel katlaga STI20VTP-Pelle.....	36
Joonis 3.17 Liigõhu reguleerimine halupuukatlal LUK-35.....	37

Joonis 3.18 Lämmastikuühendite kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel.....	38
Joonis 3.19 Vingugaasi (CO) kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	39
Joonis 3.20 Metaani (CH ₄) kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	39
Joonis 3.21 Lenduvate orgaaniliste ühendite (LOÜ) kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel	40
Joonis 3.22 Tahkeosakeste kontsentratsioon põlemisgaasides katsetel katlaga LUK-35	41

Tabelite loetelu

Tabel 3.1 Katsete reaalne ajakava.....	25
Tabel 3.2 Gaasikatla STI20-Malle katsete koondandmed.....	27
Tabel 3.3 Pelletikatla STI20VTP-Pelle katsete tulemused.....	32
Tabel 3.4 Halupuukatla LUK-35 katsete tulemused.....	37

EESSÕNA

Käesolev magistritöö räägib liigõhu mõjust õhuheitmete tekkele kodumajapidamistes kasutatavates väikekateldes. Töös antakse ülevaade kütuste põlemisest ja sellega kaasnevast õhusaastest ning uuritakse kolme katseobjekti näitel põhiliste saasteainete teket kütuse põlemisel erinevatel liigõhurežiimidel. Töö aitab hinnata, kuidas väikekatla kasutaja käitumine võib mõjutada õhuheitmete teket.

Magistritöö teema on valitud professor Alar Konisti algatusel. Tööga seotud katsed on teostatud Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katsehallis professor Tõnu Pihu juhendamisel. Katsete teostamisel oli suureks abiks mehhaanikainsener Madis Saks. Autor tänab südamest nimetatud isikuid osutatud abi eest.

Lühendite ja tähiste loetelu

α – kreeka täht alfa, liigõhutehuri tähis

$^{\circ}\text{C}$ – temperatuuri mõõtühik kraad Celsiuse skaala järgi

CH_4 – metaani keemiline valem

CO – vingugaasi ehk süsinikoksiidi keemiline valem

CO_2 – süsihappegaasi ehk süsinikdioksiidi keemiline valem

H_2 – vesiniku keemiline valem

H_2S – divesinikdisulfiidi keemiline valem

K – Pitot' toru tegur

LOÜ – lenduvad orgaanilised ühendid, lühend

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ – adsorbeeritud vee mass kilogrammides

M_s – gaasi molaarmass

NO_x – lämmastikoksiidide ühine tähis

P_e – absoluutne gaasirõhk kilopaskalites;

PM-10 – atmosfääriõhus olevad tahked osakesed, mis läbivad sisendit läbimõõduga 10 mikromeetrit 50 protsendilise efektiivsusega

PM-2,5 - atmosfääriõhus olevad tahked osakesed, mis läbivad sisendit läbimõõduga 2,5 mikromeetrit 50 protsendilise efektiivsusega

PM-sum – kõik atmosfääriõhus olevad tahkeosakesed kokku

T_s – põlemisgaasi keskmine temperatuur kelvinites

V_{wa} – gaasiproovi maht kuupmeetrites.

Δp – keskmine Pitot' toru rõhuvahe kilopaskalites

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – vee tihedus

SISSEJUHATUS

Õhuheitmete teema on töö kirjutamise ajal väga aktuaalne maailmas parasjagu toimuvate pööraste sündmuste tõttu. Ühest küljest soovitakse loobuda fossiilkütustest, teisest küljest ei leita neile küllalt kiiresti alternatiive ning kolmandaks on süvenemas energiakriis, mis esialgu väljendub energiakandjate kiires hinnatõusus ja hiljem ka varustuskindluses. Hirm imporditavate energiakandjate hinnatõusu ja kättesaadavuse pärast sunnib kodukasutajaid paratamatult otsima kohalikke lahendusi, milleks võivad olla näiteks pellet- ja halupuitkütus.

Käesolev magistritöö uurib liigõhu mõju õhuheitmete tekkele kodumajapidamistes kasutatavates väikekateldes. Liigõhk on teatavasti üks vähestest parameetritest, mida väikekatla kasutaja suuremal või vähemal määral muuta saab. Katla liigõhurežiimi muutmine avaldab teatavasti mõju põlemisprotsessile, mis väljendub ennekõike põlemisgaaside koostise muutumises. Probleem seisneb selles, et põlemisgaaside koostisse kuulub tavaliselt keskkonnale ja inimtervisele kahjulikke ühendeid ning nende kontsentratsiooni suurenemine väikekatla kasutaja käitumise tagajärjel on äärmiselt kahetsusväärne.

Liigõhu mõju uurimiseks on teostatud põlemiskatsed kolme väikekatlaga erinevatel liigõhurežiimidel ning mõõdetud gaasiliste saasteainete ja tahkeosakeste kontsentratsioone põlemisgaasides. Kõrvaleesmärgina on arvatatud katelde kasutegurid kaudse bilansi alusel. Töö lisandväärtuseks võib lugeda juhuslikult avastatud seost õhuheitmete kontsentratsiooni, liigõhuteguri ja halupuitkütuse liigi vahel.

Magistritöö on jagatud kolmeks peatükiks. Esimeses peatükis viiakse lugeja kurssi kütuste põlemisega. Antakse lühiülevaade kütuste liigitusest, koostisest, erinevat liiki kütuste põlemisest ning sellest tekkivast õhusaastest. Kirjeldatakse töös uuritavaid saasteaineid, mida võib ühtlasi lugeda ka probleemi püstitamiseks.

Teises peatükis tutvustatakse katseobjekte, -seadmeid ja -meetodeid. Lugeja viiakse kurssi nii gaasiliste kui ka tahkete saasteainete mõõtmise ja katseandmete analüüsimisega. Põhjalikumalt kirjeldatakse Fourier' teisendusega infraspetskoopiaal põhinevat gaasiliste saasteainete määramismeetodit ning gravimeetrilist meetodit tahkeosakeste mõõtmiseks kaskaadimpaktoriga.

Kolmandas peatükis antakse ülevaade katsete tulemustest, võrreldakse neid ja tehakse järeldused. Magistritöö kogumaht on 73 lehekülge, sealhulgas 4 tabelit, 26 joonist ning 9 lisa. Kasutatud kirjanduse loetelus on 16 allikat.

1. KÜTUSTE PÕLEMINE

1.1 Kütused

Kütuseks nimetatakse ainet, mille keemilisel ühinemisel hapendajaga eraldub suurel hulgal soojust. Samas peab selline aine täitma lisaks veel mitmeid tingimusi. Kütuseks nimetatava aine varu peab olema küllaldane ja hea kättesaadavusega. Reageerimine hapendajaga peab toimuma kiiresti ja suure kasuteguriga ning selle tulemusel tekkinud saadused ei tohi saastada ohtlikult keskkonda. Sellistele tingimustele vastavad orgaanilise päritoluga põlevmaavarad ja bioloogilise päritoluga kütteained [1], [2].

Kütused jagatakse agregaatoleku järgi gaas-, vedel- ja tahkekütusteks, samas võivad nad olla kas looduslikud või tehiskütused. Looduslikud tahkekütused on näiteks puit, turvas ja põlevkivi, tahke tehiskütus aga koks. Looduslik vedelkütus on nafta, tehisvedelkütused aga näiteks kerge kütteõli, bensiin, põlevkiviõli. Looduslik gaaskütus on maagaas, tehiskaasideks on näiteks generaatorgaas, põlevkivigaas jne [3].

1.1.1 Kütuste koostis

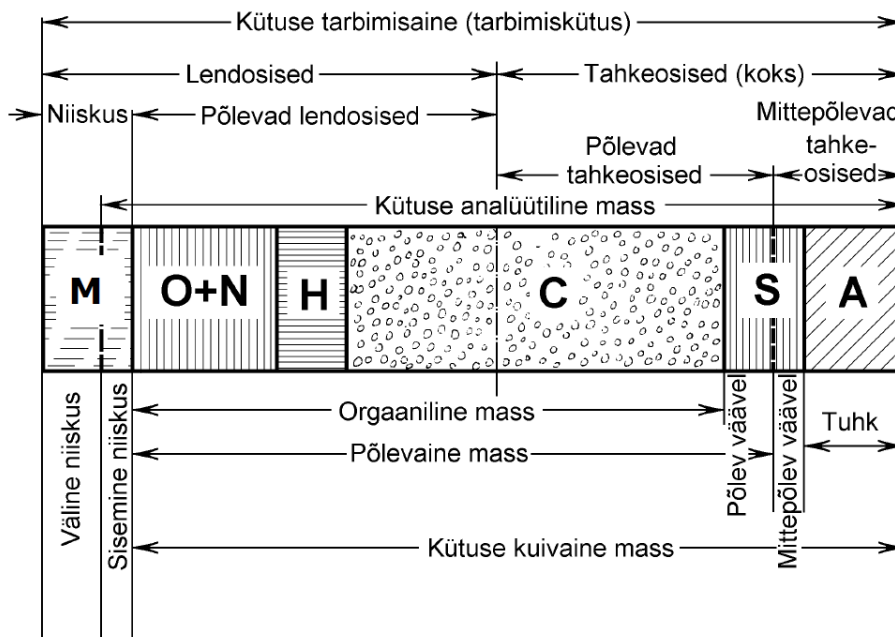
Tahkekütus koosneb põlevosast, mineraalosast ja niiskusest. Vedelkütuses võib olla samuti mõningal määral mineraallisandeid ja vett, kuid üldjuhul sedavõrd vähe, et nendega ei arvestata [3]. Tarbijale saabuvat kütust nimetatakse tarbimiskütuseks [1].

Kütuse põlevosa moodustavad süsiniku, vesiniku, hapniku, lämmastiku ja väävli kõrgmolekulaarsed ühendid. Leidub ka kütuseid, mille orgaaniline osa võib sisaldada vähesel määral leelismetalle ja kloori. Peamised komponendid kütuse põlevaines on siiski süsinik ja vesinik, põlevkivis ka hapnik. Hapnik ja lämmastik on ballastiks kütuses, mis vähendab põlevate elementide hulka ning ühtlasi ka kütuse põlemissoojust. Samuti on ebasoovitavaks komponendiks kütuses väävel, mis võib seal esineda kas orgaanilisel, püriitsel või sulfaatsel kujul. Enamasti toimib väävel põletusseadmele kahjustavalt [3].

Tahked kütused on võimelised endaga siduma niiskust. Niiskus on kütuse kahjulik lisand, mis põhjustab lisakulusid nii transpordil kui ka ladustamisel. Niiskuse suurenedes väheneb tarbimiskütuse põlemisel vabanev soojushulk, mis on tingitud nii põlevaine vähenemisest kui ka niiskuse aurustamiseks kulutatud soojusest [2]. Seega alaneb kütuse kütteväärtus, tõuseb kastepunkt ja suureneb põlemisgaaside hulk [3].

Kütuse mineraalosaks nimetatakse kütuses sisalduvat algainet, millest koldeprotsessis tekib tuhk [2]. Samas võib sinna lisanduda mõningal määral ka ühendeid orgaanilisest ainest komplitseeritud keemiliste protsesside tagajärjel, mistõttu ei saa tuhka

samastada kütuse mineraalosa ei koostise ega hulga poolest [3]. Kütuse täpsemast koostisest annab suurepärase ülevaate Joonis 1.1.



Joonis 1.1 Kütuse koostis [1]

1.1.2 Kütuse lendosised ja koks

Kütuse lendosised on gaasilised produktid, mis eralduvad kütuse termilisel lagunemisel. Lendosised eralduvad põhiliselt CO_2 , CO , H_2 , CH_4 ja teiste süsivesinikena. Lendosiste hulgas võib vähesel määral olla ka väävelvesinikku (H_2S) ja ka teisi väävliühendeid. Lendosiste eraldumisel järelejäänud tahke mass on koks, mis koosneb põhiliselt süsinikust [2]. Kütuse termilise lagunemise algustemperatuur on tema orgaanilise osa stabiilsuse üks näitajatest. Sellele avaldab mõju hapniku hulk orgaanilises aines. Mida suurem on kütuse hapnikusisaldus, seda madalam on termilise lagunemise algustemperatuur. Puitkütusel on see näiteks vahemikus $100\text{...}160\text{ }^\circ\text{C}$ [3].

1.1.3 Kütteväärtus

Kütuse kütteväärtus on soojushulk, mis eralduv 1 kg tahke- ja vedelkütuse või normaalkuupmeetri gaaskütuse täielikul põlemisel. Tavaliselt määratakse see laboratoorselt kalorimeetrilises pommis. Kui põlemisel tekivad veeaur kondenseerub ja vabastab ka kondenseerumissoojuse, siis on eralduva soojushulga puhul tegemist ülemise kütteväärtusega. Kui põlemisel tekivad veeaur ei kondenseeru, siis eralduv soojushulk on väiksem ja seda nimetatakse alumiseks kütteväärtuseks. [1]. Tavaliselt on põlemistehnilistest seadmetest lahkuva põlemisgaasi temperatuur kõrgem selles sisalduva veeauru kondenseerumistemperatuurist (kastepunktist), siis rakendatakse

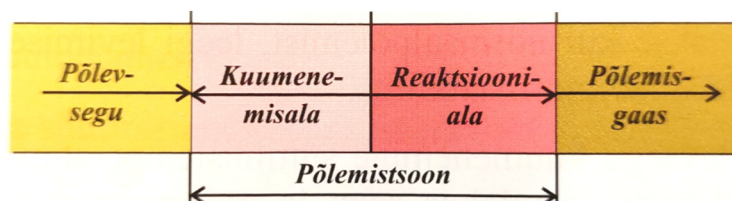
praktikas peamiselt alumist kütteväärtust. Samas on ka seadmeid, kus on võetud kasutusele põlemisgaasi veeauru kondenseerumissoojus, siis sel juhul tuleb arvestada ülemise kütteväärtusega [3].

1.2 Põlemine

Põlemine on füüsikalise-keemiline nähtus, mille jooksul kütuse osised ühinevad hapnikuga. Sisuliselt on tegemist kütuse orgaanilise osa ühendite ja hapniku vahel kulgevate reaktsioonidega, kus väljunditeks on põlemisgaas ja soojus. Peamised keemilised elemendid, mis reageerivad hapnikuga põlemisprotsessi käigus, on süsinik ja vesinik. Põlemine on ajas kulgev protsess [3].

1.2.1 Gaaskütuse põlemine

Gaaskütus süttib ainult hapendajaga teatud kontsentratsioonilises vahekorras olles. Gaasi ja õhu segu süttib juhul kui gaasisaldus segus on alumise ja ülemise süttimispiiri vahel. Mida laiem on see vahemik, seda tõenäolisem on süttimisohtliku segu tekkimine. Erinevate gaaside süttimispiirid on väga erinevad: vesinikul 4...75 mahuprotsenti, butaanil aga 1,9...8,5% [2]. Gaaskütuse põlemist on kujutatud Joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Gaaskütuse põlemine [3]

Põlemistsoon jagab süsteemi kaheks osaks – madala temperatuuriga põlevsegu ja kõrge temperatuuriga põlemisgaas. Põlemistsoonis tõuseb järsult temperatuur. Ühtlasi langeb seal põlevkomponentide ja hapniku kontsentratsioon, kuid suureneb põlemissaaduste kogus. Temperatuuri tõus kiirendab põlemisreaktsioone, kuid samaaegne hapniku kontsentratsiooni langus segus pärsib põlemiskiirust [3].

1.2.2 Tahkekütuse põlemine

Tahkete kütuste põlemisel toimuvad põlemisprotsessid nii kolderestil (lendosa põlemine) kui ka kolderuumis (koksi põlemine). Esmalt toimub tahkekütuse osakese kuumenemine ja kuivamine umbes 100 °C juures [2]. Kuumenemiskiirus sõltub osakese mõõtmetest, soojusfüüsikalistest omadustest, väliskeskonna temperatuurist, soojusülekanne liigist ja osakesesisestest soojusefektidest. Osake kuumeneb

ümbritsevast keskkonnast tema välispinnale konvektiivselt ja kiirguslikult ülekantavast soojusest, seejuures on alati ülekaalus konvektiivne soojusülekanne [3]. Teatud aja möödudes hakkab kütuse orgaaniline osa kuumenemisel lagunema ja lendosa eralduma. Kütuseosakest ümbritseb lendosa kiht, kuhu difundeerub ümbritsevast keskkonnast hapnik. Tekkinud segu süttib, osakest ümbritseb leek ning soojusülekanne leegilt osakese välispinnale tagab protsessi pidevuse [1]. Peale suurema osa lendosa ära põlemist kandub põlemisfront üle moodustunud koksi pinnale. Algab koksi põlemine, mis loetletud põlemisstaadiumitest on kõige pikem [1].

1.2.3 Liigõhutegur

Teoreetiliselt vajaliku õhuhulgaga ei ole tegelikult võimalik tagada kütuse täielikku põlemist. Kütuse ja õhu (hapniku) segu põlemisaeg teoreetilises vahekorras oleks väga pikk ja selle tagamine nõuaks suuremõõtmelisi põletusseadmeid, samuti on keeruline saada õhu ja kütuse ühtlast segunemist kogu põlemiskambri ulatuses. Seega on kütuse täielikuks põlemiseks vaja põlemiskambrisse anda liigõhku. Kütuse põlemiseks tegelikult kasutatava õhuhulga suhet teoreetilise õhuhulka nimetatakse liigõhuteguriks. Kütuse ja õhu teoreetilise vahekorra puhul $\alpha=1$ [1].

1.3 Õhusaaste

Õhk koosneb peamiselt lämmastikust (78,084 %), hapnikust (20,948 %) ja argoonist (0,934 %), mis moodustavad üle 99,9 % atmosfääri massist ning nende osakaalude suhe on küllaltki püsiv [4]. Peale selle paiskub nii looduslikest kui ka inimtekkelistest allikatest atmosfääri tuhandeid muid gaase ja osakesi, sealhulgas tahma ja metalle. Kõiki õhus leiduvaid aineid ei peeta saasteaineteks. Õhusaasteks nimetatakse üldjuhul teatud saasteainete esinemist atmosfääris koguses, mis kahjustab inimeste tervist, keskkonda ja meie kultuuripärandit (ehitisi, mälestisi ja materjale) [5].

Suurem osa õhuheitmeid (näiteks metaan ja süsinikoksiid) kuulub õhu lisandgaaside hulka, kuid vääveldioksiid ja lämmastikoksiid on primaarsed saasteained õhus ehk satuvad õhku otse saasteallikatest. Lisaks gaasidele esinevad saasteained õhus ka tahkete osakestena [4].

1.3.1 Lämmastikoksiidid

Lämmastikoksiidid (NO_x) on ühisnimetus lämmastikoksiidile (NO) ja lämmastikdioksiidile (NO_2). Enamus inimtekkelisest lämmastikdioksiidist atmosfääris on moodustunud lämmastikoksiidi reageerimisel osooniga (O_3) või mõne teise oksüdandiga. Olemuselt on lämmastikdioksiid punakaspruuni värvusega vees lahustuv gaas ja ühtlasi ka tugev oksüdant. Lämmastikuühendite õhuemissioonid kütuste põlemisel on temperatuurist

sõltuvad. Mida kõrgem temperatuur, seda rohkem lämmastikuühendite heitmeid [6]. Põhiliselt tekib põlemisel lämmastikoksiidi (NO) kuni õhust saadaoleva hapniku limiidini temperatuuril üle 1300 °C. Temperatuuril alla 760 °C tekib seda tunduvalt madalamates kontsentratsioonides [7] või ei teki üldse. Lämmastikuühendid põhjustavad looduses veekogude eutrofeerumist ning magevee ja muldade hapestumist, mõjutades niimoodi neist ökosüsteemidest sõltuvaid liike [5].

1.3.2 Vääveldioksiid

Vääveldioksiid (SO₂) on värvusetu vees lahustuv gaas, mis reageerib erinevate õhus lendlevate tahkeosakeste pinnal. Atmosfääris võib sellest keemiliste reaktsioonide tulemusena moodustuda väävelhape (H₂SO₄), mis on üks happevihmade koostisosa [6]. Vääveldioksiid vallandub väävlit sisaldavate kütuste põlemisel, mõnikord paiskavad seda ühendit atmosfääri ka vulkaanid [5]. Vääveldioksiidi kõrged kontsentratsioonid võivad tõsta inimeste hingamisteede haigestumise riski. Samuti kahjustavad happevihmad hoonete kivimüüritiste ja metallosade korrosiooni [6].

