



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut
Soojusenergeetika õppetool

MSE70LT

Reeno Niinepuu

Tahkete biokütuste katlastend

Autor taotleb
tehnikateaduse magistri
akadeemilist kraadi

Tallinn
2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”201... a.

..... allkiri

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2015 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Reeno Niinepuu, 144080

Õppekava: MASM 02/09

Eriala: soojusenergeetika

Juhendaja: vanemteadur PhD Siim Link

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

Tahkete biokütuste katlastend

Solid biofuel laboratory-scale combustion test rig

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Katsestend	27.02.2015
2.	Mõõtmismeetodid	20.03.2015
3.	Ülevaade seadmetest	10.04.2015
4.	Seadmete valik ja stendi skeem	29.04.2015
5.	Kokkuvõtted, järeldused ja lisad	18.05.2015

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Töötada välja tahkete biokütuste katlastendi kontseptsioon. Anda ülevaade seadmetest ja standarditest tulenevatest nõudmistest. Valida sobivad seadmed ja koostada põhimõtteskeem.

Töö keel: eesti

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt 18.05.2015

Töö esitamise tähtaeg 25.05.2015

Üliõpilane: Reeno Niinepuu

/allkiri/

kuupäev.....

Juhendaja: Siim Link

/allkiri/

kuupäev.....

SISUKORD

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE	3
SISUKORD	4
EESSÕNA.....	9
SISSEJUHATUS.....	10
1. KATSESTEND	14
1.1. Üldine ülevaade	14
1.1.1. Katelseade	14
1.1.2. Mõõtesektsioon	14
1.1.3. Toodetud soojus	15
1.2. Katseprotseduur	15
1.2.1. Katla võimsuse katsetamine	15
1.2.2. Soojustootluse ja efektiivsuse määramine.....	16
1.2.3. Heitmete analüüsimine	16
1.2.4. Katla veetakistuse määramine	17
1.2.5. Katla pinnatemperatuur	17
1.2.6. Elektrikulu	18
1.3. Soojuskaod ja bilanss.....	18
1.3.1. Kütuse koostis ja kütteväärtus.....	18
1.3.2. Liigõhutegur	18
1.3.3. Soojuskadu lahkuva suitsugaasiga	19
1.3.4. Soojuskadu kütuse keemilisest mittetäielikust põlemisest.....	20
1.3.5. Soojuskadu kütuse mehaanilisest mittetäielikust põlemisest	20
1.3.6. Soojuskadu katla välisjahtumisest.....	21
1.3.7. Kasutegur	23
1.3.8. Katlas kütteveele antud soojushulk	24

1.3.9.	Kolde soojuskoormus	24
1.3.10.	Soojusbilansi võrrand	24
1.4.	Katsekütus	24
1.4.1.	Kütusekoormuse leidmine	25
1.5.	Katseprotokoll	25
2.	MÕÕTMISMEETODID	26
2.1.	Mõõdetavad väärtused ja algandmed	26
2.2.	Mõõteseadmete määramatus.....	27
2.3.	Gaasianalüüs	28
2.3.1.	FTIR tehnoloogia	28
2.3.2.	NDIR tehnoloogia	29
2.4.	Tahked osakesed.....	30
2.4.1.	Suitsugaaside kiirus.....	30
2.5.	Temperatuuri mõõtmine	31
2.6.	Kulu arvutamine	32
2.6.1.	Mahtkiirus ja kiirus	32
2.6.2.	Soojusliku hajuvuse mõõtmine	33
2.6.3.	Massikulu arvutamine	34
2.6.4.	Soojusarvesti	34
3.	ÜLEVAADE SEADMETEST	36
3.1.	Katlad.....	36
3.1.1.	Katelde tüübid	36
3.2.	Põletite tüübid.....	38
3.3.	Kommerts	40
3.3.1.	Herz	40
3.3.2.	KWB.....	43
3.4.	Gaasianalüsaatorid.....	47

3.4.1.	Gasmet.....	47
3.4.2.	ABB.....	51
3.5.	Peenosakesed	52
3.5.1.	Paul Gothe	52
3.6.	Õhu massikulu	55
3.7.	Soojusarvesti.....	57
3.8.	Abiseadmete valimine	57
3.8.1.	Akumulatsioonipaak.....	57
3.8.2.	Membraanpaisupaak.....	58
3.8.3.	Ringluspump	59
4.	SEADMETE VALIK JA STENDI SKEEM.....	60
4.1.	Katel.....	60
4.1.1.	Kütusepunker	63
4.2.	Gaasianalüüsi süsteem.....	63
4.3.	Peenosakesed	64
4.4.	Temperatuur ja õhu niiskus	64
4.4.1.	Katsehalli temperatuur ja õhuniiskus	64
4.4.2.	Temperatuuri sondid	65
4.4.3.	Signaali konverterid	66
4.5.	Katla ja kütusepunkri kaalumine	66
4.5.1.	Katel	66
4.5.2.	Kütusepunker	67
4.6.	Akumulatsioonipaak.....	67
4.7.	Membraanpaisupaak.....	68
4.8.	Ringluspump.....	68
4.9.	Stendi skeem.....	70
4.10.	Stendi seadmete ja komponentide loetelu.....	71