1.3.3 Süsinikoksiid

Süsinikoksiid (CO) tekib nii fossiilsete kui ka orgaaniliste kütuste mittetäielikul põlemisel. Sellel värvusetul ja lõhnatul gaasil on omadus ühineda elusorganismide veres hemoglobiiniga hapniku asemel. Sellisel juhul on tagajärjeks organismi hapnikunälg ja mitmed muud tõsised terviseprobleemid [6]. Troposfääri tingimustes tekib süsinikoksiidi ja süsivesinike oksüdeerumisel osoon (O₃) eeldusel, et õhus on ka lämmastikoksiide. Samas, väga puhtas õhus, kus lämmastikoksiide on vähe, kulub osooni süsinikoksiidi hapendamiseks. Osoon omakorda on tugeva oksüdeerijana troposfäärikeemia võtmekomponent, sest kõik õhku paisatud ühendid eralduvad atmosfäärist kas sadenedes või teisteks ühenditeks hapendudes [8].

1.3.4 Metaan

Metaan (CH₄) on kasvuhoonegaas, mille heide on pärit inimtegevusest. Pärast atmosfääri paiskamist on metaani eluiga 12 aastat, mis on aga piisav, et võimaldada gaasil kanduda teistesse piirkondadesse. Metaan aitab moodustada troposfääriosooni, mis on Euroopa inimtervist ja keskkonda kahjustav oluline saasteaine [5]. Olles gaaskütuse (maagaasi) peamine komponent (75...98%) [2], satub seda atmosfääri nii põlemisel kui ka gaaskütuse torustranspordil lekete korral.

1.3.5 Lenduvad orgaanilised ühendid

Lenduvad orgaanilised ühendid (LOÜ) on lai valik keemilisi ühendeid nagu näiteks aromaatsed ja küllastunud süsivesinikud. Neid satub atmosfääri transpordist, tööstuslikest protsessidest, aga ka looduslikest allikatest nagu okasmetsad [6]. Lämmastikuühendite ja vääveldioksiidiga reageerides põhjustavad lenduvad orgaanilised ühendid episoodiliselt suurenenud osoonisaldust [8]. Osooni kahjulikku mõju on kirjeldatud üle-eelmises alapeatüki punktis.

1.3.6 Tahkeosakesed

Tahkeosakesed on üldmõiste, mis hõlmab orgaaniliste ja anorgaaniliste ainete keerulist segu atmosfääris nii vedelate kui ka tahkete ainetena, mis eralduvad sealt kuiv- ja märgsadestusprotsessidega. Suur tahkeosakeste (näiteks tahm koos vääveldioksiidiga) kontsentratsioon sissehingatavas õhus võib põhjustada hingamisteede haigusi, ebamugavustunnet ja häiritust [6]. Sõltuvalt koostisest võivad tahkeosakesed kohalikku ja globaalset kliimat jahedamaks või soojemaks muuta. Tumedamad tahkeosakesed (näiteks puhas süsinik) neelavad endasse päikesevalguses olevat infrapunakiirgust ja on seetõttu soojendava toimega. Lämmastiku- ja väävliühendeid sisaldavad heledamad tahkeosakesed käituvad aga väikeste peeglitenä, mis peegeldavad päikesevalguse tagasi ja toovad sedasi kaasa kliima jahenemise [5]. Suuruse järgi eristatakse PM-10 ja PM-2,5 tahkeosakesi. Need on osakesed, mis läbivad osakese suuruse suhtes selektiivse sisendi, mille efektiivsus vastavalt 10 ja 2,5 µm aerodünaamilise diameetri juures on 50%. PM-sum – kõik õhus sisalduvad osakesed kokku [4].

2. KATSE KIRJELDUS

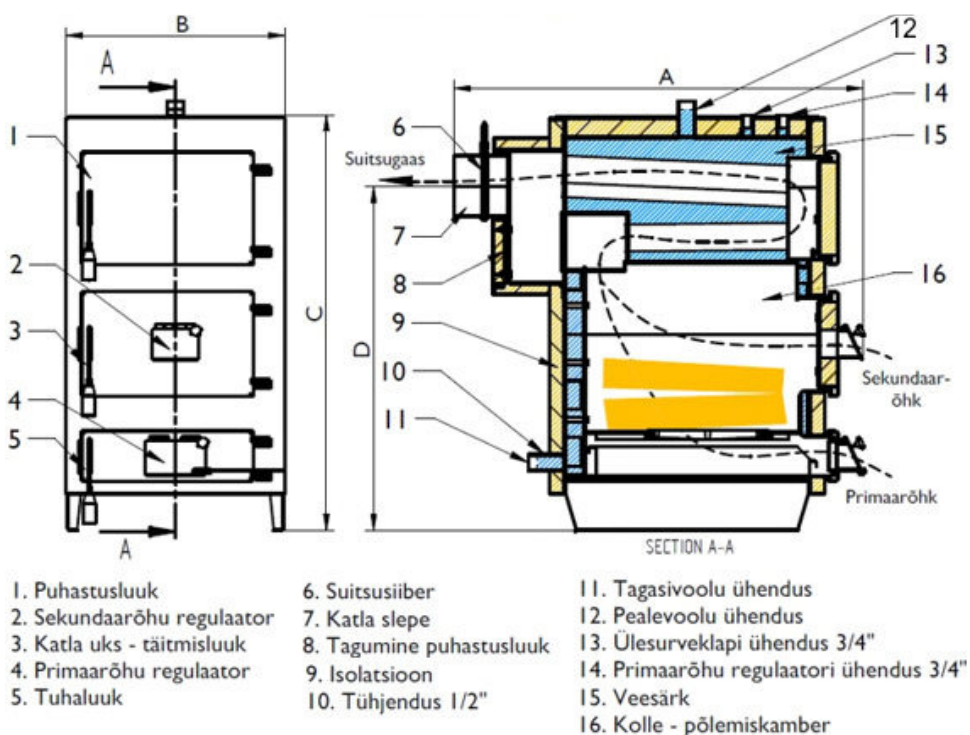
Liigõhu mõju hindamiseks õhuheitmete tekkele kütuste põlemisel väikekateldes on läbi viidud reaalsed katsed ning analüüsitud nende tulemusi. Katsete läbiviimiseks valiti katseobjektid ja -seadmed ning meetodid.

2.1 Katseobjektid

Katseobjektideks on valitud Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katsehallas paiknevad väikekatlad LUK-35, STI20VTP-Pelle ja STI20-Malle. Katlad on ühendatud hoone küttesüsteemiga ning varustatud erinevate mõõteriistade ja vajalike abiseadmetega.

2.1.1 Halupuukatel LUK-35

LUK-35 katel kujutab endast 5 mm teraslehest valmistatud koldega ja nelja horisontaalse tõmmatud terastorst suitsukäiguga katelseadet. Lisana on võimalik paigaldada kõnealusele katlale tahkekütte- või õlipõleti, tuhaärastusseade ja suitsugaaside turbulaatorid. Katla nimivõimsus on 35 kW, kasutegur halupuudega kütmisel kuni 83%, puidupelletitega aga kuni 90% [9].

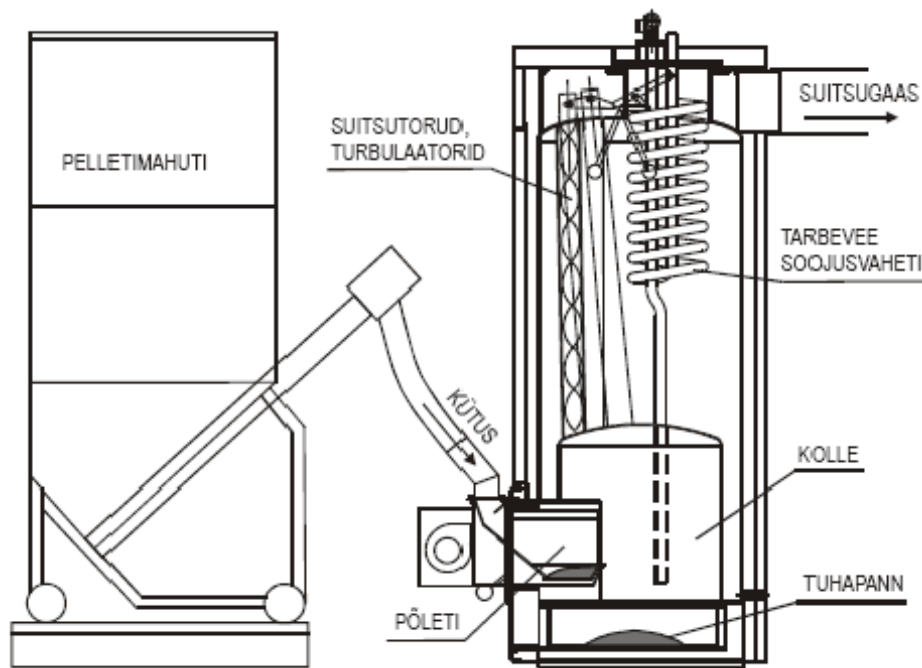


Joonis 2.1 Halupuukatla LUK-35 põhimõtteskeem [9]

Katla nimesildil on lisaks võimsusele toodud ka töö rõhk 2,0 bar, töötemperatuur 95 °C, vee maht 150 liitrit, mõõtmed 1170x1250x620 mm ja kaal 330 kg. Katel kannab järjekorranumbrit 1750 ja valmimisajaks on 01.2015. Tootjaks on Rapla Metall AS.

2.1.2 Pelletikatel STI20VTP-Pelle

Katel STI20VTP-Pelle (Joonis 2.2) on mõeldud individuaalelamute, köetava pinnaga 150...300 m², kütmiseks. Põleti vahetamisel saab kütusena kasutada ka kerget kütteõli ja maagaasi. Katel on läbinud katsetestid Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituudis ja omab vastavat tunnistust [10].



Joonis 2.2 Pelletikatel STI20VTP-Pelle koos mahuti, etteandeseadme ja põletiga [11]

Katla nimesildil on märgitud suurim lubatav töö rõhk 2,5 bar, vee temperatuur 95 °C, vee maht 165 liitrit ja nimivõimsus 30 kW. Katel kannab seerianumbrit 870 ja tema valmistajaks on VMT Tehased AS.

Katlale STI20VTP-Pelle on paigaldatud Pelltech PV 20a pelletipõleti, milles tohib kasutada ainult 6 või 8 mm läbimõõduga Premium klassi puitpelletteid. Välistigu transpordib pelletid mahutist põletisse. Põleti juhtimisplakk reguleerib ja jälgib põlemisprotsessi, alustab ja lõpetab selle vastavalt temperatuurile. Pelletite süütamine toimub kiirelt elektrilise õhukuumutajaga [12].

2.1.3 Gaasikatel STI20-Malle

Katel STI20-Malle on samuti välja töötatud kunagises Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituudis, valmistajaks on VMT Tehased AS. Ehituselt sarnaneb katel Malle eelnevas alapeatüki punktis kirjeldatud Pellega (Joonis 2.2). Katel on valmistatud terasest ümarelementidest kokkukeevitatuna ja sobib väiksema ja keskmise suurusega eramu kütteks ning sooja tarbevee saamiseks. Tarbevee ettevalmistamiseks on katla veemahtu paigaldatud vasest spiraalne küttepind. Katla kolle on kujundatud nn tupikkoldena, mis võimaldab intensiivistada soojusülekannet seoses põlemisgaasi pikema teekonnaga ja suurendada koldekeskkonna turbulentsust. Katla töö rõhk on 2 bar, maksimaalne väljuva vee temperatuur 90 °C, katla veemaht 0,125 m³ ning katla tühi mass 140 kg [13].

Mõlemad katlad on konstrueeritud töötama nii kerge kütteõli, maagaasi kui ka puidupelletite põletiga. Ette on nähtud ka vajadusel võimalus kuni 6 kW elektriküttekehade paigaldamiseks [13]. Antud juhul on katlale STI20-Malle paigaldatud Oilon Junior GF1 gaasipõleti, mille nimesildil on ära toodud ka võimsus 10...19 kW ning valmistamise aasta 1996. Välisilme osas on katelde Malle ja Pelle teiseks suurimaks erinevuseks juhtpaneel (Joonis 2.3), mis Pallel on digitaalne, Mallel on aga vanaaegsed osutitega näidikud ja keeratavad nupud.



Joonis 2.1.3 Katseobjektid (vasakult) LUK-35, STI20VTP-Pelle kütusemahutiga ja STI20-Malle Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katsehallis

2.2 Katseseadmed ja -meetodid

2.2.1 Gaasiliste saasteainete mõõtmine

Gaasiliste saasteainete määramiseks kasutatakse mitmeid meetodeid, alates UV-fluorestsentsi ja lõpetades NMHC- leekionisatsiooniga [4]. Käesolevas töös on kasutatud gaasiliste saasteainete mõõtmiseks Fourier' teisendusega infrapunaspetskoopiaal põhinevat meetodit ja seadmeid. Infrapunakiir juhitakse läbi gaasiproovi detektorisse. Seejärel võrreldakse detektori signaali signaaliga puhtal taustal. Enamik molekule neelab infrapunakiirgust ja neeldumine toimub iseloomuliku ja reprodutseeritava mustriga. Infrapunaspetsker mõõdab põhilisi molekulaarseid omadusi ja ühendit saab tuvastada ainult selle infrapunaspetskri järgi. Teatud piirides on infrapuna neeldumise ja ühendi kontsentratsiooni vahel lineaarne seos. Kui see sagedusest sõltuv seos (neelduvus) on teada (mõõdetud), saab seda kasutada ühendi kontsentratsiooni määramiseks proovisegus [14]. Katsetel kasutati Gaset DX-4000 FTIR spektromeetrit (Joonis 2.4).



Joonis 2.1.4 Õhuheitmete mõõtmised Paul Gothe Johnas II kaskaadimpaktori (vasakul) ja Gaset DX-4000 FTIR spektromeetriga (paremal) Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katsehallis

Gaasiliste saasteainete kontsentratsioonide määramiseks asetati spektromeetri sond katseobjekti gaasikanalisse ehk suitsukäiku (Joonisel 2.4 vasakul ülal). Sondist edasi liikusid põlemisgaasid proovi ettevalmistamise üksusesse ning seejärel analüüsiseadmesse (kollane aparaat Joonisel 2.4). Spetsiaalne arvutitarkvara salvestas analüüsiseadmest saadud andmed.

2.2.2 Tahkeosakeste mõõtmine

Tahkeosakeste mõõtmiseks on lihtsaim gravimeetriline meetod. Osakesed kogutakse filtrile, mis kaalutakse enne ja pärast proovivõtmist. Teades läbi filtri imetud õhu ruumala, saab arvutada tahkeosakeste kontsentratsiooni [4]. Nimetatud meetod on määratletud standardis EVS-EN 13284-1:2017 [15] ning katseseadmena kasutati Paul Gothe GmbH poolt toodetud Johnas II kaskaadimpaktorit, mis kujutab endast manuaalset isokineetilisel proovivõtul põhinevat mõõtesüsteemi PM-sum, PM-10 ja PM-2,5 osakeste mõõtmiseks. Gaasi pumbatakse vaakumpumbaga läbi jahuti, kahe kuivatuskolonni, voolumeetri ja gaasikella. Gaasi jahutamine toimub esimese kuivatuskolonni ja vasest spiraalitoru ümber oleva veesärgiga. Gaasi niiskus absorbeeritakse kuivatuskolonnides granulaarse silikageeliga. Kirjeldatud seadmed on kujutatud eelmises alapeatüki punktis Joonisel 2.4.

Proovivõtmisele eelneb alati staatilise ja dünaamiliste rõhkude mõõtmine gaasikanalis, milleks kasutati TSI DP-Calc mikromanomeetrit koos S-tüüpi Pitot' toruga. Seejärel on võimalik arvutada põlemisgaaside keskmine voolukiirus (valem 2.1) [15].

$$\bar{v} = KC \sqrt{\frac{T_s \Delta \bar{p}}{P_e M_s}} \quad (2.1)$$

kus C – 129 (m/s) [kg/(kmol·K)]^{0,5};

T_s – põlemisgaasi keskmine temperatuur kelvinites;

M_s – gaasi molaarmass, mis loetakse võrdseks väärtusega 29 kg/kmol;

K – Pitot' toru tegur, antud juhul standardi järgi 0,84;

P_e – absoluutne gaasirõhk kilopaskalites;

Δp – keskmine Pitot' toru rõhuvähe kilopaskalites.

Põlemisgaaside temperatuuri mõõtmiseks kasutati

Tahkeosakeste mõõtmiste protokollides on arvutatud põlemisgaaside niiskus valemiga (2.2) [2]

$$w = \frac{\frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}}{V_{wa} + \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

kus m_{H_2O} – adsorbeeritud vee mass kilogrammides;

ρ_{H_2O} – vee tihedus 0,8045 kg/m³;

V_{wa} – gaasiproovi maht kuupmeetrites.

Katse jooksul adsorbeeritud vee mass on saadud kuivatuskolonnide kaalumisel enne ja pärast katset laboratoorse kaaluga Mettler-Toledo PB 8001. Tahkeosakeste kontsentratsioon on arvatud valemiga (2.3)

$$C_{wn} = \frac{m_t}{V_{wa} \cdot \frac{273}{273 + T_a} \cdot \frac{P_b}{101,3}} \quad (2.3)$$

kus V_{wa} – gaasiproovi maht;

m_t – filtrile kogunenud tahkeosakeste mass;

T_a – gaasikella temperatuur;

P_b – õhurõhk kilopaskalites.

Filtrile kogunenud tahkeosakeste mass on saadud kaalumise teel analüütilise kaaluga Precisa XM 60. Katsetel kasutati Munktell Microfibre MK 360 kvartskiust filtreid.

2.2.3 Katelde kasutegurite määramine

Katelde kasutegurid on arvatud kaudse bilansi alusel vastavalt standardile EN 12953-11, arvestades ka mittetäielikku põlemist [16]. Arvutamiseks on kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli teadlaste O. Järvi ja T. Parve loodud spetsiaalset tarkvara. Kasuteguri arvutusteks vajalikud tahkekütuste elementaaranalüüs, kütteväärtuse, niiskuse tühisisaldus ja tuha põlemata osa määramine on teostatud Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katselaboris, tulemused on toodud Lisas 1. Gaaskütuse puhul on selleks vajalikud andmed võetud Elering AS-i poolt väljastatud maagaasi kvaliteeditunnistusel (Lisa 2). Katsetel kulutatud gaaskütuse kogused on mõõdetud statsionaarse gaasiloenduriga Honeywell BK-G2. Katseobjektide väljastatud soojus mõõdeti statsionaarsete soojusarvestitega Kamstrup DK-0200-MI004-031.

2.2.4 Katseplaan ja andmeanalüüs

Et uurida liigõhu mõju õhuheitmete tekkele ja katla kasutegurile, planeeriti iga katseobjektiga vähemalt kolm põlemiskatset erineva liigõhurežiimiga: maksimaalse, keskmise ja minimaalsega. Lisaks oli ette nähtud ka vähemalt üks katse muudetava liigõhurežiimiga. Katsetest eeldati, et saasteainete kontsentratsioonid põlemisgaasides on erinevad koldesse antavast liigõhust sõltuvalt. Selle väljaselgitamiseks võrreldi saasteainete kontsentratsioone kolme erineva liigõhurežiimiga põlemisprotsessi ühisel stabiilsel ajavahemikul (lõigul) sõltuvalt. Põlemisprotsessi stabiilseks lõiguks loeti ajavahemikku, mil põlemisgaasides sisalduva veeauru kontsentratsioon enam oluliselt ei muutunud. Põlemisaja alguseks on loetud hetke, kus süsihappegaasi kontsentratsioon põlemisgaasides järsult suureneb ning hapniku kontsentratsioon järsult langeb. Põlemisaja lõpuks on loetud hetke, kus kirjeldatud nähtused toimuvad vastupidiselt. Põlemisaeg on antud andmetabelites 20 sekundilise intervalliga nullist alates, mis vastab gaasianalüsaatori (FTIR spektromeetri) proovivõtu sagedusele. Arvutades iga katse vaatlusalusele lõigule liigõhutegurit, saab moodustada graafiku või tulpdiagrammi, mis kujutab erinevate õhuheitmete kontsentratsioonide muutusi ajas ja liigõhust sõltuvalt. Liigõhutegur on arvutatud valemiga (2.4) [3]

$$\alpha = \frac{20,9}{20,9 - O_2} \quad (2.4)$$

kus O_2 – hapniku protsent põlemisgaasides;

20,9 – hapniku protsent põlemisõhus.

Muutuva liigõhurežiimiga katsete tulemuseks oodati märgatavaid muutusi vaadeldavate saasteainete kontsentratsioonides katse ajal põlemiseks vajaliku õhuhulga järkjärgulisel muutumisel. Hilisema andmetöötluse käigus eraldati tabelandmetest erineva liigõhurežiimiga lõigud ja arvutati igale lõigule keskmine liigõhutegur. Seejärel kujutati vaatlusaluste saasteainete kontsentratsioonide muutused graafikul liigõhutegurist sõltuvalt.

3. KATSETE KÄIK JA TULEMUSED

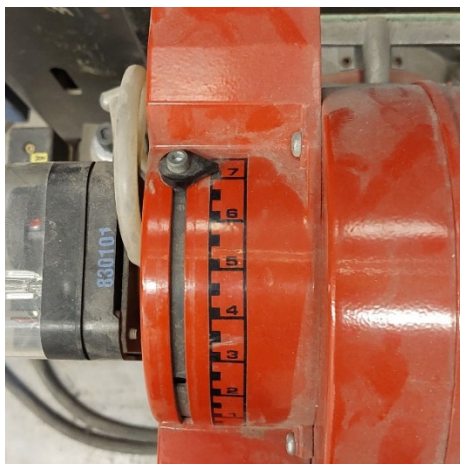
Katsed toimusid Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katsehällis ajavahemikul 06.04.2022...03.05.2022. Katsete toimumise kuupäevad ei olnud pikemat aega ette määratud, vaid kujunesid jooksvalt, vastavalt katseadmete hõivatusele ja üldisele hetkeolukorrale. Täpne ülevaade katsete toimumistest ja uuritavatest parameetritest on toodud Tabelis 3.1. Etteruttavalt peab siinkohal märkima, et väveldioksiidi (SO₂) esines katsetel ainult müratasemel või üldse mitte ning seetõttu seda käesolevas töös rohkem ei kajastata.

Tabel 3.1 Katsete reaalne ajakava

Kuupäev	Katel	Liigõhu režiim	Uuritavad parameetrid			
			Suitsugaaside koostis ja kontsent.	Tahkeosakeste kontsentratsioon	Kütuse niiskus ja kütteväärtus	Põlemata osa tuhas
06.04.2022	Malle	Maksimaalne	+			
08.04.2022	Pelle	Keskmine	+	+		+
11.04.2022	Pelle	Maksimaalne	+	+		+
14.04.2022	Pelle	Minimaalne	+	+		+
18.04.2022	Malle	Keskmine	+			
18.04.2022	Pelle	Keskmine	+	+		+
19.04.2022	Malle	Minimaalne	+			
26.04.2022	LUK-35	Minimaalne	+			+
27.04.2022	LUK-35	Maksimaalne	+	+		+
28.04.2022	LUK-35	Keskmine	+	+	+	+
28.04.2022	LUK-35	Vahelduv	+	+	+	+
02.05.2022	Malle	Vahelduv	+			
03.05.2022	Pelle	Vahelduv	+	+	+	+

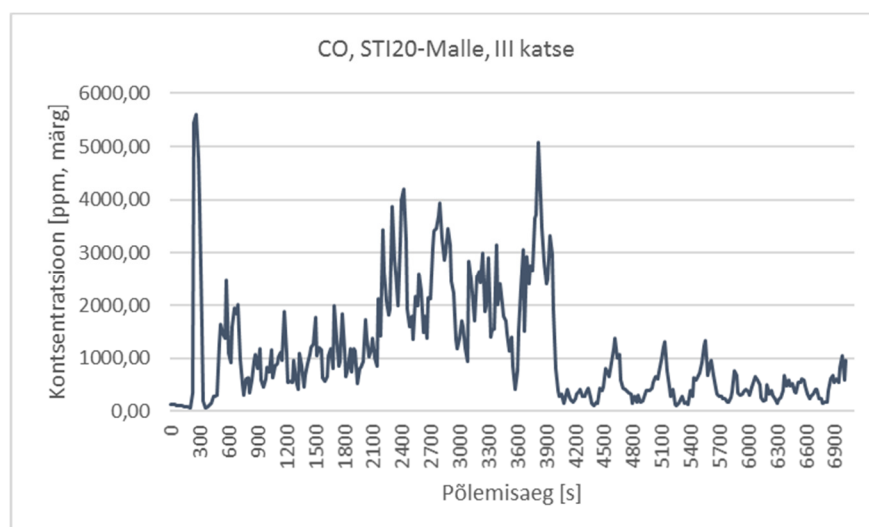
3.1 Katsed gaasikatlaga STI20-Malle

Liigõhku on antud katla puhul võimalik reguleerida põletil oleva hoova abil (Joonis 3.1), mille skaala on gradueeritud araabia numbritega vahemikus 0...7. Kirjavahetusest põleti tootjafirma Oilon OY esindaja Marko Kanervoga selgub, et täpsemalt on tegemist õhusiibriga ning positsioonil 7 on see maksimaalselt avatud asendis.



Joonis 3.1 Liigõhu reguleerimine katlal STI20-Malle

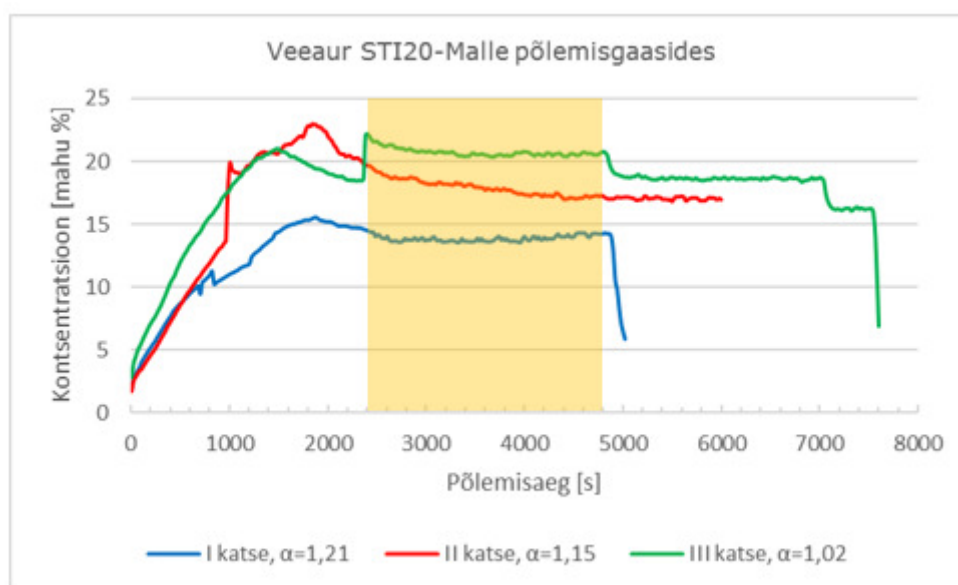
Vastavalt eelmises peatükis kirjeldatud meetodikale viidi iga liigõhurežiimiga läbi üks põlemiskatse. Katsete kordamist ei peetud ootuspäraste tulemuste tõttu vajalikuks. Esimesel katsel oli katla gaasipõleti õhusiiber asendis 7, teisel 3,5 ja kolmandal 0. Kui esimene ja teine katse kulgesid suures osas plaanipäraselt, siis kolmandat katset minimaalse liigõhurežiimiga iseloomustab väga kõrge vingugaasi (CO) sisaldus põlemisgaasides, mis kohe katse alguses tõusis kiiresti üle 5000 ppm märjas gaasiproovis (Joonis 3.2).



Joonis 3.2 CO kontsentratsiooni muutus kolmandal katsel katlaga STI20-Malle

Olukorra lahendamiseks liigutati õhusiidrit positsioonilt 0 positsioonile 2,5, kus vingugaasi kontsentratsioon hakkas langema ning jäi kõikumata vahemikku 500...2000 ppm. Mõne aja pärast siiski liigutati õhusiidrit positsioonile 1,5, sest antud katse pidi ikkagi toimuma minimaalsel liigõhurežiimil.

Peale kolme põlemiskatset erinevate liigõhurežiimidega kõrvutati tulemused põlemisajajoonel põlemisprotsesside ühise stabiilse ajavahemiku (lõigu) leidmiseks eelmises peatükis kirjeldatud meetodikale vastavalt. Jooniselt 3.3 nähtub, et kolme põlemisprotsessi ühine stabiilne lõik on ajavahemikul 2400...4800 sekundit.



Joonis 3.3 Gaasikatla STI20-Malle teostatud katsete põlemisprotsesside ühise stabiilse lõigu leidmine (ajavahemik kollasel alal)

Tabelis 3.2 toodud andmed on leitud Joonisel 3.3 kujutatud lõigu kohta. Tabelis on toodud ka neljanda katse tulemused, mis toimus vahelduva liigõhurežiimiga ning seetõttu käsitletakse seda katset eraldi.

Tabel 3.2 Gaasikatla STI20-Malle katsete koondandmed

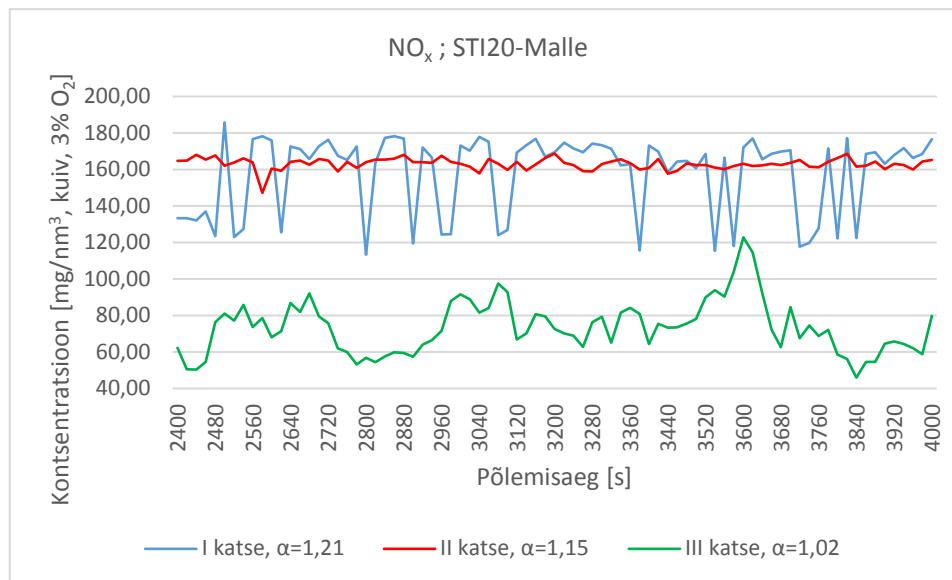
Katse nr.	I	II	III	IV
Kuupäev	6.04.2022	18.04.2022	19.04.2022	2.05.2022
Kellaaeg	11:39...13:09	11:23...13:13	10:37...12:57	12:19...14:48
Liigõhurežiim	Maksimaalne	Keskmine	Minimaalne	Vahelduv
Põlemisgaaside temperatuur, °C	58,1	83,7	92,2	87,4
Põlemisõhu temperatuur, °C	21,5	22,9	23,3	21,8
CO ₂ kuivades suitsugaasides, %	9,04	9,72	8,76	12,14
O ₂ kuivades suitsugaasides, %	3,61	2,74	0,44	1,39

Tabeli 3.2 järg

Katse nr.	I	II	III	IV
CO kuivades suitsugaasides, mg/nm ³	55,49	30,04	2063,5	2703,1
Möödetud soojusvõimsus, MW	0,0156	0,0153	0,0128	0,0149
Kautegur, %	94,1	92,9	91,9	92,8
Liigõhutegur	1,21	1,15	1,02	1,07

Tabelis 3.2 toodud andmetest nähtub, et kaudse bilansi alusel arvatud katla kasutegur on kõrgeim maksimaalse liigõhurežiimiga põlemiskatsel ja madalaim minimaalse liigõhurežiimiga katsel. Gaasikatla STI20-Malle kasuteguri arvutuste protokollid on toodud Lisas 3.

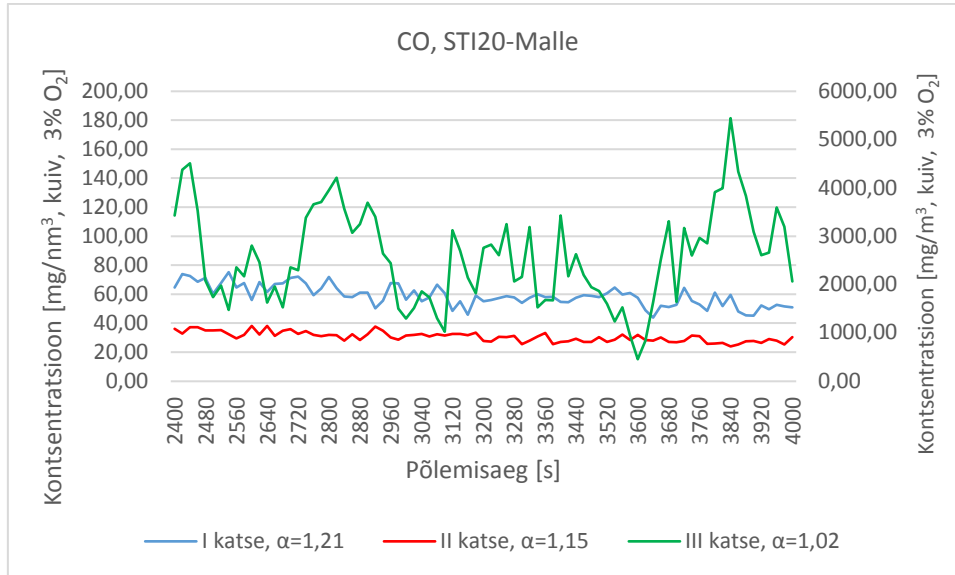
Lämmastikuühendite kontsentratsioon põlemisgaasides (Joonis 3.4) on vaadeldaval lõigul kõigi kolme katse puhul küllaltki stabiilse joonega. Siiski on esimese katse kõveral täheldada sagedasi lämmastikuühendite kontsentratsiooni kõikumisi vahemikus 120...180 mg/nm³, samal ajal kui teisel katsel püsib kontsentratsioon sujuvalt 160 mg/nm³ juures. Kolmandal katsel kõigub lämmastikuühendite kontsentratsioon võrdlemisi suurtes piirides (50...120 mg/nm³), kuid jääb üldiselt tunduvalt madalamale kahe eelmise katsega võrreldes.



Joonis 3.4 Lämmastikuühendite kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

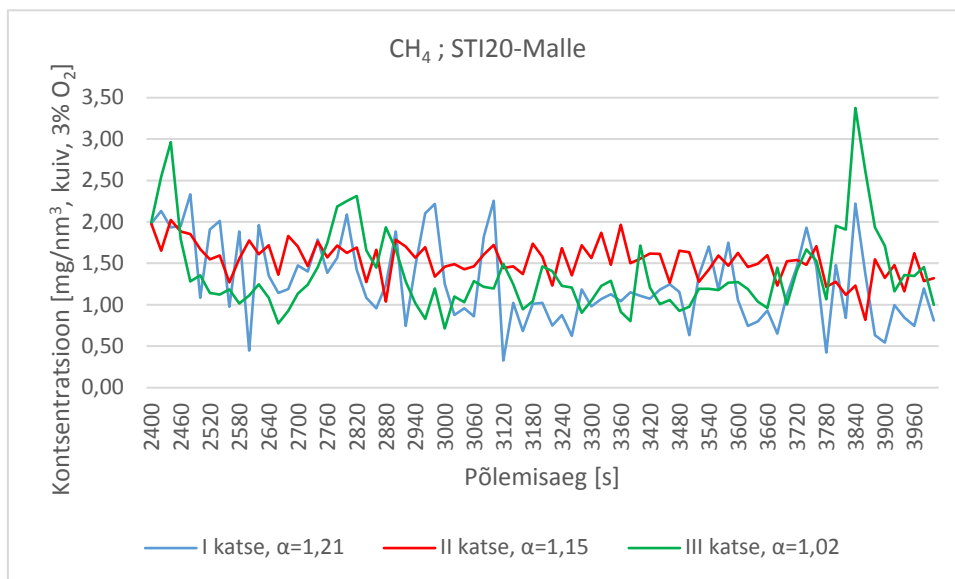
Jooniselt 3.5 nähtub, et süsinikoksiidi (CO) kontsentratsioon kahel esimesel katsel on väga madal, jäädes alla 40 ja 80 mg/nm³ vastavalt. Kolmandal katsel, kus katel töötas minimaalsel liigõhurežiimil, on seevastu vingugaasi kontsentratsioon väga kõrge,

küündides kuni 5500 milligrammini normaalkuupmeetri kohta. Samas on kolmandal katsel kõikumised suurtes piirides (1000...5500 mg/nm³) kui esimesel ja teisel katsel, kus CO kontsentratsioon jääb vahemikesse 50...70 ja 25...40 mg/nm³ vastavalt. Mõlemal juhul on vingugaasi kontsentratsioon kerges langustrendis.



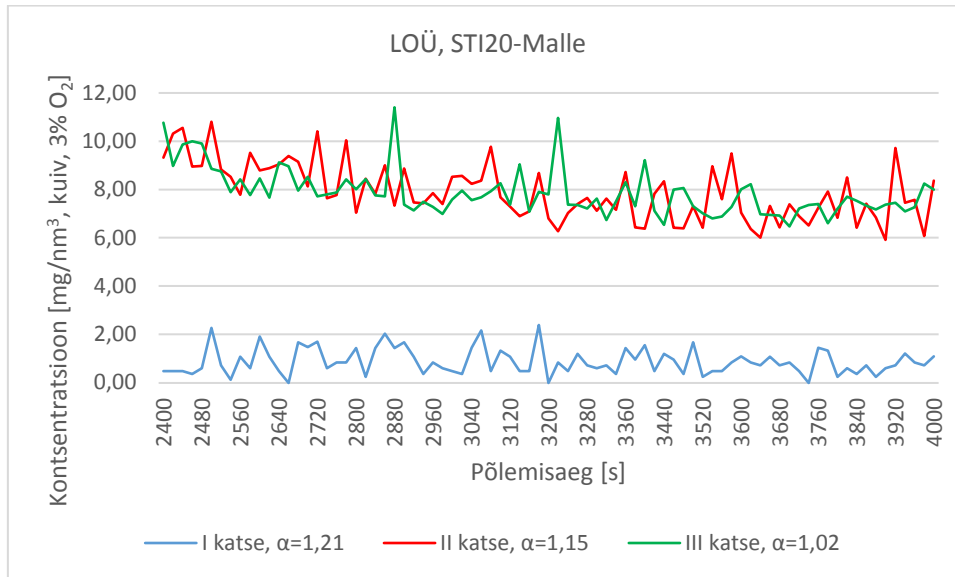
Joonis 3.5 Vingugaasi (CO) kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Metaani (CH₄) kontsentratsioon kõigil kolmel põlemiskatsel jääb enamasti vahemikku 0,5...2,5 mg/nm³ kuiva põlemisgaasi kohta olles samas ka kõigil katsetel kerges langustrendis (Joonis 3.6).