KOKKUVÕTE.....	73
SUMMARY	76
KASUTATUD KIRJANDUS	78
LISA 1. Seadmete/vahendite hinnad.....	85
LISA 2. Lokaalsetes seadmetes kasutatav kütus.....	86
LISA 3. Maaülikooli katlalabor	87

Tabelite loetelu

Tabel 1.1. Katsekütused	25
Tabel 2.1. Mõõtevahenditele lubatud määramatused.....	27
Tabel 3.1. Referentsmeetodid FTIR tehnoloogiale	49
Tabel 3.2. Referentsmeetodid NDIR tehnoloogiale	52
Tabel 4.1. Nõutud vee parameetrid	61
Tabel 4.2. Lahkuvate suitsugaaside massi- ja mahukulu	61
Tabel 4.3. Heitmete kontsentratsioonid lahkuvas suitsugaasis	62
Tabel 4.4. Biokütustel töötavad automaatse kütuse etteande süsteemiga katelseadmete emisiooniklassid, mille soojusvõimsus on kuni 50 kW	62
Tabel L1.1. Seadmete/vahendite hinnad	85

Selede loetelu

Sele 2.1. IR spektroskoopia skeem.....	29
Sele 2.2. Massikulu arvutamine dünaamilisest rõhust	34
Sele 3.1. Pelletstar, soojuslik võimsus 10 – 60 kW.....	40
Sele 3.2. Firematic, soojuslik võimsus 20 – 60 kW	42
Sele 3.3. Katelseade Easyfire, soojuslik võimsus 8 – 35 kW.....	43
Sele 3.4. Seadme Easyfire pöörleva plaadiga põleti	44
Sele 3.5. Multifire II, soojuslik võimus 20 – 120 kW	45
Sele 3.6. Pöörlev restisüsteem.....	46

Sele 3.7. Portatiivne gaasianalüsaator DX4000 ja proovi võtmise seade	47
Sele 3.8. Gaasianalüüsisüsteem CEMS II	49
Sele 3.9. Peenosakeste Summaarse kontsentratsiooni mõõtmine	53
Sele 3.10. Osakeste liikumistrajektor kaskaadimpaktoris sõltuvalt nende suurusest.....	55
Sele 3.11. Sensyflow FMT700-P	56
Sele 3.12. Konstantse temperatuuri erinevuse meetod.....	56
Sele 4.1. Katelseadme KWB 22 kW kabariitmõõtmised.....	63
Sele 4.2. Impactor Johnas kuumutatavas korpuses	64
Sele 4.3. suitsugaasi temperatuuri mõõtmine mitmes punktis	65
Sele 4.4. Grundfos Alpha2 25 – 60 karakteristikud	69
Sele 4.5. katlastendi skeem	70
Sele 4.6. Katlastendi skeem (veeliin)	71
Sele L2.1. Kütuseliik lokaalset või individuaalset küteliiki kasutavatel elanikel.....	86
Sele L3.1. Eesti Maailikooli katlalabor	87

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema kerkis esile seoses autori bakalaureuse astme lõputööga, mis võrdles tahkete kütuste tehnilisel analüüsil kasutatavaid erinevaid standardmeetodeid.

Tahkel biokütusel töötava katlastendi loomise initsiatiiv tuli TTÜ mehaanikateaduskonna vanemteadur PhD Siim Link'ilt, kes oli käesoleva töö juhendajaks. Autori bakalaureuse astme lõputööd juhendas samuti Siim Link.

Avaldan tänu TTÜ soojustehnika instituudi töötajatele ja õppejõududele, kes aitasid kaasa töö valmimisele: professor Aadu Paist, vanemteadur Jüri Loosaar, teadur Teet Parve, teadur Ülo Kask, assistent Allan Vragar.

SISSEJUHATUS

Käesolev töö kirjeldab Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituuti planeeritava väikese võimsusega katlastendi kontseptsiooni ja põhimõtteskeemi loomist. Töös antakse põhjalik ülevaade sobivatest seadmetest ja meetoditest, mis sobivad huvipakkuvate väärtuste mõõtmiseks. Eesmärk on enamikest mõõdetavatest parameetritest saada digitaalside väljund, mis võimaldab katse jälgimist ja seadistamist arvutist. Lisaks võimaldab see katseandmeid hiljem oluliselt lihtsamini töödelda ja/või vajadusel korrigeerida.

Stendi kontseptsiooni loomisel on arvestatud vastavatest Eesti Standarditest EVS (mitte ametlikult Eesti Vabariigi standard) tulenevaid nõudmisi. Tihti põhinevad rahvuslikud standardid rahvusvaheliste standardiorganisatsioonide standarditel ja sellest tulenevalt võivad erinevate riikide rahvuslike standardiorganisatsioonide standardid olla sisult identsed. Standardile, millel konkreetne ülevõetud standard põhineb, lisatakse tähise ette rahvusliku organisatsiooni tähis. Enamik töös kasutatud standardeid põhineb Euroopa Standardiseerimise Komisjoni (CEN: prantsuse keelsest nimetusest tulenev akronüüm – *Comité Européen de Normalisation*) poolt ratifitseeritud Euroopa Standarditel (EN: inglise keelest nimetusest tulenev akronüüm – *European Norm*) või Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni (ISO: tuleneb kreekakeelsest sõnast *isos - võrdne*) standarditel. Standardites kasutatava terminoloogia defineerimiseks on iga standardiorganisatsioon andnud välja dokumendi, kus on standardites esineva terminoloogia tähendus lahti mõtestatud. Standardmeetodites on enamasti viide dokumendile, mis defineerib kasutatavad mõisted. [32]

Stendi kavandamise eesmärgid on järgnevad:

- parandada õppe- ja teadustöö kvaliteeti,
- luua paremad tingimused väikekatelde katsetamiseks ja arendamiseks soojustehnika instituudis,
- teha ettepanekuid seadmete konstruktsiooni täiendamiseks sõltuvalt kasutatavst kütusest,
- teha koostööd katelseadmete ja biokütuste tootjatega,
- katsekütuste parameetrite kvalitatiivne analüüs,
- mittekonventsionaalsete väärindatud biokütuste põlemisomaduste uurimine,
- heitmete analüüsimine ja võrdlemine piirnormidega.

Stendis sooritatud katsed võimaldavad erinevate biokütuste põlemisomaduste uurimist ja optimeerida põletusseadmete parameetreid. Kogutud teave võimaldab leida kateldele optimaalsed töörežiimid, sõltuvalt kasutatud kütusest. Lisaks saab arvutuste käigus leitud teoreetilisi andmeid kontrollida ning võrrelda soojustehnilistest eksperimentidest saadud andmetega. Sooritatud katsed võimaldavad vähendada Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi küttearveid.

Eesti taastuvenergiaalased suundumused on tugevalt mõjutatud Euroopa Liidu pikaajalisest energiapoliitikast. Tulenevalt direktiivist 2009/28/EÜ [8] on Eesti võtnud endale siduvaks eesmärgiks suurendada taastuvenergia osakaalu lõpptarbimises ja aluseks on võetud 2005. aasta osakaalud. Eestis kasutati 2010. aastal ca poolte eluruumide soojusega varustamiseks lokaalkütet. Sealjuures olid põhilisteks kasutatavateks kütusteks küttepuud, puidubrikett, pelletid ja puidujäätmed. [11, 28] Lisas 2 oleval graafikul L2 on sõltuvalt kütuse liigist toodud kasutamise osatähtsus. Üle 70 % küttekolletest on väheefektiivsed ja manuaalselt teenindatavad (tavaahjud, pliidid, kaminad) [18].

Konventsionaalselt kasutatakse pelletite tootmiseks metsa- ja puidutööstuses tekkivat saepuru ning hõövlilaastu. Lisaks on võimalik kasutada muid energiakultuure või põllumajanduses tekkivaid jäätmeid. Toormaterjal jahvatatakse ning pressitakse suurel rõhul pelletiks. Saadav kütus on ainuke kodumaine taastuvenergia valdkonda kuuluv katlakütus, mille kasutamisel nii väikestel kui ka suurtel võimsustel saavutatakse vedel- ja gaasikütustega võrreldav puhtus, mugavus ja automatiseeritus. Pelletitega kütmist on Lääne-Euroopas praktiseeritud juba rohkem kui kolmkümmend aastat. Pelletite hind on mõjutatud maagaasi hinnast kuna tootmisprotsessis kasutatakse maagaasi, kuid on siiski oluliselt odavam kui maagaas. [53] Pelletkütust kasutavad automatiseeritud seadmed on suure efektiivsusega ja fossiilsete kütuste ressursid on vähenemas ning hinnad on pidevalt tõusmas. Seega võiks pelletkütust kasutatavatel seadmetel olla suur osatähtsuse suurenemise potentsiaal.

Katlastendis sooritatavate katsete lahutamatuks osaks on katsekütuste omaduste ja elementaarkoostise uurimine. Seejuures on vajalik rangelt jälgida vastavaid standardmeetodeid. Kütuse tehnilist analüüsi ja proovivõtmist kirjeldavaid standardeid käsitleb käesoleva töö autori bakalaureuse astme lõputöö. Kütuste omaduste/koostise määramisel eristatakse tehnilist- ja elementaaranalüüsi. Esimene teeb kindlaks tiheduse, kütteväärtuse ja niiskuse, lendosade, koksi ning tuha sisalduse kütuses. Teise abil määratakse

kütuse elementkoostis. Kütuse analüüsidel saadud kütuse omaduste/koostise väärtused, aitavad põletusseadme opereerimisel tagada tõrgeteta töö. [32]