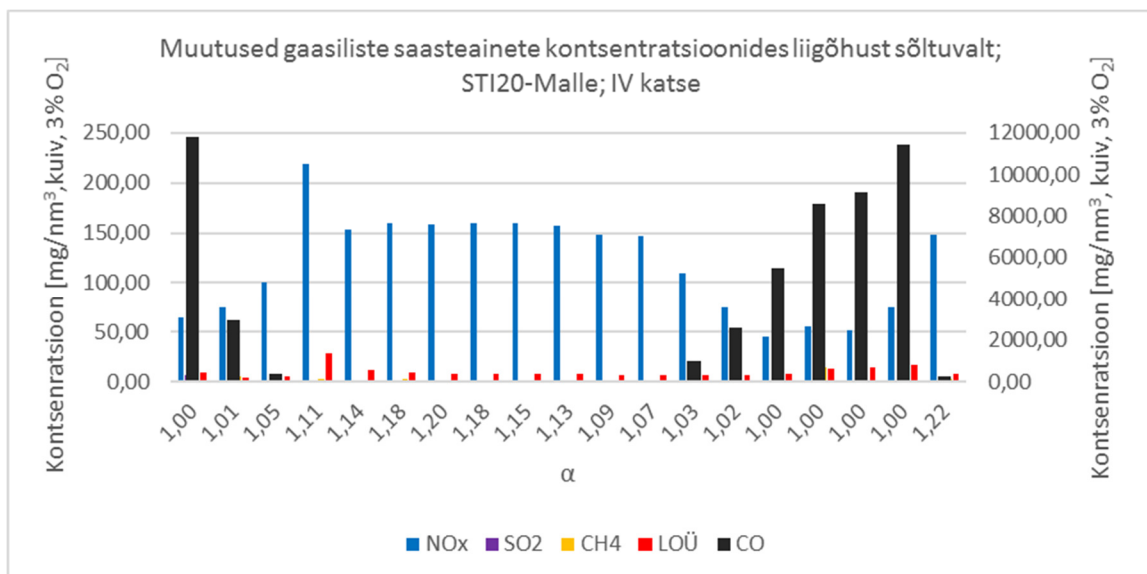
Joonis 3.6 Metaani (CH₄) kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Lenduvate orgaaniliste ühendite puhul ilmneb veider anomaalia esimese katse tulemustest (Joonis 3.7), kus nende kontsentratsioon jääb stabiilselt vahemikku 0...2 mg/nm³ kuiva gaasi kohta. Teisel ja kolmandal katsel kulgevad mõlemad kontsentratsioonikõverad aga praktiliselt sünkroonselt 10 mg/nm³ joonelt 6 mg/nm³ jooneni. Samas on kõigil kolmel juhul tegemist küllaltki madalate kontsentratsiooniga.



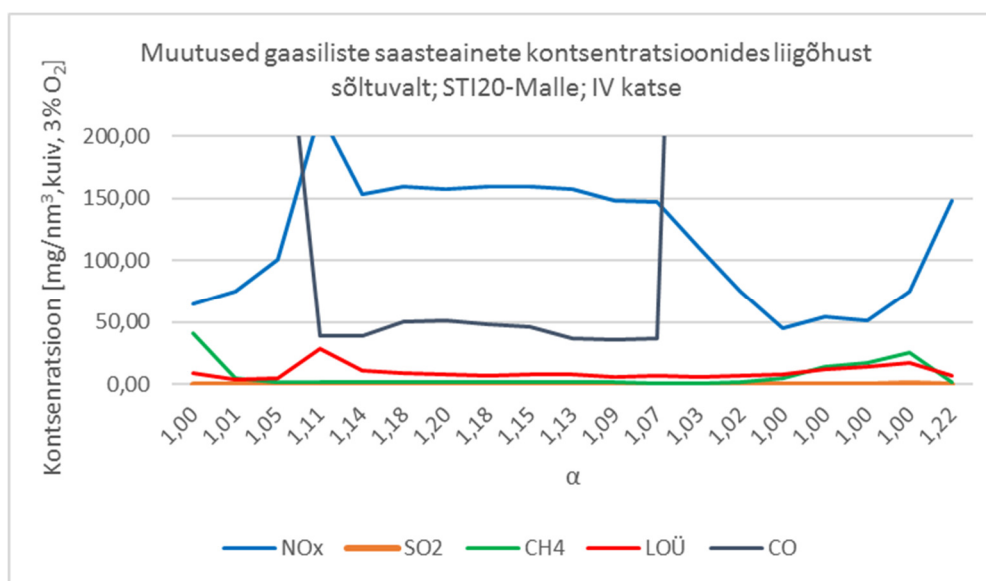
Joonis 3.7 Lenduvate orgaaniliste ühendite (LOÜ) kontsentratsioonid gaasikatla STI20-Malle kolmel erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Neljandat katset alustati minimaalsel liigõhurežiimil, kus katla gaasipõleti õhusiiber (Joonis 3.1) oli asendis 0 ning hiljem arvatatud liigõhutegur 1,00 (Joonis 3.8).



Joonis 3.8 Muutused gaasiliste õhuheitmete kontsentratsioonides liigõhust sõltuvalt tulpdiaagrammil

Sarnaselt kolmandale katsele, tõusis ka siin CO kontsentratsioon põlemisgaasides järsult, küündides peaaegu 12000 milligrammini normaalkuupmeetri kohta kuivade põlemisgaaside puhul, taandatuna kolmele protsendile hapnikule. Liigutades õhusiidrit positsioonile 2,25, hakkas CO kontsentratsioon langema ning hiljem stabiliseerus kui õhusiidri oli seatud asendisse 4. Liigutades gaasipõleti õhusiidrit järk-järgult maksimumi poole, püsis CO kontsentratsioon põlemisgaasides stabiilselt madalana, hakates tõusma jälle õhusiidri etapiviisilisel sulgemisel. Jooniselt 3.9 nähtub, et CO kontsentratsioon põlemisgaasides on suhteliselt stabiilne vahemikus, kus liigõhutegur α on saavutanud väärtuse 1,11, suureneb väärtuseni 1,18 ning seejärel langeb väärtuseni 1,07.



Joonis 3.9 Muutused gaasiliste õhuheitmete kontsentratsioonides liigõhust sõltuvalt lineaarsel graafikul kujutatuna

Samal ajal kui vingugaasi (CO) kontsentratsioon põlemisgaasides tõuseb, langeb lämmastikuühendite (NO_x) kontsentratsioon ning vastupidi – seal, kus CO kontsentratsioon on stabiilselt madal, on NO_x kontsentratsioon stabiilselt kõrge (Joonis 3.8 ja 3.9).

Teistest vaadeldavatest sihtrühmadest on märkimisväärselt esindatud lenduvad orgaanilised ühendid (LOÜ), mille kontsentratsioon ulatus kohati 28 mg/nm³, kuid jäädes enamasti vahemikku 6...8 mg/nm³. Vähesel määral on põlemisgaasides esindatud ka metaan (CH₄), mille kontsentratsioon suureneb samuti peale liigõhuteguri püsimumist madalal ($\alpha=1,0$). Samuti on gaasianalüsaator kohati registreerinud vääveldioksiidi (SO₂) olemasolu väga vähesel määral, mis samuti on leidnud aset madala liigõhuteguriga põlemisaja lõigul.

3.2 Katsed pelletikatlaga STI20VTP-Pelle

Põlemiseks vajalikku õhkogust saab katlal STI20VTP-Pelle muuta põleti kasutajaliidese kaudu, vahemikus -2...+5 (Joonis 3.10). Pelletikatlaga viidi läbi viis põlemiskatset – neli erinevate ja üks muutuva õhurežiimiga.



Joonis 3.10 Liigõhu reguleerimine katla STI20VTP-Pelle pelletipõletil

Eelnevatele gaasikatlakatsetele sarnaselt valiti nelja erineva liigõhurežiimiga katse ühine vaadeldav lõik gaasiliste saasteainete kontsentratsioonide võrdlemiseks, milleks on ajavahemik põlemise ajal 1200. sekundist 4400. sekundini. Koondandmed toimunud katsete kohta on toodud Tabelis 3.3, millest nähtub, et pea kõik seal toodud suurused ja näitajad erinevad katsete lõikes üksteisest küllaltki vähe.

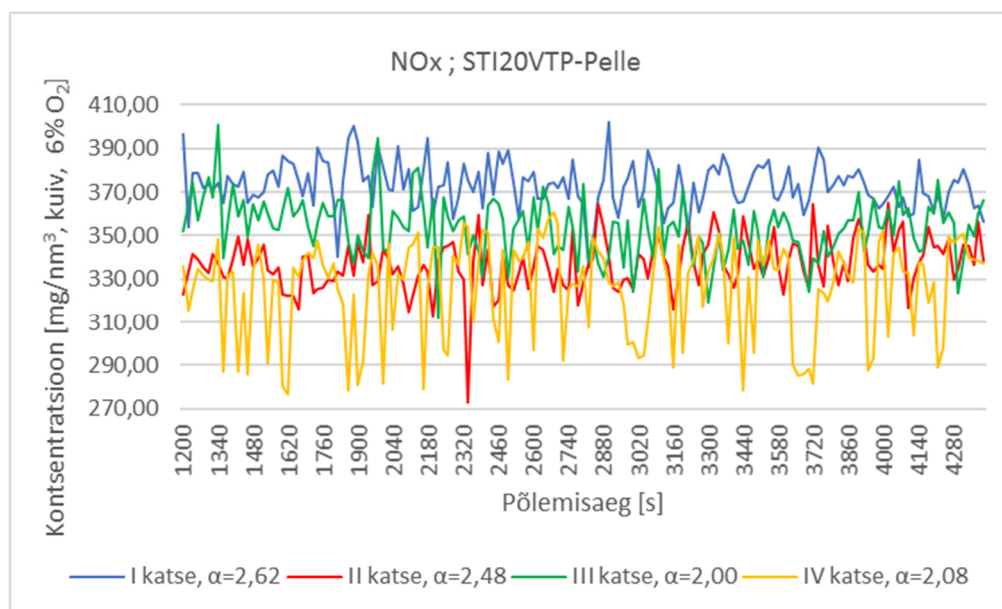
Tabel 3.3 Pelletikatla STI20VTP-Pelle katsete tulemused

Katse nr.	I	II	III	IV	V
Kuupäev	8.04.2022	11.04.2022	14.04.2022	18.04.2022	3.05.2022
Liigõhurežiim	Keskmine	Maksimaalne	Minimaalne	Keskmine	Vahelduv
Põlemisgaaside temperatuur, °C	111,5	114,3	109,1	116,4	93,3
Põlemisõhu temperatuur, °C	23,3	21,6	22,5	23,9	22,0
CO ₂ kuivades suitsugaasides, %	9,87	8,06	9,69	9,30	9,46
O ₂ kuivades suitsugaasides, %	12,93	12,93	10,47	10,87	12,12
CO kuivades suitsugaasides, mg/nm ³	51,19	101,69	47,29	50,60	66,00
Mõõdetud soojusvõimsus, MW	0,01095	0,0113	0,0105	0,0103	0,0106
Kautegur, %	78,1	77,9	79,3	78,5	80,2
Liigõhutegur	2,62	2,48	2,00	2,08	2,38

Ainsateks anomaaliateks Tabelis 3.3 on II katse CO kontsentratsioon, mis on teistest kaks korda kõrgem ja V katse põlemisgaaside temperatuur, mis on teistest umbes 20 °C madalam. Kaudse bilansi alusel arvatatud kasutegurid erinevad üksteisest maksimaalselt 2,3 protsendipunkti. Arvutuste protokollid on toodud Lisas 4.

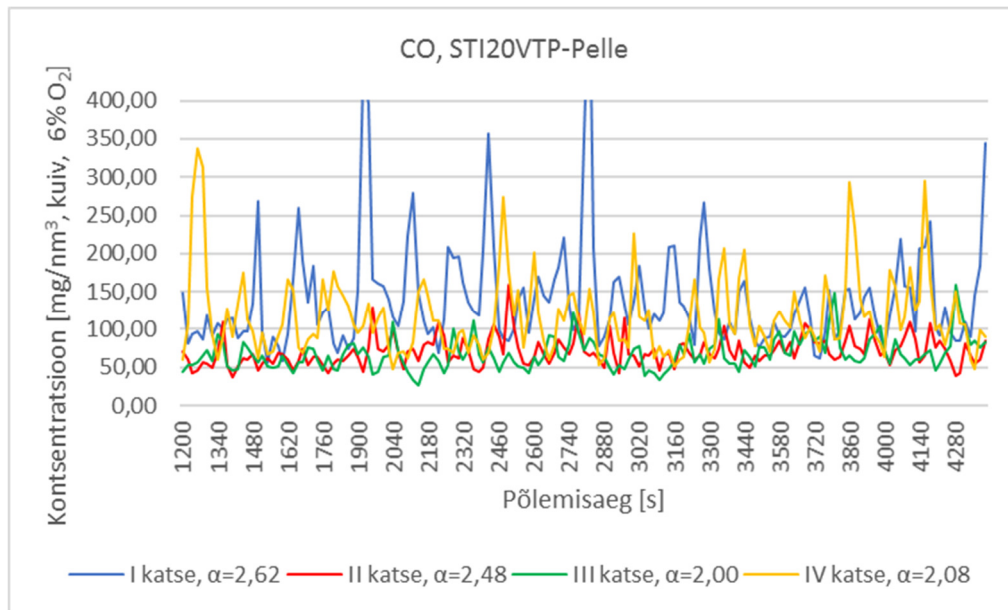
3.2.1 Gaasilised õhuheitmed katsetel katlaga STI20VTP-Pelle

Lämmastikuühendite kontsentratsioonid erinevate katsete lõikes (Joonis 3.11) jäävad vahemikku 290...390 mg/nm³ kuiva gaasi kohta, taandatuna kuuele protsendile hapnikule. Esimesel katsel, mis toimus keskmisel liigõhurežiimil, kõigub NO_x kontsentratsioon keskmiselt 370 mg/nm³ juures, samas neljandal katsel sama režiimiga toimub suurem kõikumine vahemikus 290...350 mg/nm³. Teisel, maksimaalse liigõhurežiimiga katsel on lämmastikuühendite kontsentratsioon põlemisgaasides veidi madalam, kui kolmandal, minimaalse režiimiga katsel. Teise põlemiskatse NO_x kontsentratsioonikõver kulgeb kerges tõusu-, kolmanda katse kõver aga langustrendis.



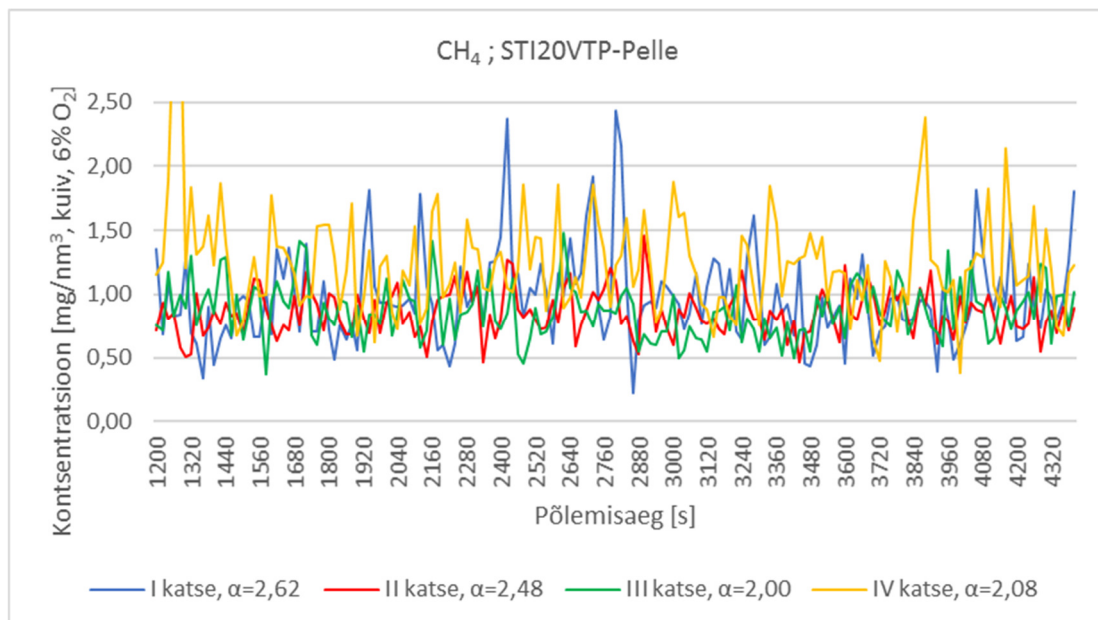
Joonis 3.11 Lämmastikuühendite (NO_x) kontsentratsioonid pelletikatla STI20VTP-Pelle neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Süsinikoksiidi (CO) kontsentratsioon (Joonis 3.12) on kõige kõrgem esimesel põlemiskatsel, ulatudes üksikute piikidena üle 400 mg/nm³. Sarnane muster kerkib esile ka neljanda katse puhul, kuid enamasti jäävad piikide tipud veidi alla 300 mg/nm³. Mõlemad katsed on läbi viidud keskmisel liigõhurežiimil, kuid esimest katset isloomustab märksa suurem liigõhutegur. Teine ja kolmas katse viidi läbi vastavalt maksimaalsel ja minimaalsel liigõhurežiimil, kuid süsinikoksiidi kontsentratsioon jääb mõlemal juhul praktiliselt samasse vahemikku 50...150 mg/nm³.



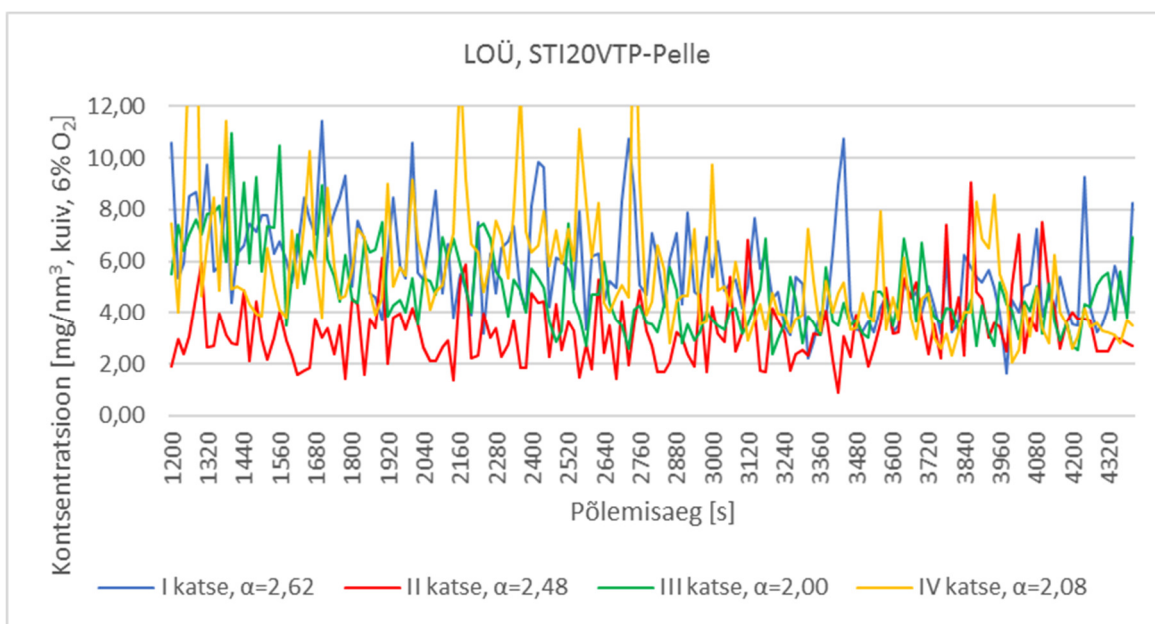
Joonis 3.12 Süsinikoksiidi (CO) kontsentratsioonid pelletikatla STI20VTP-Pelle neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Metaani (CH₄) kontsentratsioon põlemisgaasides oli kõigil neljal katsel vahemikus 0,5...1,5 mg/nm³ kuiva gaasi kohta 6% hapnikule taandatuna (Joonis 3.13). Esimesel ja neljandal katsel teevad kontsentratsioonikõverad ka üksikuid piike üle 2 mg/nm³. Siinkohal tuleb aga tähelepanu pöörata asjaolule, et kontsentratsioon äärmiselt madal kõigil neljal katsel.