Õhusaaste on kõige olulisem keskkonnaga seotud enneaegsete surmade põhjus Euroopa Liidus, mille ohvrite arv on kümme korda suurem kui liiklusõnnetuste puhul [30]. Kuigi võrreldes maailma keskkonnastandarditega on olukord Eestis väga hea, näitavad terviseuuringud, et isegi Eesti õhus leiduv saaste mõjutab oluliselt inimeste eluiga [12]. Välisõhus avaldavad kõige olulisemat tervismõju peenosakesed, mis jagatakse klassikaliselt kolme fraktsiooni ja need on järgmised: PM_{10} , $PM_{2,5}$ ja $PM_{0,1}$. Väikseimad osakesed $PM_{0,1}$ on oma olemuselt võrreldavad viirustega ja need võivad tungida otse vereringesse [42]. Antropogeensed saasteallikad on eelkõige seotud erinevate kütuste põletamisega [34]. Olmekütmisega kaasnev peamine mõju õhu kvaliteedile on atmosfääri paisatavate peenosakeste emissioon. Näiteks on Põhjamaades vanade ja ebaefektiivsete küttekollete väljavahetamist ja renoveerimist riiklikul tasemel toetatud [31]. Antud töös osakeste mõõtmist suurusega $PM_{0,1}$ ei käsitleta. Eestis on kehtestatud õhus sisalduvatele peenosakestele PM_{10} ja $PM_{2,5}$ keskkonnaministri määrusega nr 43 lubatud piirnormid, mis võeti vastu 08.07.2011 [74].

Eestis tegeletakse väikekatelde katsetamisega Eesti Maaülikooli katlakatsetuse laboris, kus on kaks katlastendi. Sealne labor võimaldab katsetada 25- 200 kW võimsusega katlaid (maksimaalse koguvõimsusega 300 kW). Lisaks on võimalus kahe õppeeesmärgilise ahju või muu tahkekütusega töötava kohtkütteseadme paigaldamiseks ja ühendamiseks ühtsesse suitsutõmbemagistraali. Labori tehnilise lahenduse projekteeris energiakasutuse eriala üliõpilane Mairo Märss magistritööna ja ehitustöö teostas Rapla Metall OÜ. Labor avati 2013. aasta jaanuaris. Eelkõige tegeletakse seal Lõuna-Eesti regioonis kasutatavate puitkütuste ning Eestis toodetavate väikekatelde parameetrite uurimisega. Lisas 3 on pilt Eesti Maaülikooli katlakatsetuse laborist. [19, 44, 10]

Käesoleva töö põhiosa sisu on jaotatud neljaks peatükiks – katsestend, mõõtmismeetodid, ülevaade seadmetest ning seadmete valik ja stendi skeem. Esimese peatükis antakse ülevaade katsestendist ja katseprotseduurist. Teises peatükis kirjeldatakse stendis mõõdetavaid parameetreid ja erinevaid mõõtemetoodikaid. Kolmas ja neljas peatükk annavad ülevaate võimalikest seadmetest ning stendi põhimõtteskeemist. Kasutatud kirjanduse nimekiri on tähestikulises järjekorras. Standarditele viidatakse koodi alusel ja tekstis antakse viide

vahetult koodi järel ning koodi esmakordsel esinemisel. Kui allikaks on raamat ajakiri, ajaleht, raamat või interneti lehekülg antakse lausele viitamise korral viide enne lause lõpumärki ja tervele lõigule viitamise korral peale lõiku lõpetavat kirjavahemärki. Seled ja graafikute viited antakse nende allkirjas.

1. KATSESTEND

1.1. Üldine ülevaade

Lähtuvalt standardist EVS-EN 303-5:2012 [26] võib katsestendi ülesseadmisel lähtuda standardis EVS-EN 304:2000 [27] joonisetel A.1 ja A.2 toodud näidisesest, kuid lubatud on teisi analoogseid lahendusi kasutada, aga seadme efektiivsust peab olema võimalik määrata täpsusega $\pm 3 \%$. Joonisel A.1 oleval skeemil on kasutusel kuumutatud vee jahutamiseks soojusvaheti ja joonisel A.2 otseringlusega lahendus.

1.1.1. Katelseade

Katelseade ja sellega koos tarnitav lisavarustus, mida katsetamisel kasutatakse, peab vastama tarnespetsifikatsioonile. Täiendavat soojusisolatsiooni osadele, mis on kontaktis veega, põlemisgaasidega ja leegiga, ei tohi paigaldada. [26]

Tarbitava kütuse massi määramiseks on vajalik koldesse juhitava kütuse kaalumine ja lihtne võimalus automaatse kütuse koldesse juhtimise süsteemi korral on kütusepunkri kaalule asetamine. Standardis EVS-EN 304:2000 on joonisel 1 toodud skeem, kus kaalule on asetatud kütusemahuti. Lisaks võimaldaks teatud juhtudel, automaatse kütuse etteandega süsteemiga, katla kaalule asetamine jälgida massi muutust ja sellekaudu hinnata põlemisprotsessi dünaamikat. Sellist lahendust tasub kasutada ainult juhul, kui massi muutus ajaühikus on piisavalt suur, et ületada kaalu eraldusvõimet. Standardi EVS-EN 12809:2002 [65] lisas A toodud näidises on katla tüübikatsetuse stendi üleseadmisel kasutatud lahendust, kus katelseade on asetatud platvormkaalule.