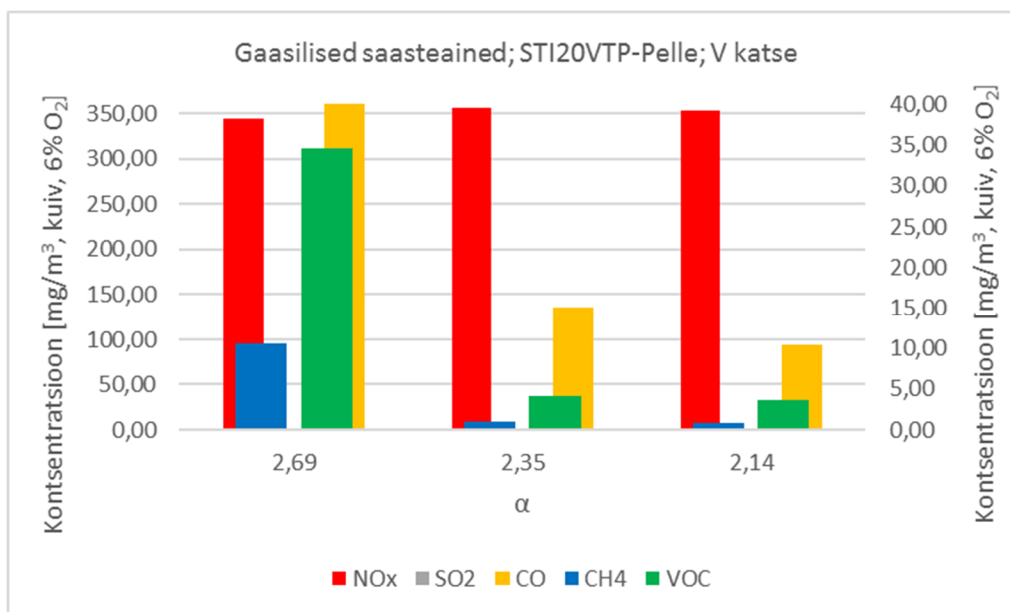
Joonis 3.13 Metaani (CH₄) kontsentratsioonid pelletikatla STI20VTP neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Erinevalt metaani sisaldusest põlemisgaasides on lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon keskmiselt kuni viis korda kõrgem, ulatudes neljandal katsel üksikute piikidena isegi üle 12 mg/nm³ (Joonis 3.14). Neljandale katsele sarnaneb esimene katse, kus üksikud piigid ulatuvad napilt üle 10 mg/nm³. Langustrendi poolest on kahele eelnevalt kirjeldatud katsele ka kolmas, kuid seal jääb LOÜ kontsentratsioon enamjaolt vahemikku 3...8 mg/nm³. Teist põlemiskatset iseloomustab aga kerge tõusutrend, kuid lenduvate osakeste kontsentratsioon jäi seal vahemikku 2...6 mg/nm³.



Joonis 3.14 Lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioonid pelletikatla STI20VTP neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

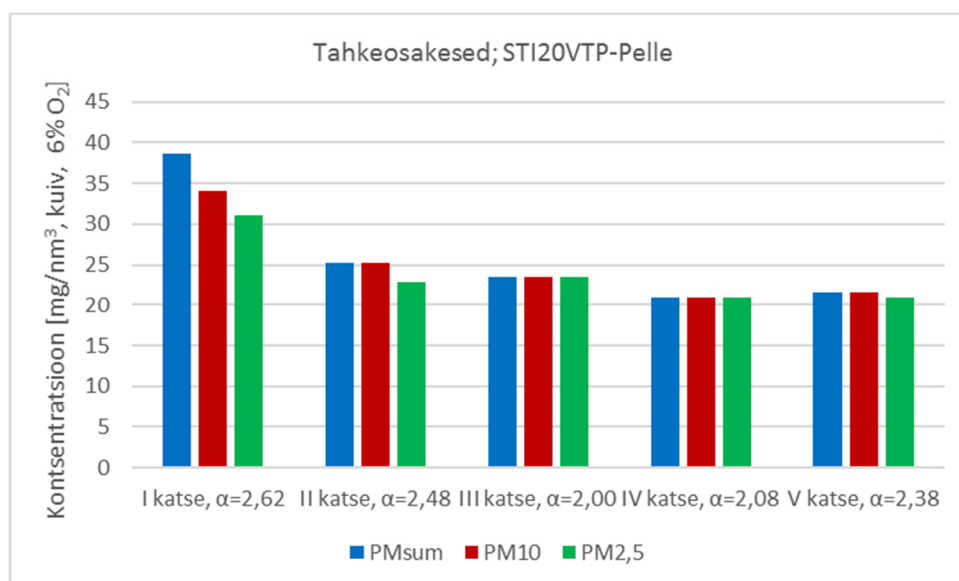
Viimane, viies katse pelletikatlaga STI20VTP-Pelle viidi läbi muutuval liigõhurežiimil vastavalt punktis 2.2.4 kirjeldatud meetodikale. Katse tulemustest eristati selgelt kolme erinevat keskmise liigõhuteguriga lõiku. Gaasiliste saasteainete kontsentratsioonid nimetatud lõikudel on toodud Joonisel 3.15. Nähtub, et lämmastikuühendite (NO_x) kontsentratsioon püsib kõigil kolmel lõigul sisuliselt samal tasemel (350 mg/nm³). Vingugaasi (CO), metaani (CH₄) ja lenduvate orgaaniliste ühendite (LOÜ) kontsentratsioonid põlemisgaasides on kõrgemad suurema liigõhuteguriga lõigul ning madalamad väiksema liigõhuteguriga lõigul. Vääveldioksiidi (SO₂) põlemisgaasides mitte ühelgi katsel praktiliselt ei esinenud.



Joonis 3.15 Muutused gaasiliste õhuheitmete kontsentratsioonides liigõhust sõltuvalt

3.2.2 Tahkeosakesed katsetel katlaga STI20VTP-Pelle

Tahkeosakeste proove õnnestus edukalt võtta kõigil viiel katsel. Tahkeosakeste proovivõtuprotokollid on toodud Lisas 5. Kõige suurem oli tahkeosade kontsentratsioon esimesel katsel, ulatudes PM-sum puhul 38,7 milligrammini normaalkuupmeetri kuiva põlemisgaasi kohta 6% hapnikule taandatuna (Joonis 3.16). PM-10 ja PM-2,5 osakeste kontsentratsioon oli 34,1 ja 31 mg/nm³ vastavalt. Teistel katsetel jäid kõikide tahkeosakeste kontsentratsioonid vahemikku 20...25 mg/nm³. Fotod tahkeosakeste proovivõtufiltritest on toodud Lisas 6.



Joonis 3.16 Tahkeosakeste kontsentratsioon põlemisgaasides katsetel katlaga STI20VTP-Pelle

3.3 Katsed halupuukatlaga LUK-35

Kõnealusel katlal antakse koldesse primaarõhku läbi tuhaukse õhuluugi ja sekundaarõhku läbi koldeukse õhuluugi. Põlemiseks vajalikku õhukogust saab seega reguleerida õhuluugi küljes olevat distantspolti keerates ja uksi avades või sulgedes (Joonis 3.17).



Joonis 3.17 Liigõhu reguleerimine halupuukatlal LUK-35

Halupuukatlaga LUK-35 viidi läbi neli põlemiskatset. Katsed planeeriti punktis 2.2.4 kirjeldatud meetoditele vastavalt, ehk siis maksimaalsel, keskmisel, minimaalsel ja vahelduval liigõhurežiimil. Katsete läbiviimine vastavalt meetodikale kujunes keeruliseks, sest selle katseobjekti puhul ei olnud tegemist pideva, vaid ajas muutuva põlemisprotsessiga. Seetõttu käsitletakse siin vahelduva õhurežiimiga katset koos teistega. Katsete ühiseks vaadeldavaks lõiguks määrati põlemisaja vahemik 1000...4200 sekundit. Halupuutkütuseks kasutati esimesel ja kolmandal katsel hall-leppa, teisel ja neljandal harilikku kuuske. Koondandmed on toodud Tabelis 3.4.

Tabel 3.4 Halupuukatla LUK-35 katsete tulemused

Katse nr.	I	II	III	IV
Kuupäev	26.04.2022	27.04.2022	28.04.2022	28.04.2022
Kellaaeg	11:39...13:09	11:23...13:13	10:37...12:57	13:45...15:09
Liigõhurežiim	Keskmine	Maksimaalne	Minimaalne	Vahelduv
Kütus	Hall-lepp	Kuuske	Hall-lepp	Kuuske
Põlemisgaaside temperatuur, °C	150,3	172,3	161,15	182,8

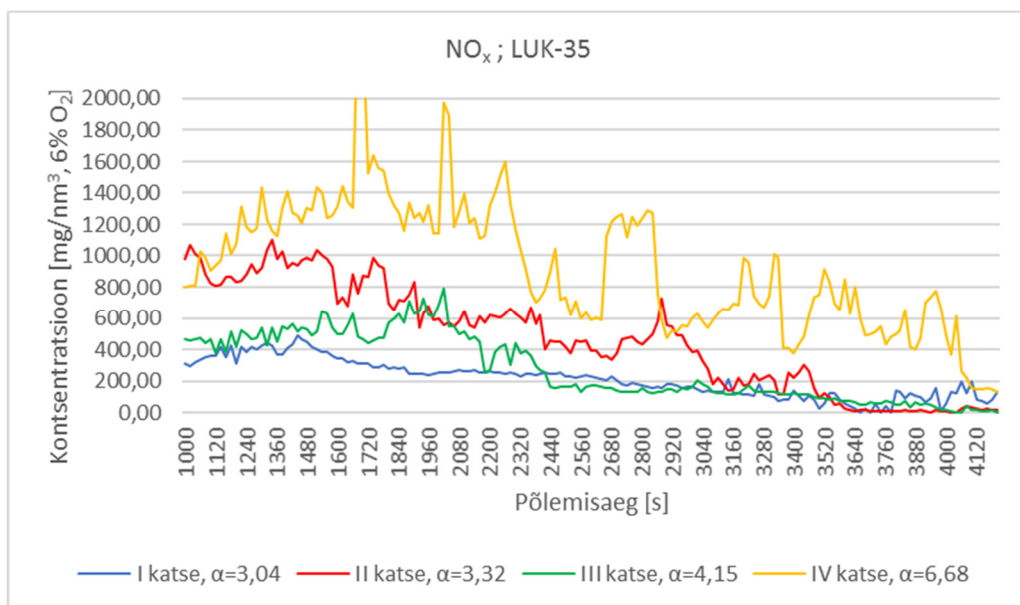
Tabeli 3.4 järg

Katse nr.	I	II	III	IV
Põlemisõhu temperatuur, °C	22,6	19,5	16,3	21,8
CO ₂ kuivades suitsugaasides, %	4,93	5,21	3,56	2,74
O ₂ kuivades suitsugaasides, %	14,03	14,61	15,86	17,7
Mõõdetud soojusvõimsus, MW	0,0192	0,0133	0,0208	0,018
Kasutegur, %	72,1	66,6	70,0	44,6
Liigõhutegur	3,04	3,32	4,15	6,68

Katsete koondtulemustest nähtub, et katla kasutegur muutub katsel kasutatud kütusest sõltuvalt. Hall-lepa puhul on kasutegur märkimisväärselt kõrgem kui hariliku kuuse puhul. Kasuteguri arvutamise protokollid on toodud Lisas 7.

3.3.1 Gaasilised õhuheitmed katsetel LUK-35 katlaga

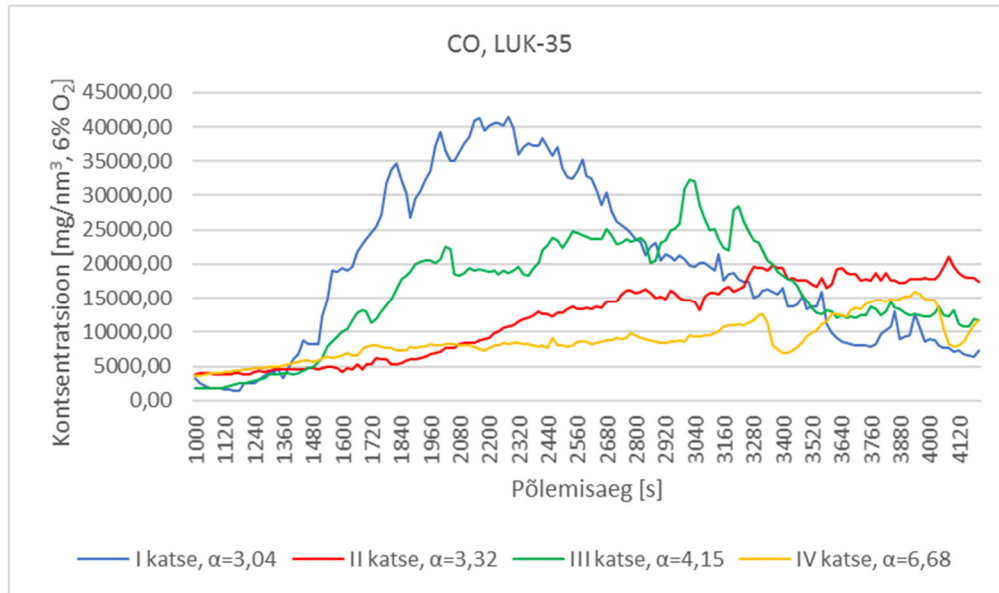
Lämmastikuühendite kontsentratsioon põlemisgaasides on vaadeldaval lõigul kõikidel katsetel selgelt langustrendis (Joonis 3.18). Kõige kõrgem on see neljandal katsel, ulatudes tipp hetkel üle 2000 mg/nm³ kuiva põlemisgaasi kohta 6% hapnikule taandatuna.



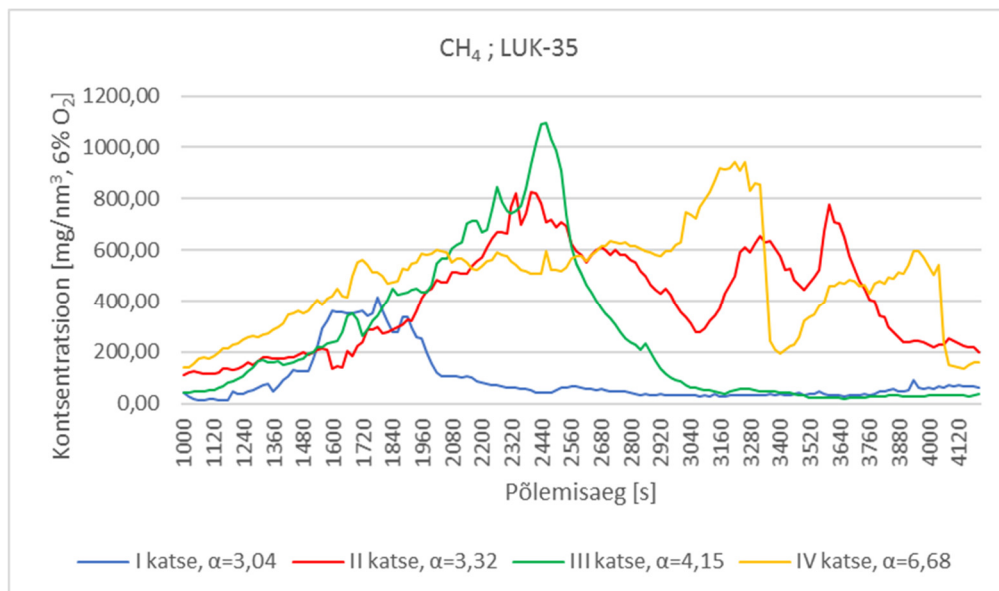
Joonis 3.18 Lämmastikuühendite kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Teisel katsel on vaadeldava lõigu alguses lämmastikuühendite kontsentratsioon 1000 mg/nm³, langedes lõigu lõpuks nulli lähedale. Kolmandal katsel tõuseb NO_x kontsentratsioon korraks üle 700 mg/nm³, kuid esimesel katsel ei ületa see 500 mg/nm³.

Süsinikoksiidi (CO) kontsentratsioon põlemisgaasides on vaadeldaval lõigul kõigil katsetel väga kõrge, ulatudes esimesel põlemiskatsel üle 40000 milligrammi normaalkuupmeetri kuiva põlemisgaasi kohta (Joonis 3.19), taandatuna kuuetele protsendile hapnikule. Kolmandal katsel ületas CO kontsentratsioon tipphetkel 30000 mg/nm³ piiri, teisel katsel jäi laeks 20000 ning neljandal 15000 mg/nm³. Kontsentratsioonikõverad on sarnased sama liiki halupuutkütusega katsetel.



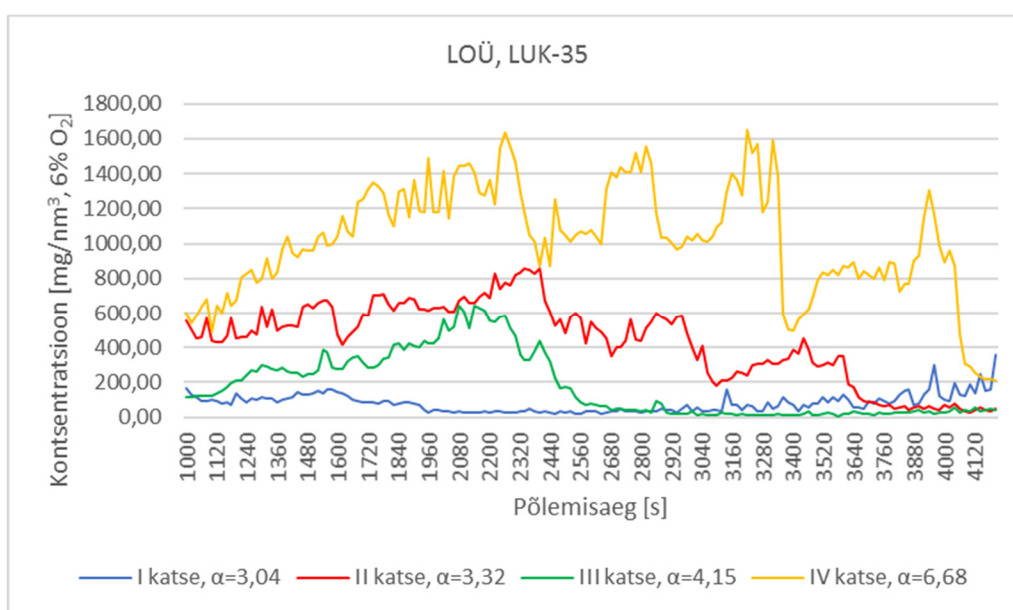
Joonis 3.19 Vingugaasi (CO) kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel



Joonis 3.20 Metaani (CH₄) kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Metaani (CH₄) kontsentratsioon põlemisgaasides (Joonis 3.20) on vaadeldaval lõigul kõige kõrgem kolmandal katsel, ületades tippphetkel 1000 mg/nm³ piiri. Neljandal katsel jääb see alla selle ning langeb astmeliselt. Teisel katsel kulgeb kontsentratsioonikõver kahel korral võrdlemisi korrapäratult 800 mg/nm³ piiri lähedale, esimesel katsel aga ei ületa see 400 mg/nm³ piiri.

Lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon põlemisgaasides vaadeldaval lõigul oli kõrgeim neljandal katsel (1600 mg/nm³), mil arvutati ka kõige kõrgem liigõhutegur ($\alpha=6,68$) (Joonis 3.21). Suuruselt järgmise liigõhuteguriga ($\alpha=4,15$) kolmandal katsel jäi lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon põlemisgaasides tunduvalt tagasihoidlikumaks, ületades korraks 600 mg/nm³ piiri.



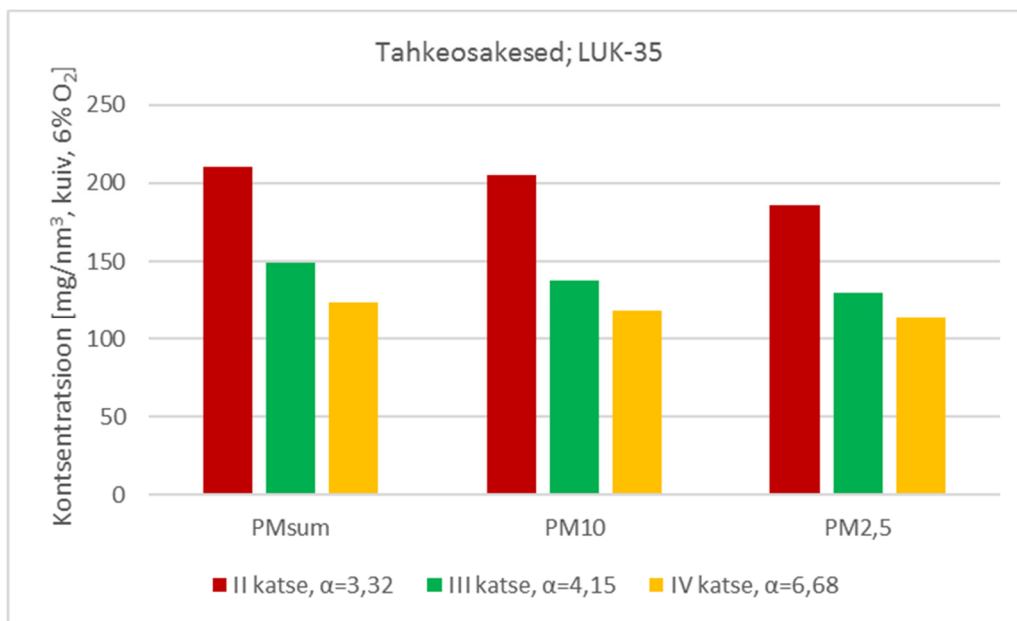
Joonis 3.21 Lenduvate orgaaniliste ühendite (LOÜ) kontsentratsioonid halupuukatla LUK-35 neljal erineva liigõhurežiimiga põlemiskatsel

Teisel katsel oli liigõhutegur jällegi tunduvalt madalam (tippphetkel üle 800 mg/nm³), kuid lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon mõnevõrra suurem kui kolmandal katsel. Esimest katsel iseloomustab anomaalselt madal LOÜ kontsentratsioon põlemisgaasides. Enamasti jääb see alla 200 milligrammi normaalkuupmeetri kuiva põlemisgaasi kohta, taandatuna kuuele protsendile hapnikule.

3.3.2 Tahked õhuheitmed katsetel katlaga LUK-35

Tahkeosakeste proove õnenustus võtta ainult kolmel viimasel katsel. Esimesel katsel see tehnilistel põhjustel ebaõnnestus. Kõige suurem oli tahkeosade kontsentratsioon teisel katsel, ulatudes PM-sum puhul 210,5 milligrammini normaalkuupmeetri kuiva põlemisgaasi kohta 6% hapnikule taandatuna (Joonis 3.22). PM-10 ja PM-2,5 osakeste

kontsentratsioon oli 205,5 ja 185,5 mg/nm³ vastavalt. Liigõhuteguriks mõõdeti samal ajal 3,32. Kolmandal katsel oli liigõhuteguriks juba 4,15 ja kõikide põlemisgaasides leiduvate tahkeosakeste (PM-sum) kontsentratsioon 149,2 mg/nm³, PM-10 ja PM-2,5 kontsentratsioonid aga 137,7 ja 130,1 mg/nm³ vastavalt. Neljandal katsel oli liigõhutegur vaadeldaval lõigul kõige suurem, samas kõikide tahkeosakeste segmentides kontsentratsioonid veidi madalamad: PM-sum 123,5; PM-10 118,7 ja PM-2,5 114 mg/nm³ kuivas põlemisgaasis 6% hapnikule taandatuna. Tahkeosakeste proovivõtuprotokollid on toodud Lisas 8 ja fotod proovifiltritest Lisas 9.



Joonis 3.22 Tahkeosakeste kontsentratsioon põlemisgaasides katsetel katlaga LUK-35

3.4 Järeldused

3.4.1 Liigõhu mõju lämmastikoksiidide tekkele

Nagu punktis 1.3.1 väidetud, on lämmastikuühendite (NO_x) teke kütuste põlemisel suuresti sõltuv temperatuurist ja ka saadaolevast hapnikust. Gaasikatlaga STI20-Malle teostatud katsetest nähtub, et lämmastikoksiidide kontsentratsioon põlemisgaaside koostises oli tunduvalt kõrgem suurema liigõhuteguriga katsetel. Vähemal määral võib seda täheldada ka pelletikatlaga STI20VTP-Pelle katsete puhul. Halupuukatlaga LUK-35 tehtud katsed näitavad kahetisi tulemusi, kuid seal on tegemist ka erinevat liiki halupuitkütustega. Katsetel, kus kütusena kasutati hall-leppa (I ja III katse), oli lämmastikoksiidide kontsentratsioon põlemisgaasides tunduvalt madalam kui katsetel, kus kütuseks kasutati harilikku kuuske (II ja IV katse) ja seda liigõhutegurist olenemata. Kui aga võrrelda katseid sama puuliigiga, on märgatav seos liigõhuteguri ja NO_x kontsentratsiooni vahel – kõrgema liigõhuteguri puhul on lämmastikoksiidide kontsentratsioon siiski kõrgem. Siit võibki järeldada, et lämmastikoksiide tekib rohkem suurema liigõhuteguriga põlemisprotsessidel, sest siis on reaktsiooniks vajalikku hapnikku rohkem saadaval ja tõenäoliselt eraldub ka suuremal hulgal põlemissoojust. Heitmete teket erinevate puuliikide korral tuleb eraldi uurida.

3.4.2 Liigõhk vingugaasi kontsentratsiooni mõjutajana

Katsetest nähtub, et vingugaasi ehk süsinikoksiidi kontsentratsioon põlemisgaasides võib liigõhust olenevalt kõikuda väga suurtes piirides. Gaasikatlaga STI20-Malle läbi viidud katsed olid tulemuste poolest veidi üllatavad. Katsel maksimaalse liigõhurežiimiga emiteeriti märksa rohkem süsinikoksiidi kui katsel keskmise liigõhurežiimiga, kuigi oodatult võiks olla vastupidi. Samas minimaalsel liigõhurežiimil, kui liigõhuteguriks 1,02, oli CO kontsentratsioon põlemisgaasides kohati ligi 100 korda kõrgem. See tähendab, et gaaskütuse täielikuks põlemiseks ei jätkunud piisavalt hapnikku, mis omakorda viitab võimalikule gaasipõleti rõhuregulaatori talitlushäirele.

Pelletikatlaga STI20VTP-Pelle teostatud katsetest nähtub aga, et liigõhul pealtnäha erilist mõju CO-heitmele ei ole. Samas peab siinkohal märkima, et antud katlal juhitakse põlemisprotsessi [12] ning liigõhku saab põleti kasutajaliidesest reguleerida ainult niiõelda turvalises vahemikus. Katsetest halupuukatlaga LUK-35 kerkib esile jälle tuttav muster erinevat liiki halupuitkütuste kasutamisega seoses. Hall-leppa põlemisel tekkis tunduvalt rohkem vingugaasiheidet kui hariliku kuuse põlemisel. Samas mõlema kütuseliigi puhul oli CO kontsentratsioon selgelt kõrgem madalama liigõhuteguriga põlemiskatsel.

Eelnevast võib järeldada, et süsinikoksiidi (CO) kontsentratsioon põlemisgaasides sõltub kontrollitud pideva põlemisprotsessi puhul liigõhust vähe või üldse mitte, juhul kui kontrollmehhanism suudab põlemisõhu vähenemise korral edukalt vähendada ka kütuse juurdevoolu. Suuresti kontrollimata ajas muutuval või puuduliku kontrollmehhanismiga pideval põlemisprotsessil on aga liigõhul oluline mõju CO-heitme tekkele.

3.4.3 Metaani esinemine põlemisgaasides liigõhust tingituna

Metaani (CH₄) esines katsetel gaasikatlaga STI20-Malle ja pelletikatlaga STI20VTP-Pelle põlemisgaasides väga vähesel määral sõltumata liigõhutegurist. Kuna tegemist on kergesti süttiva ühendiga, siis põleb see enamasti koldemahus ära. Siiski on metaani süttimiseks teatud tingimused nagu alumine ja ülemine süttimispiir 5,0...15,0 mahuprotsenti ning liigõhutegur süttimispiiril 1,99...0,59 vastavalt [2]. Halupuukatlaga LUK-35 sooritatud katsetel ulatub metaani kontsentratsioon ühel katsel isegi üle 1000 milligrammi normaalkuupmeetri kuiva põlemisgaasi kohta 6% hapnikule taandatuna. Graafikult (Joonis 3.21) on tavalisest raskem näha seost metaani kontsentratsiooni ja liigõhuteguri vahel, kuid võib öelda, et see on olemas. Samuti sarnanevad sama liiki halupuitkütusega tehtud katsed. Hall-lepa puhul langevad kontsentratsioonikõverad pärast kulminatsiooni kiiresti, kuid hariliku kuuse puhul aeglasemalt ja astmeliselt. Astmed kontsentratsioonijoonel on põhjustatud ilmselt koldeukse avamisest süte kohendamiseks, sest siis pääses koldesse lühikese aja jooksul tohtu kogus põlemisõhku. Metaani kontsentratsioon põlemisgaasides seejärel vähenes järsult, sest enamus metaanist põles ära. Koldeukse sulgemisel hakkas põlemata metaani kontsentratsioon jälle tõusma. Seega, tuginedes kirjalikele allikatele ja teostatud põlemiskatsetele, võib väita, et liigõhul on metaani kontsentratsioonile põlemisgaasides oluline mõju.

3.4.4 Liigõhu roll lenduvate orgaaniliste ühendite tekkimisel

Teostatud katsete tulemustest nähtub, et liigõhu roll lenduvate orgaaniliste ühendite (LOÜ) tekkimisele kütuste põlemisel on mõneti sarnane eelmises punktis kirjeldatule. Nii gaasi- kui ka pelletikatla põlemisgaasides esineb lenduvaid orgaanilisi ühendeid vähesel määral ning liigõhu mõju sellele on küllaltki keeruline hinnata. Katsetel halupuukatlaga kerkis esile jälle tuttavad erisused tingituna kasutatud kütustest ja liigõhutegurist. Hall-lepa puhul on lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioonid põlemisgaasides üleüldiselt madalamad kui hariliku kuuse puhul. Samas on puuliigiti näha seos liigõhuteguri ja LOÜ kontsentratsiooni vahel. Hariliku kuuse põlemisel kulgevad lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioonikõverad jällegi astmeliselt sarnaselt eelmises punktis kirjeldatule. Seega võib järeldada, et ka lenduvate

orgaaniliste ühendite kontsentratsioonile põlemisgaasides on liigõhul vähemalt halupuukatla LUK-35 puhul küllaltki suur mõju.

3.4.5 Tahkeosakeste kontsentratsiooni sõltumine liigõhust

Tahkeosakeste kontsentratsioone saab võrrelda ainult pelletikatla STI20VTP-Pelle ja halupuukatla LUK-35 põlemisgaasides, sest gaaskütuse põlemisel neid ei teki [3]. Pelletikatlaga teostatud katsete tulemustest (Joonis 3.16) nähtub märgatavalt kõrgem tahkeosakeste kontsentratsioon põlemisgaasides maksimaalsel liigõhurežiimil läbi viidud katsel. Teistel katsetel, kus liigõhutegurid on madalamad, on ka tahkeosakeste kontsentratsioon põlemisgaasides madalam kõikides segmentides. Siinkohal ei tohi unustada, et pelletikatlal STI20VTP-Pelle on põlemisprotsess hästi kontrollitud ning liigõhku ei saa muuta suurtes piirides.

Katsed halupuukatlaga LUK-35 näitavad aga vastupidiseid tulemusi. Tahkeosakeste kontsentratsioon põlemisgaasides väheneb liigõhuteguri suurenedes ja seda kõikide segmentide puhul. Tõenäoliselt jääb suurema liigõhuteguri korral põlemata vähem tahkekütuse lendosiseid kui madalama liigõhuteguri puhul. Samas ei nähtu tulemustest erisusi halupuitkütuse liigi suhtes, kuid pelletkütusega võrreldes on tahkeosakeste kontsentratsioon suurusjärgu võrra suurem, milles võib veenduda ka proovifiltrite visuaalsel vaatlusel (Lisa 6 ja Lisa 9).

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti liigõhu mõju õhuheitmete tekkele kodumajapidamistes kasutatavates väikekateldes. Selleks teostati põlemiskatsed erinevatel liigõhurežiimidel gaasikatlaga STI20-Malle, pelletikatlaga STI20VTP-Pelle ja halupuukatlaga LUK-35. Katsetel mõõdeti gaasiliste saasteainete ja tahkeosakeste kontsentratsioone põlemisgaasides. Kõrvaleesmärgina arvutati katelde kasutegurid kaudse bilansi alusel. Vaatlusalusteks õhuheitmeteks olid lämmastikoksiidid (NO_x), vääveldioksiid (SO_2), süsihappegaas (CO), metaan (CH_4), lenduvad orgaanilised ühendid (LOÜ) ning tahkeosakesed (PM-sum, PM-10 ja PM-2,5). Gaasiliste õhuheitmete määramiseks kasutati Fourier' teisendusega infrapunaspektroskoopiaal põhinevat meetodit ja seadmeid, tahkeosakeste mõõtmiseks aga gravimeetrilist meetodit.

Katsete tulemustest nähtus, et lämmastikoksiide tekib rohkem suurema liigõhuteguriga põlemisprotsessidel, sest siis on reaktsiooniks vajalikku hapnikku rohkem saadaval ja tõenäoliselt eraldub ka suuremal hulgal põlemissoojust. Süsinikoksiidi (CO) kontsentratsioon põlemisgaasides sõltub kontrollitud pideva põlemisprotsessi puhul liigõhust vähe või üldse mitte, juhul kui kontrollmehhanism suudab põlemisõhu vähenemise korral edukalt vähendada ka kütuse juurdevoolu. Suuresti kontrollimata ajas muutuval või puuduliku kontrollmehhanismiga pideval põlemisprotsessil on aga liigõhul suur mõju CO-heitme tekkele.

Metaani (CH_4) esines katsetel gaasikatlaga STI20-Malle ja pelletikatlaga STI20VTP-Pelle põlemisgaasides väga vähesel määral sõltumata liigõhutegurist. Halupuukatlaga LUK-35 sooritatud katsed aga näitasid väga suurt metaani kontsentratsiooni põlemisgaasides. Sarnaselt metaanile esines ka lenduvaid orgaanilisi ühendeid katelde STI20-Malle ja STI20VTP-Pelle põlemisgaasides vähesel määral ning liigõhu mõju sellele oli keeruline hinnata. Seevastu katsed LUK-35 katlaga näitasid jällegi kõrgeid LOÜ kontsentratsioone. Samas ilmnisid ka erinevused kõikide gaasiliste saasteainete kontsentratsioonides hall-lepa ja hariliku kuuse halupuitkütuste kasutamisel, mida tuleks eraldi uurida. Tahkeosakeste kontsentratsioon pelletikatlaga STI20VTP-Pelle teostatud katsetel näitas tõusutrendi suurema liigõhuteguri korral, aga katsetel halupuukatlaga LUK-35 tahkeosakeste kontsentratsioon liigõhuteguri suurenedes hoopis langes.

Lõppjäreldeuseks võib väita, et liigõhul on oluline mõju õhuheitmete tekkele kontrollimata või halvasti kontrollitud põlemisprotsessiga väikekateldes ning vähene või olematu mõju kateldes, kus põlemisprotsess on hästi kontrollitud.

SUMMARY

This master's thesis investigated the impact of excess air on air emissions in small domestic boilers. For this purpose, combustion tests were performed with different excess air modes with a gas boiler STI20-Malle, a pellet boiler STI20VTP-Pelle and a wood-burning boiler LUK-35. The experiments measured the concentrations of gaseous pollutants and particulates in the combustion gases. As a secondary objective, the efficiency of the boilers was calculated on the basis of an indirect balance. The air emissions covered were nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO_2), carbon dioxide (CO), methane (CH_4), volatile organic compounds (VOC) and particulate matter (PM-sum, PM-10 and PM-2.5). Gasier emissions were determined using a method and equipment based on Fourier transform infrared spectroscopy, while gravimetric methods were used to measure particulates.

The results of the experiments showed that nitrogen oxides are produced more in combustion processes with a higher excess air factor, because then more oxygen is needed for the reaction and it is likely that more heat of combustion is released. The concentration of carbon monoxide (CO) in the combustion gases depends little or not at all on the excess air in a controlled continuous combustion process, provided that the control mechanism is also able to successfully reduce the fuel supply in the event of a reduction in the combustion air.

Methane (CH_4) was present in the combustion gases of the STI20-Malle gas boiler and the STI20VTP-Pelle pellet boiler in very small amounts, regardless of the excess air factor. However, tests performed with the LUK-35 wood boiler showed very high concentrations of methane in the combustion gases. Like methane, volatile organic compounds were present in small amounts in the combustion gases of the boilers STI20-Malle and STI20VTP-Pelle and the effect of excess air on it was difficult to assess. Experiments with the LUK-35 boiler again showed high VOC concentrations. However, there were also differences in the concentrations of all gaseous pollutants in the use of gray alder and spruce fuels, which should be examined separately. The concentration of particulate matter in the combustion gases of the STI20VTP-Pelle pellet boiler showed an upward trend with a higher excess air factor, but in the experiments with the LUK-35 wood-burning boiler, the concentration of particulate matter decreased as the excess air factor increased.

In conclusion, excess air has an essential effect on air emissions in small boilers with an uncontrolled or poorly controlled combustion process and little or no effect on boilers with a well-controlled combustion process.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. A. Paist and K. Plamus, Lokaalkatlamajad. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2013.
2. A. Paist and A. Poobus, Soojusgeneraatorid. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2009.
3. A. Ots, Soojustehnika aluskursus. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
4. M. Kaasik *et al.*, Õhusaaste käsiraamat. Eesti Maaülikool.
5. Euroopa Keskkonnaagentuur, Õhk, mida me hingame. Kopenhaagen: Euroopa Liidu Väljaannete Talitus, 2013.
6. J. W. S. Longhurst, P. S. Owen, D. E. Conlan, A. F. R. Watson, and D. W. Raper, Atmospheric pollution: components, mechanisms, control and remediation, Clean Technology and the Environment, 1995.
7. EPA Technical Bulletin, Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled, 1999. [Online] <http://www.epa.gov/ttn/catc> (16.05.2022)
8. P. Anttila, M. Ojanen, M. Puhakka, T. Vuorisalo, and T. Frey, Globaalsed keskkonnaprobleemid. Tartu: Eesti Loodusfoto, 1996.
9. Cerbos, Katel LUK-35.[Online] <https://cerbos.ee/et/puukatlad/679-katel-luk-35.html> (13.05.2022)
10. kyte.ee, Pelletikatel Pelle. [Online] <https://kyte.ee/toode/graanulkutuse-katel-pelle/> (14.05.2022)
11. A. Paist, Õlikütte alternatiivid Eestis (lokaalkatlamaja näitel) Aadu Paist TTÜ Soojustehnika instituut.
12. Pelltech OÜ, PV20a ja PV30a pelletipõletid Kasutusjuhend DK9901D2, 2016. [Online] www.pelltech.eu (15.05.2022)
13. A. Ots, J. Laid, D. Nešumajev, T. Tiikma, Efektiivsed väikekatlad.
14. EPA test method 320, Measurement of Vapor Phase Organic and Inorganic Emissions by Extractive Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy.
15. EVS-EN 13284-1:2017, Stationary source emissions – Determination of low range mass concentration of dust – Part 1: Manual gravimetric method.
16. EVS-EN 12953-11:2003, Shell boilers - Part 11: Acceptance tests.