1.1.2. Mõõtesektsioon

Mõõtmissektsioonis määratakse suitsugaasi koostis, temperatuur ja staatiline rõhk. Standardi EVS-EN 303-5:2012 nõuetele vastav mõõtmislõik peab terves ulatuses olema isoleeritud ja selleks kasutatakse 40 mm paksust mineraalvilla või muud võrdväärset materjali. Sobiv mõõtesektsiooni konstruktsioon on toodud standardis EVS-EN 304:2000 joonisel 2. Nõudeid suitsutorudele ja nende ühendamisele ning tarvikutele käsitleb standard EVS-EN 1856-2:2009 [24].

1.1.3. Toodetud soojus

Katlastendis sooritatud katsetest toodetud soojus salvestatakse akumulatsioonipaaki. Akumulatsioonipaagis salvestatud soojust on võimalik kasutada hoone küttesüsteemis. Lisaks peab süsteemis olema soojusvheti, mille abil on võimalik toodetud soojust atmosfääri suunata, seda juhul, kui hoone küttesüsteemis puudub soojuse vajadus.

1.2. Katseprotseduur

Katse sooritamisel lähtuvalt standardist EVS-EN 303-5:2012 peavad katselabori tingimused vastama standardi EVS-EN ISO/IEC 17025:2006 [23] kolmandas osas esitatud nõudmistele.

Katelt tuleb katse vältel käitada vastavalt tootja instruktsioonidele. Ümbritseva keskkonna temperatuur peab olema vahemikus 15 – 30 °C. [26]

Tõmme tuleb seadistada lähtuvalt minimaalsest väärtusest, mis on tootja seadmele andnud. Katseperioodi vältel ei tohi tõmbe keskmine väärtus erineda tootja määratud väärtusest rohkem kui ± 3.0 Pa. Juhul, kui tootja pole minimaalset tõmbe väärtust määratlenud, tehakse see standardi EVS-EN 303-5:2012 järgi katsetades, lähtuvalt standardist EVS-EN 13384-1:2003+A2:2008 [6].

Enne katse alustamist peab katel olema saavutanud oma töötemperatuuri ja selle saavutamiseks kasutatakse sobiv kogus kütust. Standardi EVS-EN 303-5:2012 kohaselt peab automaatse kütuse etteande süsteemiga katla tüübikatsetus kestma, nii nominaalsel koormusel kui ka minimaalsel koormusel, vähemalt 6 tundi. Juhul, kui katla töö on tsükliline, pikeneb minimaalsel koormusel katse kestvus perioodi võrra, mis kulub viimasele sisse-välja lülitamise perioodile.

1.2.1. Katla võimsuse katsetamine

Katla efektiivsuse, soojustootluse, põlemisperioodi, lahkvate gaaside koostise ja lahkvate gaaside temperatuuri määramiseks tuleb katelt kogu katse vältel käitada soojustootluse režiimis. Kui katelseade võimaldab pidevat töötamist, siis nominalasel võimsusel sooritatakse katse katla pideva töö vältel (termostaadi sulgumist ei toimu). Minimaalsel koormusel katse

sooritamisel peab võimsuse reguleerimine toimuma automaatika seadmetega, ilma igasuguse manuaalse sekkumiseta. Katla soojusvõimsuseks võetakse katseperioodi keskmine. [26]

1.2.2. Soojustootluse ja efektiivsuse määramine

Kasulikult soojuskandjale ülekantud soojushulk määratakse ringleva vee hulga ja selle temperatuuri tõusuga katlas või vee massikulu ja temperatuuritõusuga katlas.

Lisaks on võimalik kasulikku soojusvõimsust mõõta soojusvahetis jahutusvedelikule ülekantud soojushulga abil, mõõtes jahutusvedeliku temperatuuri tõusu. Nimetatud moodus eeldab, et eelkatsetega on leitud soojuskao sõltuvus, mis tekib soojusvaheti ühendusest katlaga ja soojusvahetis endas või on katsestendi soojuskao kõver teada. Ülekantud kasulik soojushulk leitakse jahutusvedelikule ülekantud soojushulga ja kadude summeerimise teel.

Nominaalsel koormusel peab katse vältel katlast väljuva vee temperatuur olema vahemikus 70 – 90 °C ja keskmine temperatuuri erinevus väljuva ning siseneva vee vahel peab olema vahemikus 10 – 25 K. Lisaks peab täidetud olema järgmine temperatuuri tõusu tingimus:

$$\frac{t_v + t_r}{2} - t_l \geq 35 \text{ K} \quad (1.1)$$

Kus t_v – katlast väljuva vee temperatuur (°C),
 t_r – katlasse sisenava vee temperatuur (°C),
 t_l – ümbritseva keskkonna temperatuur (°C). [26]

Automaatse kütuse koldesse juhtimisega katelseadme minimaalne soojustootlus ei tohi ületada 30 % nominaalsest kasulikust soojusvõimsusest. [26]

Katla efektiivsus leitakse otsese või kaudse bilansi abil. Käesoleva peatüki alajaotises 1.3 on esitatud vajalikud valemid efektiivsuse leidmiseks.

1.2.3. Heitmete analüüsimine

Suitsugaaside koostise analüüsimisel tuleb standardi EVS-EN 303-5:2012 kohaselt lähtuda tehnilisest spetsifikatsioonist CEN/TS 15883:2009 [45].

Kogu katse vältel mõõdetakse lahkuva suitsugaasi koostist ja määratakse kogu katseperioodi aritmeetiline keskmine. Automaatse kütuse koldesse juhtimisega katsestendis tuleb katseperiood jagada minimaalselt neljaks võrdseks mõõtmisperioodiks. Tehtavad mõõtmised algavad iga mõõtmisperioodi alguses ja esimene mõõtmine tehakse kui katse algab.

Peenosakeste keskvärtus määratakse minimaalselt nelja tehtud mõõtmise alusel. Juhul, kui katla töö on tsükliline tuleb arvestada ainult sisse-välja lülitamise faasis tehtud mõõtmisi. Peenosakeste määramist on kirjeldatud standardi EVS-EN 303-5:2012 lisas A.

Lisaks käsitleb suitsugaasidest automaatsüsteemide abil proovivõtumeetodeid standard EVS-ISO 10396:2008 [48]. Nimetatud standardmeetod sobib hapniku O₂, süsinikdioksiidi CO₂, süsinikmonoksiidi CO, vääveldioksiidi SO₂, lämmastikmoomoksiidi NO ja lämmastikdioksiidi NO₂ või lämmastikoksiidide NO ja NO₂ üldkoguse määramiseks.

Kirjeldatud on ekstraktiivsed, mille korral enne proovi analüüsimist see valmistatakse ette ning analüüsitakse eraldi paiknevas seadmes, ja mitteekstraktiivsed meetodid, mille korral analüüsimine toimub otse gaasivoolus. Analüüsiv proov soovitatakse võtta, gaasikäigu või korstna esimesest kolmandikust või esimesest poolest ja asukoht tuleb valida hoolikalt, et analüüsiks võetud proov oleks esinduslik.

1.2.4. Katla veetakistuse määramine

Katla veetakistus (mbar) määratakse katlast väljuva ja siseneva vee temperatuuride erinevusel 10 ja 20 K. Standardis EVS-EN 304:2000 on joonisel A.5 toodud skeem veetakistuse määramiseks.

1.2.5. Katla pinnatemperatuur

Keskmine pinnatemperatuur tuleb mõõta nominaalsel võimsusel ja minimaalselt viies punktis igal katla välisküljel. Mõõtmine tuleb sooritada samadel tingimustel ja mõõta tuleb kriitilistes punktides (näiteks katla uks või juhtimishoovad). [26] Katla pinnatemperatuuri mõõtmist käsitletakse käesoleva peatüki 3. aljaotises punktis 6. Standardis EVS-EN 304:2000 on joonisel 4 toodud kontaktpinna suurendamiseks sobiva vaskplaadi mõõtmed, kuhu joodetakse termopaar. Katla aluspinna temperatuuri mõõtmise põhimõtet käsitletakse standardis punktis 5.10.

1.2.6. Elektrikulu

Elektri tarbimist mõõdetakse lähtuvalt standardist EVS-EN 15456:2008 [16]. Automaatse kütuse koldesse juhtimise süsteemiga katelde korral tuleb katla ja kütuse etteande süsteemi tarbitav elekter mõõta eraldi.

1.3. Soojuskaod ja bilanss

1.3.1. Kütuse koostis ja kütteväärtus

Puitkütuste tarbimisaine kütteväärtus sõltub oluliselt niiskuse sisaldusest W ja tuhasusest A , mis mõlemad väljendatakse protsendina massist. Kütteväärtuse leidmiseks puitkütuste korral saab kasutada järgnevat valemit:

$$Q_k = \left[18,9 \cdot \left(1 - \frac{W}{100} \right) \left(1 - \frac{A}{100} \right) - 2,44 \cdot \frac{W}{100} \right] \cdot 1000 \quad (1.2)$$

Kus Q_k – kütuse tarbimisaine alumine kütteväärtus (kJ/kg),

W – kütuse niiskus (%),

A – kütuse tuhasus (%). [54]

1.3.2. Liigõhutegur

Liigõhutegur iseloomustab koldes toimuva põlemisprotsessi efektiivsust ja väljendub, katlasse antud tegeliku ning teoreetiliselt vajaliku, põlemiõhu koguste suhtena. Järgnevalt on liigõhuteguri arvutamiseks toodud kolm valemit:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (1.3)$$

Kus α – liigõhutegur,

O_2 – hapniku kogus lahkuvas suitsugaasis (%). [54]

Täpsustatud valem, mida kasutatakse, kui CO ja/või kaheaatomiliste gaaside sisaldus lahkuvas suitsugaasis on suhteliselt suur, on järgnev:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2 - 0,5 \cdot CO}{100 - (O_2 + RO_2 + CO)}} \quad (1.4)$$

Kus CO – süsinoksiidi sisaldus lahkuvas suitsugaasis (%),

RO₂ – kaheaatomiliste gaaside sisaldus lahkuvas suitsugaasis (%). [54]