LISAD

Lisa 1 Kütuste ja koldetuha analüüside tulemused

Katsehälli väikekatelde mõõtmiste proovid, 08.04.2022 - 03.05.2022

	Lab. nr	Niiskus, %	Tuhk kuivas, %	Kütteväärtus, MJ/kg			Elementaar, %				Põlemata osa, %				
				kuiv ülemine	kuiv alumine	tarbimisaine alumine	C	H	N	S					
1.	8 mm pelletid	03.05.2022	14:16	22-494	6,1	0,3	20,27	18,88	17,58	50,57	6,37	0,12	0	X	550°C
2.	Hallupuu, kuusk	28.04.2022	14:29	22-495	6,0	0,3	20,21	18,83	17,55	50,04	6,35	0,08	0	X	X
3.	Hallupuu, hall-hepp	28.04.2022	11:20	22-496	3,8	0,4	19,96	18,58	17,78	49,95	6,36	0,22	0	X	X
4.	Pelle koldetuik	08.04.2022	13:57	22-497	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	63,85
5.	Pelle koldetuik	11.04.2022	14:04	22-498	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	75,05
6.	Pelle koldetuik	14.04.2022	13:28	22-499	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	68,05
7.	Pelle koldetuik	18.04.2022	16:50	22-500	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	62,88
8.	LUK-35 koldetuik	26.04.2022	14:26	22-501	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	33,38
9.	LUK-35 koldetuik	27.04.2022	10:35	22-502	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	67,22
10.	LUK-35 koldetuik	28.04.2022	11:47	22-503	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	35,53
11.	LUK-35 koldetuik	28.04.2022	14:29	22-504	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	47,52
12.	Pelle koldetuik	03.05.2022	14:57	22-505	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	57,44

Proovid laborisse toodud 10.05.2022

Andres Koppel

Lisa 2 Gaaskütuse kvaliteeditunnistus



Kuu keskmine gaasi kvaliteet
Average monthly gas quality

Aprill
April

2022
2022

Kuu keskmine gaasi koostis Monthly average gas composition		Kuu keskmised gaasi omadused Monthly average gas properties			
Komponent Component	mol % mole %	Gaasi parameeter Gas parameter	Ühik Unit	25/0 °C	25/20 °C
metaan methane	96,511	Alumine kütteväärtus Inferior calorific value	kWh/m ³	10,21	9,506
etaan ethane	2,700	Ülemine kütteväärtus Superior calorific value	kWh/m ³	11,32	10,54
propaan propane	0,267	Wobbe arv Wobbe index	kWh/m ³	14,93	13,91
n-butaan n-butane	0,047	Metaani arv Methane number	-	88	
2-metüülpropaan i-butane	0,040	Tihedus Density	kg/m ³	0,7426	0,6916
lämmastik nitrogen	0,363	Suhteline tihedus Relative density	-	0,5744	0,5742
süsihappegaas carbon dioxide	0,053	Vee kastepunkt Water dew point H ₂ O DP	°C	-30,70	
2,2 dimetüülpropaan neo C5	0,000	Vee kastepunkti gaasi rõhk Gas pressure of H ₂ O DP	bar (abs)	30,34	
2-metüülbutaan i-pentane	0,006	Süsivesinike kastepunkt Hydrocarbons dew point HC	°C	-17,56	
n-pentaan n-pentane	0,004	Süsivesinike kastepunkti rõhk Gas pressure of HC DP	bar (g)	27,0	
süsivesinike fraktsioonid hydrocarbon fractions C6+	0,007	Kogu väävel Total Sulphur	mg/m ³	0,15	0,14
hapnik oxygen	0,002	Vesinik + karbonüülsulfiid Hydrogen+Carbonyl sulfide	mg/m ³	0,13	0,12
vesinik hydrogen	0,000	Merkaptaanväävel Mercaptan sulfur	mg/m ³	0,04	0,04

Elering AS , Kadaka tee 42, 12915 Tallinn
Äriregistri kood 110222625, KMKR EE100889639
IBAN EE592200221029807380, Swedbank
Telefon 715 1222, faks 715 1200
info@elering.ee, http://elering.ee

Lisa 3 Gaasikatla STI20-Malle kasutegurite arvutamise protokollid

STI20-Malle 6.04.2022 11:39 - 13:09

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)		C	0,0072	
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik	
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	49,48	MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0	%
	Kütuse niiskussisaldus	W	0	%
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	3,61	%
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	9,04	%
	CO kuivades suitsugaasides	CO	55,49	mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	58,1	°C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	21,5	°C
	Kütuse temperatuur	t _F	21,5	°C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77	g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	4	°C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	21,5	°C
	Baromeetriline rõhk	p _A	98,7	kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	0	°C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	0	%
Katla nominaalkoormus		Q _E	0,0190	MW
Mõõdetud soojusvõimsus		Q _H	0,0156	MW
EN 12953-11 KASUTEGUR		η	94,1	%
KASUTEGUR arvestades				
mittetäielikku põlemist		η*	94,1	%
		U (k=2)	±0.43	%
Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega			1,63	%
Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest			0,02	%
Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga			0,00	%
Soojuskadu katla välisjahtumisest			4,28	%
tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril			0,0	%

STI20-Malle 18.04.2022 11:23 - 13:13

Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik
Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)			
	C	0,0072	
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	49,48 MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0 %
	Kütuse niiskussisaldus	W	0 %
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	2,74 %
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	9,72 %
	CO kuivades suitsugaasides	CO	30,04 mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	83,7 °C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	22,9 °C
	Kütuse temperatuur	t _F	22,9 °C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77 g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	6 °C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	22,9 °C
	Baromeetriline rõhk	p _A	102,1 kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	0 °C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	0 %
Katla nominaalkoormus			
	Q _E	0,019	MW
Mõõdetud soojusvõimsus			
	Q _H	0,0153	MW
EN 12953-11 KASUTEGUR			
	η	92,9	%
KASUTEGUR arvestades			
	η*	92,9	%
mittetäielikku põlemist			
	U (k=2)	±0.43	%
Soojuskadu lahkuvate suitsugaasidega			
		2,77	%
Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest			
		0,01	%
Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga			
		0,00	%
Soojuskadu katla välisjahtumisest			
		4,36	%
tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril			
		0,0	%

STI20-Malle 19.04.2022 10:37 - 12:57

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)			
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	49,48 MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0 %
	Kütuse niiskussisaldus	W	0 %
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	0,44 %
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	8,76 %
	CO kuivades suitsugaasides	CO	2063,49 mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	92,2 °C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	23,3 °C
	Kütuse temperatuur	t _F	23,3 °C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77 g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	6 °C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	23,3 °C
	Baromeetriline rõhk	p _A	102 kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	0 °C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	0 %
<hr/>			
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,019 MW
	Mõõdetud soojusvõimsus	Q _H	0,0128 MW
<hr/>			
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	91,9 %
	KASUTEGUR arvestades		
	mittetäielikku põlemist	η*	91,4 %
<hr/>			
		U (k=2)	±0.43 %
<hr/>			
	Soojuskadu lahkuvate suitsugaasidega		2,86 %
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		0,52 %
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		0,00 %
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		5,22 %
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0 %

STI20-Malle 2.05.2022 12:19 - 14:48

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)			
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	49,48 MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0 %
	Kütuse niiskussisaldus	W	0 %
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	1,39 %
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	12,14 %
	CO kuivades suitsugaasides	CO	2703,1 mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	87,4 °C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	21,8 °C
	Kütuse temperatuur	t _F	21,8 °C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77 g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	6 °C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	21,8 °C
	Baromeetriline rõhk	p _A	100,8 kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	0 °C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	0 %
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,019 MW
	Mõõdetud soojusvõimsus	Q _H	0,0149 MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	92,8 %
	KASUTEGUR arvestades		
	mittetäielikku põlemist	η*	92,0 %
	U (k=2)		±0.43 %
	Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega		2,76 %
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		0,71 %
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		0,00 %
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		4,48 %
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0 %

Lisa 4 Pelletikatla STI20VTP-Pelle kasutegurite arvutamise protokollid

STI20VTP-Pelle 8.04.2022 13:12 - 13:57

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)		C	0,0144	
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik	
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,58	MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0,3	%
	Kütuse niiskussisaldus	W	6,1	%
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	12,934	%
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	9,869	%
	CO kuivades suitsugaasides	CO	51,185	mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	111,46	°C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	23,3	°C
	Kütuse temperatuur	t _F	23,3	°C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77	g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	0	°C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	23,3	°C
	Baromeetriline rõhk	p _A	97,5	kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	57	°C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	63,85	%
Katla nominaalkoormus		Q _E	0,02	MW
Möödetud soojusvõimsus		Q _H	0,0110	MW
EN 12953-11 KASUTEGUR		η	78,1	%
KASUTEGUR arvestades				
mittetäielikku põlemist		η*	78,0	%
		U (k=2)	±0.43	%
Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega			8,36	%
Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest			0,03	%
Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga			1,00	%
Soojuskadu katla välisjahtumisest			12,58	%
tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril			0,0	%

STI20VTP-Pelle 11.04.2022 13:04 - 14:04

Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik
Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)			
	C	0,0144	
a	Tarbinisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,58 MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbinisaine kuivaines	A _k	0,3 %
	Kütuse niiskussisaldus	W	6,1 %
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	12,469 %
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	8,063 %
	CO kuivades suitsugaasides	CO	101,69 mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	114,26 °C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	21,6 °C
	Kütuse temperatuur	t _F	21,6 °C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77 g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	0 °C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	21,6 °C
	Baromeetriline rõhk	p _A	100,7 kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	59 °C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	75,05 %
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,02 MW
	Möödetud soojusvõimsus	Q _H	0,0113 MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	77,9 %
	KASUTEGUR arvestades		
	mittetäielikku põlemist	η*	77,8 %
	U (k=2)		±0.43 %
	Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega		8,21 %
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		0,06 %
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		1,70 %
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		12,19 %
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0 %

STI20VTP-Pelle 14.04.2022 12:28 - 13:28

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)		C	0,0144	
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik	
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,58	MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0,3	%
	Kütuse niiskussisaldus	W	6,1	%
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	10,47	%
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	9,695	%
	CO kuivades suitsugaasides	CO	47,29	mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	109,14	°C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	22,5	°C
	Kütuse temperatuur	t _F	22,5	°C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77	g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	0	°C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	22,5	°C
	Baromeetriline rõhk	p _A	101,7	kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	62	°C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	68,05	%
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,02	MW
	Mõõdetud soojusvõimsus	Q _H	0,0105	MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	79,3	%
	KASUTEGUR arvestades			
	mittetäielikku põlemist	η*	79,3	%
		U (k=2)	±0.43	%
	Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega		6,38	%
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		0,02	%
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		1,20	%
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		13,12	%
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0	%

STI20VTP-Pelle 18.04.2022 15:20 - 16:50

Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik
Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)			
	C	0,0144	
a	Tarbinisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,58 MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbinisaine kuivaines	A _k	0,3 %
	Kütuse niiskussisaldus	W	6,1 %
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	10,872 %
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	9,302 %
	CO kuivades suitsugaasides	CO	50,603 mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	116,4 °C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	23,9 °C
	Kütuse temperatuur	t _F	23,9 °C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77 g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	5 °C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	23,9 °C
	Baromeetriline rõhk	p _A	101,93 kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	60 °C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	62,88 %
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,02 MW
	Möödetud soojusvõimsus	Q _H	0,0103 MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	78,5 %
	KASUTEGUR arvestades		
	mittetäielikku põlemist	η*	78,5 %
	U (k=2)		±0.43 %
	Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega		7,17 %
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		0,03 %
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		0,96 %
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		13,37 %
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0 %

STI20VTP-Pelle 3.05.2022 12:16 - 14:16

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)		C	0,0144	
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik	
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,58	MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0,3	%
	Kütuse niiskussisaldus	W	6,1	%
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	12,12	%
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	9,46	%
	CO kuivades suitsugaasides	CO	66	mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	93,3	°C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	22	°C
	Kütuse temperatuur	t _F	22	°C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77	g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	5	°C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	22	°C
	Baromeetriline rõhk	p _A	101,93	kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	60	°C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	57,44	%
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,02	MW
	Mõõdetud soojusvõimsus	Q _H	0,011	MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	80,2	%
	KASUTEGUR arvestades			
	mittetäielikku põlemist	η*	80,2	%
		U (k=2)	±0.43	%
	Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega		6,04	%
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		0,04	%
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		0,76	%
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		12,99	%
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0	%

Lisa 5 Pelletikatla STI20VTP-Pelle tahkeosakeste kontsentratsiooni mõõtmise protokollid

Tööprotokoll nr.1

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

STI20VTP-Pelle

Kuupäev: 8.04.2022

Kellaeg: 13:12 13:57

Kütus 8 mm pelletid

Mõõtekoht: Suitsukäik

Põlemisgaaside koostis

rCO ₂ =	0,099	a
rO ₂ =	0,129	2,61
rCO=	0,003	
rN ₂ =	0,77	

Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
Enne	Pärast	Enne	Pärast
33,973	33,993	-	-
15,333	15,335	-	-
14,332	14,335	-	-

Filter

Tahkete osakeste mass, g	m	0,0250	Filter enne		
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,0776	Kuivati1 enne	6,4156	pärast 6,4897
Temp. gaasikellas, °C	T _a	21	Kuivati2 enne	1,656	pärast 1,66
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	1,345	Kell enne	645,1366	pärast 646,4814
Õhurõhk, kPa	p _b	97,5	LEKKE KONTROLL Läbis x		
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,0253	Kell enne Kell +1 min		
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	97,47	Kanali möödud, m		
Temp. kanalis, °C	T _s	111	F	Pikkus	Laius
Kanali pindala, m ²	A	0,011	0,120		
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a			
Mõõtepunktide arv		1 2 3			
Düüsi f, mm		14			
Punkti aeg, min		16			

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624

- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
- b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
- b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
- c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
- d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
- e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
- f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
- g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel sama 6 % O₂ juures
- h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
- h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
- h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides

p _{dn}	1,346	kg/m ³
X _s	0,05	kg/kg
p _{wn}	1,31	kg/m ³
p _{ws}	0,89	kg/m ³
V _{ws}	0,7	m/s
q _{ws}	0,01	m ³ /s
q _{wn}	0,01	Nm ³ /s
q _{dn}	0,01	Nm ³ /s
	0,003	Nm ³ /s
V _{dn}	1,20	Nm ³
H ₂ O	7,4	%
C _{wn}	19,3	mg/Nm ³
C _{dn}	38,7	mg/Nm ³
U _{Cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,000	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂ mõõtemääramatus +/-

j) Tahkete osakeste masskulu kanalis +/-
mõõtemääramatus

Tööprotokoll nr.2

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

STI20VTP-Pelle

Kuupäev: 11.04.2022

Kellaeg: 13:04 14:04

Kütus 8 mm pelletid

Mõõtekoht: Suitsukäik

Põlemisgaaside koostis

rCO ₂ =	0,081	a
rO ₂ =	0,125	2,49
rCO=	0,003	
rN ₂ =	0,79	

Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
Enne	Pärast	Enne	Pärast
32,202	32,221	-	-
14,782	14,784	-	-
13,218	13,218	-	-

H
8
16

Filter

Tahkete osakeste mass, g	m	0,0210	Filter enne		
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,0846	Kuivati1 enne	6,4798	pärast 6559,2
Temp. gaasikellas, °C	T _a	24	Kuivati2 enne	1,6601	pärast 1666,7
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	1,6136	Kell enne	646,4814	pärast 648,095
Õhurõhk, kPa	p _b	100,7	LEKKE KONTROLL	Läbis x	
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,0289	Kell enne	Kell +1 min	
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	100,67	Kanali mõõdud, m		
Temp. kanalis, °C	T _s	114	F Pikkus Laius		
Kanali pindala, m ²	A	0,011	0,120		
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a			
Mõõtepunktide arv	1	4			
	3	2	3,9		
Düüsi f, mm	14	3	4,1		
Punkti aeg, min	16	4			
	5				
	6				

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624

- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel
sama 6 % O₂ juures
h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides

i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂
mõõtemääramatus +/-

j) Tahkete osakeste masskulu kanalis
mõõtemääramatus +/-

p _{dn}	1,332	kg/m ³
X _s	0,04	kg/kg
p _{wn}	1,30	kg/m ³
p _{ws}	0,91	kg/m ³
V _{ws}	2,1	m/s
q _{ws}	0,02	m ³ /s
q _{wn}	0,02	Nm ³ /s
q _{dn}	0,02	Nm ³ /s
	0,009	Nm ³ /s
V _{dn}	1,47	Nm ³
H ₂ O	6,7	%
C _{wn}	13,3	mg/Nm ³
C _{dn}	25,3	mg/Nm ³
U _{cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,000	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

Tööprotokoll nr. 3

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

STI20VTP-Pelle

Kuupäev: 14.04.2022

Kellaeg: 12:28 13:28

Kütus 8 mm pelletid

Mõõtekoht: Suitsukäik

Põlemisgaaside koostis

rCO ₂ =	0,097	a
rO ₂ =	0,105	2,00
rCO=	0,003	
rN ₂ =	0,80	

Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
Enne	Pärast	Enne	Pärast
32,205	32,230	-	-
14,785	14,785	-	-
13,219	13,219	-	-

Filter

Tahkete osakeste mass, g	m	0,0250	Filter enne		pärast	
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,1050	Kuivati1 enne	6,5112	pärast	6,7334
Temp. gaasikellas, °C	T _a	25	Kuivati2 enne	1,6803	pärast	1,6527
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	1,650	Kell enne	651,1456	pärast	652,7954
Õhurõhk, kPa	p _b	101,7	LEKKE KONTROLL	Läbis x		
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,0226	Kell enne	Kell +1 min		
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	101,68	Kanali möödud, m			
Temp. kanalis, °C	T _s	109				
Kanali pindala, m ²	A	0,011	F	Pikkus	Laius	
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a	0,120			
Mõõtepunktide arv	1	0,1				
	3	2				
Düüsi f, mm	14	3				
Punkti aeg, min	16	4				
		5				
		6				

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624

- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
 b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
 b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
 c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
 d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
 e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
 f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
 g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel
 sama 6 % O₂ juures
 h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
 h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
 h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides
 i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂

mõõtemääramatus

+/-

- j) Tahkete osakeste masskulu kanalis

mõõtemääramatus

+/-

p _{dn}	1,340	kg/m ³
X _s	0,05	kg/kg
p _{wn}	1,30	kg/m ³
p _{ws}	0,93	kg/m ³
V _{ws}	0,9	m/s
q _{ws}	0,01	m ³ /s
q _{wn}	0,01	Nm ³ /s
q _{dn}	0,01	Nm ³ /s
	0,005	Nm ³ /s
V _{dn}	1,52	Nm ³
H ₂ O	7,9	%
C _{wn}	15,2	mg/Nm ³
C _{dn}	23,5	mg/Nm ³
U _{cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,000	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

Tööprotokoll nr.4

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

STI20VTP-Pelle

Kuupäev: 18.04.2022

Kellaeg: 15:20 16:50

Kütus 8 mm pelletid

Mõõtekoht: Suitsukäik

Põlemisgaaside koostis

rCO ₂ =	0,093	a
rO ₂ =	0,109	2,09
rCO=	0,003	
rN ₂ =	0,80	

Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
Enne	Pärast	Enne	Pärast
32,973	33,007	-	-
15,333	15,333	-	-
14,333	14,333	-	-

Filter

Tahkete osakeste mass, g	m	0,0340	Filter enne			
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,1573	Kuivati1 enne	6,2563	pärast	6,3463
Temp. gaasikellas, °C	T _a	25	Kuivati2 enne	1,6899	pärast	1,6955
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	2,614	Kell enne	652,7954	pärast	655,4092
Õhurõhk, kPa	p _b	101,9	LEKKE KONTROLL	Läbis x		
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,019	Kell enne	Kell +1 min		
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	101,88	Kanali möödud, m			
Temp. kanalis, °C	T _s	116	F			
Kanali pindala, m ²	A	0,011	0,120			
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a				
Mõõtepunktide arv	1	1,6				
	3	2				
Düüsi f, mm	14	3				
Punkti aeg, min	16	4				
	5					
	6					

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624

- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
 b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
 b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
 c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
 d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
 e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
 f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
 g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel
 sama 6 % O₂
 juures
 h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
 h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
 h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides

i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂
 mõõtemääramatus +/-

j) Tahkete osakeste masskulu kanalis
 mõõtemääramatus +/-

p _{dn}	1,338	kg/m ³
X _s	0,05	kg/kg
p _{wn}	1,30	kg/m ³
p _{ws}	0,92	kg/m ³
V _{ws}	1,5	m/s
q _{ws}	0,02	m ³ /s
q _{wn}	0,01	Nm ³ /s
q _{dn}	0,01	Nm ³ /s
	0,008	Nm ³ /s
V _{dn}	2,41	Nm ³
H ₂ O	7,5	%
C _{wn}	13,1	mg/Nm ³
C _{dn}	21,0	mg/Nm ³
U _{Cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,000	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