Liigõhu teguri ligikaudseks määramiseks, kui on teada maksimaalne kasutatava kütuse CO₂ sisaldus lahkuvas suitsugaasis, on võimalik kasutada järgnevat lihtsustatud valemit:

$$\alpha = \frac{CO_{2max}}{CO_2 + CO} \quad (1.5)$$

Kus CO_{2max} – maksimaalne kasutatava kütuse CO₂ sisaldus lahkuvas suitsugaasis (%),

CO₂ – süsinikdioksiidi sisaldus lahkuvas suitsugaasis (%). [54]

1.3.3. Soojuskadu lahkuva suitsugaasiga

Kui eeldada, et kütus väävlit ei sisalda ja keemilise mittetäieliku põlemise saadusena esineb ainult CO, siis kuiva suitsugaasi maht V_g põletatud kütuse iga massiühiku kohta avaldub järgmiselt:

$$V_g = 1,86 \cdot \frac{C}{CO_2 + CO} \quad (1.6)$$

Kus V_g – kuiva suitsugaasi maht (m³/kg),

C – kütuses sisalduv süsiniku kogus (%). [54]

Soojuskadu lahkuvgaasiga Q₂ sõltub oluliselt kütuse niiskuse sisaldusest. Puitkütuste korral võib maksimaalne CO₂ sisaldus lahkuvgaasis olla vahemikus 14 – 17,5 %. Ligikaudne valem soojuskadude leidmiseks lahkuva suitsugaasiga on järgmine:

$$Q_2 = (t_g - t_{ruum}) \cdot \left(\frac{A_2}{21 - O_2} - 0,0075 \right) \quad (1.7)$$

$$A_2 = 9,657 \cdot 10^{-5} * W^2 + 9,905 * 10^{-4} * W + 0,7049 \quad (1.8)$$

Kus t_g – lahkuvgaasi temperatuur (°C),

t_{ruum} – katelt ümbritseva ruumi temperatuur (°C). [54]

1.3.4. Soojuskadu kütuse keemilisest mittetäielikust põlemisest

Soojuskadu keemiliselt mittetäielikust põlemiseset Q_3 tekib kuna osa kütuses sisalduvast põlevainest väljub katlast lõpuni põlemata/oksüdeerimata gaasiliste ühenditena. Keemiliselt mittetäieliku põlemise põhjusteks on peamiselt järgnevad asjaolud:

- koldesse antava õhu vähene kogus,
- õhu puudulik segunemine kütusega,
- kolde väike maht, millest tingituna on kütuse koldes viibimise aeg väike ja ei võimalda kütuse täielikku põlemist,
- madal temperatuur koldes ja sellest tingitud põlemiskiiruse vähenemine,
- liiga kõrge temperatuur koldes, millega võib kaasneda põlemisproduktide dissotsiatsioon. [40]

Eeldusel, et ainus mittetäieliku põlemise saadus on CO, mille kütteväärtus on 12640 kJ/m^3 ja soojuskao kütuse mittetäielikust põlemisest saab arvutada CO kontsentratsiooni järgi suitsugaasis ning see väljendub järgmiselt:

$$q_3 = \frac{12640 \cdot V_g \cdot CO}{Q_k} \quad (1.9)$$

Kus q_3 – soojuskadu kütuse mittetäielikust põlemisest (%). [54]

Juhul, kui arvestada täiendavaid mittepõlemise komponente, tuleb valemit 1.9 modifitseerida kasutades vastavate komponentide kütteväärtust.

1.3.5. Soojuskadu kütuse mehaanilisest mittetäielikust põlemisest

Soojuskadu kütuse mehaanilisest mittetäielikust põlemisest Q_4 tekib kuna koldest väljuvas tahkes põlemisjärgis on teatav kogus põlevainet. Osa süsinikust, vesinikust ja väävlist, mis on koldest väljuva tahke põlemisjärgi koostises, väljub kolde ülaosast lendtuhaga, osa eemaldatakse resti pealt või resti alt koos tahke põlemisjärgiga. Kihis põletades võib kütus osaliselt läbi resti variseda. Mehaanilisest mittetäielikust põlemisest tingitud soojuskadu on avaldatav järgmise valemiga:

$$q_4 = \left(\frac{a_r \cdot P_r}{100 - P_r} + \frac{a_v \cdot P_v}{100 - P_v} + \frac{a_l \cdot P_l}{100 - P_l} \right) \cdot \frac{32600 \cdot A}{Q_k} \quad (1.10)$$

Kus q_4 – soojuskadu kütuse mehaanilisest mittetäielikust põlemisest (%),
 a_r – põlemisjäägi suhteline kogus, mis on eemaldatud restilt,
 a_v – põlemisjäägi suhteline kogus, mis on varisenud läbi resti,
 a_l – põlemisjäägi suhteline kogus, mis on lahkuva gaasiga koldest väljunud,
 P_r – põlevaine sisaldus tahkes põlemisjäägis, mis on pärit restilt (%),
 P_v – põlevaine sisaldus tahkepõlemisjäägis, mis on varisenud läbi resti tuha šahti (%),
 P_l – põlevaine sisaldus tahkes põlemisjäägis, mis on lahkuvate gaasidega koldest väljunud (%). [40]