Tööprotokoll nr. 8

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

STI20VTP-Pelle

Kuupäev: 05.05.2022

Kellaeg: 12:16 14:16

Kütus: 8 mm pelletid

Mõõtekoht: Suitsukäik

Põlemisgaaside koostis

rCO ₂ =	0,095	a
rO ₂ =	0,122	2,40
rCO=	0,003	
rN ₂ =	0,78	

D	Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
	Enne	Pärast	Enne	Pärast
4	32,990	33,028	-	-
4	15,486	15,487	-	-
12	14,358	14,358	-	-

Tahkete osakeste mass, g	m	0,0390	Filter enne		
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,1876	Kuivati1 enne	6,3492	pärast 6,4302
Temp. gaasikellas, °C	T _a	24,5	Kuivati2 enne	1,686	pärast 1,7107
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	3,401	Kell enne	659,939	pärast 663,3396
Õhurõhk, kPa	p _b	100,5	LEKKE KONTROLL	Läbis x	
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,239	Kell enne	Kell +1 min	
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	100,26		Kanali mõõdud, m	
Temp. kanalis, °C	T _s	92		F	Pikkus
Kanali pindala, m ²	A	0,011		0,120	Laius
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a			
Mõõtepunktide arv		1			
		2			
	3	2			
Düüsi f, mm	14	3			
Punkti aeg, min	16	4			
		5			
		6			

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624



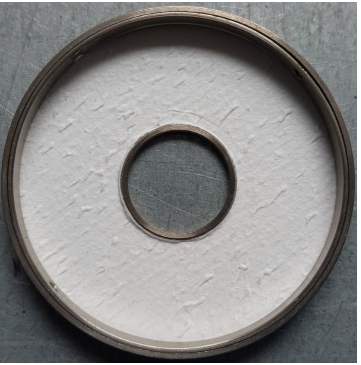

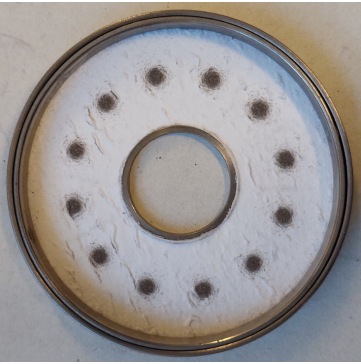
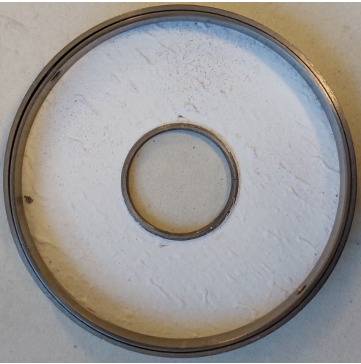

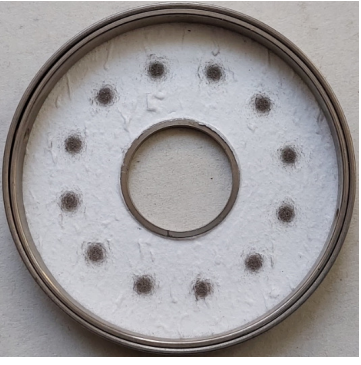

- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel
sama 6 % O₂ juures
h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides


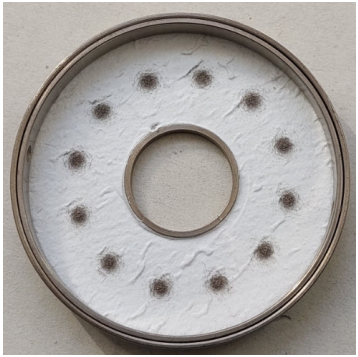
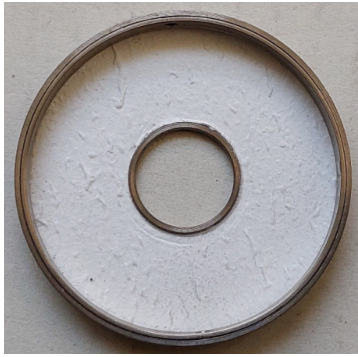



i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂ mõõtemääramatus +/-

j) Tahkete osakeste masskulu kanalis
mõõtemääramatus +/-

p _{dn}	1,342	kg/m ³
X _s	0,05	kg/kg
p _{wn}	1,30	kg/m ³
p _{ws}	0,96	kg/m ³
V _{ws}	1,4	m/s
q _{ws}	0,02	m ³ /s
q _{wn}	0,01	Nm ³ /s
q _{dn}	0,01	Nm ³ /s
	0,006	Nm ³ /s
V _{dn}	3,10	Nm ³
H ₂ O	7,0	%
C _{wn}	11,7	mg/Nm ³
C _{dn}	21,6	mg/Nm ³
U _{Cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,000	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

Lisa 6 Pelletikatla STI20VTP-Pelle tahkeosakeste filtrite fotod

STI20VTP-Pelle 8.04.2022 I katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10
STI20VTP-Pelle 11.04.2022 II katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10
STI20VTP-Pelle 14.04.2022 III katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10

STI20VTP-Pelle 18.04.2022 IV katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10
STI20VTP-Pelle 3.05.2022 V katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10

Lisa 7 Halupuukatla LUK-35 kasutegurite arvutamise protokollid

LUK-35 26.04.2022 12:14 - 13:43

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)		C	0,0144	
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik	
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,78	MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0,4	%
	Kütuse niiskussisaldus	W	3,8	%
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	14,03	%
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	4,93	%
	CO kuivades suitsugaasides	CO	5841,045	mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	182,8	°C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	22,56	°C
	Kütuse temperatuur	t _F	22,6	°C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77	g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	8	°C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	22,6	°C
	Baromeetriline rõhk	p _A	100,8	kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	33	°C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	33,53	%
Katla nominaalkoormus		Q _E	0,035	MW
Mõõdetud soojusvõimsus		Q _H	0,0192	MW
EN 12953-11 KASUTEGUR		η	72,1	%
KASUTEGUR arvestades				
mittetäielikku põlemist		η*	67,5	%
		U (k=2)	±0.43	%
Soojuskadu lahkuvate suitsugaasidega			17,52	%
Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest			4,53	%
Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga			0,38	%
Soojuskadu katla välisjahtumisest			10,03	%
tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril			0,0	%

LUK-35 27.04.2022 10:11 - 12:03

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)		C	0,0144	
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik	
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,55	MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0,3	%
	Kütuse niiskussisaldus	W	6	%
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	14,61	%
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	5,21	%
	CO kuivades suitsugaasides	CO	1063,24	mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	172,3	°C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	19,5	°C
	Kütuse temperatuur	t _F	19,5	°C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77	g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	6	°C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	19,5	°C
	Baromeetriline rõhk	p _A	102,1	kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	88	°C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	67,22	%
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,035	MW
	Mõõdetud soojusvõimsus	Q _H	0,0133	MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	66,6	%
	KASUTEGUR arvestades			
	mittetäielikku põlemist	η*	65,7	%
		U (k=2)	±0.43	%

LUK-35 28.04.2022 10:43 - 12:04

Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)			
Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik
a	Tarbimisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,78 MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbimisaine kuivaines	A _k	0,4 %
	Kütuse niiskussisaldus	W	3,8 %
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	15,86 %
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	3,56 %
	CO kuivades suitsugaasides	CO	2672,818 mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	161,15 °C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	16,25 °C
	Kütuse temperatuur	t _F	16,25 °C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77 g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	5 °C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	16,25 °C
	Baromeetriline rõhk	p _A	102,3 kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	88 °C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	33,53 %
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,035 MW
	Möödetud soojusvõimsus	Q _H	0,0208 MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	70,0 %
	KASUTEGUR arvestades		
	mittetäielikku põlemist	η*	67,1 %
	U (k=2)		±0.43 %
	Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega		20,36 %
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		2,85 %
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		0,38 %
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		9,26 %
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0 %

LUK-35 28.04.2022 13:45 - 16:01

Suurus	Tähis	Väärtus	Ühik
Kasutatavast kütusest tulenev tegur (puüt=0.0144; gaas või õli=0.0072)			
	C	0,0144	
a	Tarbinisaine alumine kütteväärtus	NCV	17,55 MJ/kg
	Tuhk kütuse/tarbinisaine kuivaines	A _k	6 %
	Kütuse niiskussisaldus	W	5,49 %
b	O ₂ kuivades suitsugaasides	O ₂	17,7731 %
	CO ₂ kuivades suitsugaasides	CO ₂	2,744835 %
	CO kuivades suitsugaasides	CO	1477,866 mg/Nm ³
c	Suitsugaaside temperatuur	t _G	182,8 °C
d	Põlemisõhu temperatuur	t _{Go}	21,8 °C
	Kütuse temperatuur	t _F	21,8 °C
e	Põlemisõhu niiskussisaldus	m _{Go}	4,77 g/m ³
f	Välisõhu temperatuur	t _A	8 °C
	Õhutemperatuur katlamajas	t _õ	21,8 °C
	Baromeetriline rõhk	p _A	100,8 kPa
g	Tuha temperatuur	t _{Ash}	33 °C
h	Põlemata osa tuhas	u _{Ash}	47,52 %
	Katla nominaalkoormus	Q _E	0,035 MW
	Möödetud soojusvõimsus	Q _H	0,0189 MW
	EN 12953-11 KASUTEGUR	η	44,6 %
	KASUTEGUR arvestades		
	mittetäielikku põlemist	η*	42,2 %
	U (k=2)		±0.43 %
	Soojuskadu lahkvate suitsugaasidega		34,91 %
	Soojuskadu lendosade mittetäielikust põlemisest		2,38 %
	Soojuskadu põlemata osast tuhas ja tuha entalpiaga		10,29 %
	Soojuskadu katla välisjahtumisest		10,19 %
	tegelik soojusvõimsus katla kasuteguril		0,0 %

Lisa 8 Halupuukatla LUK-35 tahkeosakeste kontsentratsiooni mõõtmise protokollid

Tööprotokoll nr. 5

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

XXX

Kuupäev: 27.04.2022
 Kellaeg: 10:15 10:35
 Kütus: halupuit (kuusk)
 Mõõtekoht: suitsukäik

Põlemisgaaside koostis			Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
			Enne	Pärast	Enne	Pärast
rCO ₂ =	0,052	a	33,126	33,163	-	-
rO ₂ =	0,146	3,32	15,225	15,229	-	-
rCO=	0,003		15,322	15,323	-	-
rN ₂ =	0,80					

Tahkete osakeste mass, g			Filter		
	m		Filter enne		pärast
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,0253	Kuivati1 enne	6,2966	pärast 6,3208
Temp. gaasikellas, °C	T _a	21	Kuivati2 enne	1,6775	pärast 1,679
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	0,512	Kell enne	658,1906	pärast 658,7028
Õhurõhk, kPa	p _b	100,5	LEKKE KONTROLL Läbis x		
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,0322	Kell enne Kell +1 min		
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	102,1	Kanali mõõdud, m		
Temp. kanalis, °C	T _s	172	F Pikkus Laius		
Kanali pindala, m ²	A	0,008	0,100		
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a			
Mõõtepunktide arv		1 2 3			
Düüsi f, mm		14 3	1,7		
Punkti aeg, min		16 4			
		5			
		6			

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624

- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
- b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
- b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
- c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
- d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
- e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
- f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
- g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel sama 6 % O₂ juures
- h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
- h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
- h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides
- i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂
 mõõtemääramatus +/-
- j) Tahkete osakeste masskulu kanalis
 mõõtemääramatus +/-

p _{dn}	1,315	kg/m ³
X _s	0,04	kg/kg
p _{wn}	1,28	kg/m ³
p _{ws}	0,79	kg/m ³
V _{ws}	2,9	m/s
q _{ws}	0,02	m ³ /s
q _{wn}	0,01	Nm ³ /s
q _{dn}	0,01	Nm ³ /s
	0,006	Nm ³ /s
V _{dn}	0,47	Nm ³
H ₂ O	6,3	%
C _{wn}	83,4	mg/Nm ³
C _{dn}	210,5	mg/Nm ³
U _{Cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,001	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

Tööprotokoll nr. 6

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

Halupuukatel

Kuupäev: 28.04.2022

Kellaeg: 10:55 10:20

0,063618 12,97649

Kütus halupuu (hall-lepp)

Mõõtekoht: Suitsikäik

Põlemisgaaside koostis

rCO ₂ =	0,064	a
rO ₂ =	0,130	2,65
rCO=	0,003	
rN ₂ =	0,80	

Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
Enne	Pärast	Enne	Pärast
31,997	32,031	-	-
15,341	15,343	-	-
14,714	14,717	-	-

Filter

Tahkete osakeste mass, g	m	0,0390	Filter enne		
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,0276	Kuivati1 enne	6,3118	pärast 6,3462
Temp. gaasikellas, °C	T _a	18	Kuivati2 enne	1,6789	pärast 1,6819
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	0,5204	Kell enne	658,7028	pärast 659,2232
Õhurõhk, kPa	p _b	102,3	LEKKE KONTROLL	Läbis	x
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,0322	Kell enne		Kell +1 min
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	102,27	Kanali möödud, m		
Temp. kanalis, °C	T _s	240	F	Pikkus	Laius
Kanali pindala, m ²	A	0,008	0,100		
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a			
Mõõtepunktide arv	1	14,3			
	3	2			
Düüsi f, mm	14	3			
Punkti aeg, min	16	4			
		5			
		6			

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624

- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
 b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
 b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
 c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
 d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
 e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
 f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
 g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel
 sama 6 % O₂ juures
 h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
 h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
 h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides

i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂ mõõtemääramatus +/-

j) Tahkete osakeste masskulu kanalis mõõtemääramatus +/-

p _{dn}	1,321	kg/m ³
X _s	0,04	kg/kg
p _{wn}	1,29	kg/m ³
p _{ws}	0,69	kg/m ³
V _{ws}	3,8	m/s
q _{ws}	0,03	m ³ /s
q _{wn}	0,02	Nm ³ /s
q _{dn}	0,01	Nm ³ /s
	0,008	Nm ³ /s
V _{dn}	0,49	Nm ³
H ₂ O	6,5	%
C _{wn}	73,9	mg/Nm ³
C _{dn}	149,2	mg/Nm ³
U _{Cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,001	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

Tööprotokoll nr. 7

Tahkete osakeste kontsentratsiooni mõõtmine

XXX

Kuupäev: 28.04.2022
 Kellaeg: 13:59 14:29
 Kütus halupuit (kuusk)
 Mõõtekoht: Suitsukäik

Põlemisgaaside koostis

rCO ₂ =	0,027	a
rO ₂ =	0,162	4,45
rCO=	0,003	
rN ₂ =	0,81	

Filtri kaalumise, g		Düüs kaalumise, g	
Enne	Pärast	Enne	Pärast
32,206	32,230	-	-
14,965	14,966	-	-
15,112	15,113	-	-

C
3
11

Filter

Tahkete osakeste mass, g	m	0,0260	Filter enne		
Kondenseeritud vee hulk, kg	m _c	0,0184	Kuivati1 enne	6,3462	pärast 6,3582
Temp. gaasikellas, °C	T _a	22	Kuivati2 enne	1,6819	pärast 1,686
Gaasiproovi maht, m ³	V _{wa}	0,7156	Kell enne	659,2232	pärast 659,9388
Õhurõhk, kPa	p _b	102,1	LEKKE KONTROLL	Läbis x	
Ülerõhk kanalis, kPa	p _s -p _b	-0,0322	Kell enne	Kell +1 min	
Abs. rõhk kanalis, kPa	p _s	102,07	Kanali möödud, m		
Temp. kanalis, °C	T _s	150	F	Pikkus	Laius
Kanali pindala, m ²	A	0,008	0,100		
Dünaamilised rõhud, Pa	p _{dyn}	a			
Mõõtepunktide arv	1	16,2			
	3	2			
Düüsi f, mm	14	3			
Punkti aeg, min	16	4			
		5			
		6			

Arvutused lähtudes standarditest SFS3866 ja SFS5624


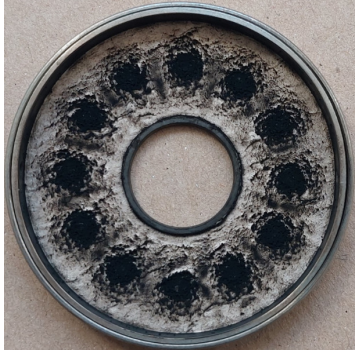
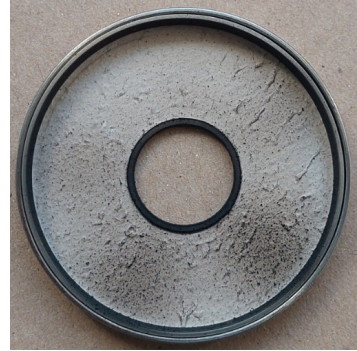


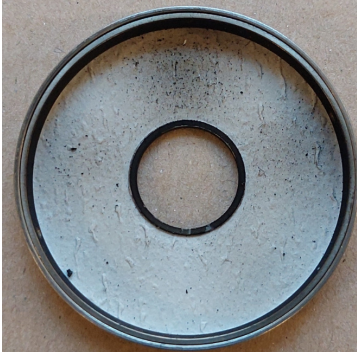

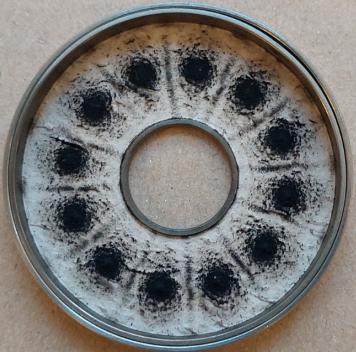
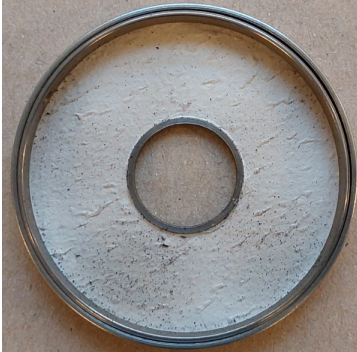
- a) Kuiva põlemisgaasi tihedus normaaltingimustel
 b1) Kondenseerunud vee ja kuiva gaasi masssuhe
 b2) Märja põl. gaasi tihedus normaaltingimustel
 c) Märja põlemisgaasi tihedus kanalis
 d) Põlemisgaasi keskmine kiirus kanalis
 e) Märja põlemisgaasi mahtkulu kanalis
 f) Märja põlemisgaasi mahtkulu normaaltingimustel
 g) Kuiva põlemisgaasi kulu kanalis normaaltingimustel
 sama 6 % O₂ juures
 h) Kuiva gaasiproovi maht normaaltingimustel
 h1) Põlemisgaaside niiskusesisaldus
 h2) Tahkete heitmete kontsentratsioon märgades põlemisgaasides

p _{dn}	1,300	kg/m ³
X _s	0,02	kg/kg
p _{wn}	1,28	kg/m ³
p _{ws}	0,83	kg/m ³
V _{ws}	3,9	m/s
q _{ws}	0,03	m ³ /s
q _{wn}	0,02	Nm ³ /s
q _{dn}	0,02	Nm ³ /s
	0,006	Nm ³ /s
V _{dn}	0,67	Nm ³
H ₂ O	3,3	%
C _{wn}	37,7	mg/Nm ³
C _{dn}	123,5	mg/Nm ³
U _{Cdn} (k=2)	0,003	g/Nm ³
q _e	0,001	g/s
U _{qe} (k=2)	0,020	g/s

i) Tahkete osakeste kontsentratsioon kuivades suitsugaasides, 6 % O₂
 mõõtemääramatus +/-

j) Tahkete osakeste masskulu kanalis
 mõõtemääramatus +/-

Lisa 9 Halupuukatla LUK-35 tahkeosakeste filtrite fotod

LUK-35 27.04.2022 II katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10
LUK-35 28.04.2022 III katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10
LUK-35 28.04.2022 IV katse		
		
PM-sum	PM-2,5	PM-10