1.3.6. Soojuskadu katla välisjahtumisest

Välisjahtumisest tingitud soojuskadu Q_5 tekib kuna katla väliskesta temperatuur on kõrgem, kui on ümbritseva keskkonna temperatuur ja soojus kandub läbi soojusisolatsiooni. Kiirguse ja vabakonvektsiooni teel kandub osa kütuse põlemisel vabanenud soojust ümbritsevasse keskkonda. Katla ühikvõimsuse vähenedes kadu välisjahtumisest suureneb kuna katla välispinna suuruse ja katla mahu suhe suureneb. Välisjahtumisest tingitud kao q_5 arvutamisel kasutatakse järgmist valemit:

$$q_5 = \frac{(\alpha_{konv} + \alpha_{kiir}) * \Delta t * F_{väl}}{B * Q_k} * 100 \quad (1.11)$$

Kus q_5 – soojuskadu katla välisjahtumisest (%),
 α_{konv} – soojusülekanndetegur vabakonvektsiooniga ülekantavale soojushulgale ($W/m^2 \cdot K$) ja see leitakse valemiga 1.13,
 α_{kiir} – soojusülekanndetegur kiirgusega ülekantavale soojushulgale ($W/m^2 \cdot K$) ja see leitakse valemiga 1.14,
 Δt – katla välispinna keskmise temperatuuri ja ruumi keskmise temperatuuri vahe ja see leitakse valemiga 1.12,
 $F_{väl}$ – katla välispiirete summaarne pind, mis määratakse katla skeemile ja kohapealsetele mõõtmistele tuginedes (m^2),
 B – kütuse kulu, (kg/s). [40, 54]

$$\Delta t = t_{F,kesk} - t_{ruum} \quad (1.12)$$

Kus $t_{F,kesk}$ – katla välispinnakeskmine temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) ja see leitakse valemiga 1.15. [40,54]

Soojusülekangetegur vabakonveksiooniga sõltub temperatuuride vahest Δt ja leitakse järgnevalt:

$$\alpha_{konv} = P * \sqrt[3]{\Delta t} \quad (1.13)$$

Kus $P=1,52$ kui $\frac{t_F+t_{ruum}}{2} \leq 40 \text{ K}$,
 $P=1,5$ kui $\frac{t_F+t_{ruum}}{2} \leq 45 \text{ K}$,
 $P=1,48$ kui $\frac{t_F+t_{ruum}}{2} \leq 50 \text{ K}$. [40,54]

Kiirgusega ümbritsevasse keskkonda ülekantud soojuse hulk leitakse järgneva valemi abil:

$$\alpha_{kiir} = \frac{\varepsilon_{süst} * 5,67 * 10^{-8} * (T_F^4 - T_{ruum}^4)}{t_{F,kesk} - t_{ruum}} \quad (1.14)$$

Kus $\varepsilon_{süst}$ – katla ja ruumi taandatud mustusaste ($\varepsilon = 0,8$),
 $T_{f,kesk}$ – katla välispinna keskmine absoluuttemperatuur (K),
 T_{ruum} – ruumi keskmine absoluuttemperatuur (K). [40,54]

Katla välispiirete detailid on erineva pinnatemperatuuriga, sellest tulenevalt leitakse keskmine katla välispinna temperatuur järgneva valemi abil:

$$t_{F,kesk} = \frac{t_{F1} * F_1 + t_{F2} * F_2 + \dots + t_{Fn} * F_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n} \quad (1.15)$$

Kus t_{Fn} – üksiku pinnaosa keskel mõõdetud temperatuur ($^{\circ}\text{C}$),
 F_n – pinnaosa suurus, kus vastav temperatuuri väärtus või soojuskadu mõõdeti (m^2). [40,54]

Soojusvoo mõõturi kasutamisel saab katla välisjahtumisest tingitud kao arvutamise valemit 1.11 lihtsustada ja see saab järgneva kuju:

$$q_5 = \frac{\sum q_n \cdot F_n}{B \cdot Q_k} \quad (1.16)$$

Kus q_n – pinnaosalt mõõdetud soojuskadu (W/m^2).

1.3.7. Kasutegur

Otsese soojusbilansi järgi määratakse kasutegur sooja vee saamiseks kulutatud ja koldesse antud kogu soojushulga suhtena ja on järgnev:

$$\eta = \frac{V_v \cdot \rho \cdot (h_v - h_s)}{B \cdot Q_k} \quad (1.17)$$

Kus η - katla (bruto) kasutegur (%),

V_v – katelt läbinud vee mahukulu (m^3/s),

ρ – katlavee tihedus vee sisenemise temperatuuril (kg/m^3),

h_v - katlast väljunud vee entalpia (kJ/kg),

h_s – katlasse siseneva vee entalpia (kJ/kg).[54, 39]

Kaudse soojusbilansi järgi määratakse kasutegur soojuskadude summeeritud väärtuse lahutamisel sajast protsendist ja valem on järgmine:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) \quad (1.18)$$

Eelnevates avaldistes 1.17 ja 1.18 esitatud kasutegur ei arvesta katla soojusliku q_s ning elektrilist omatarvet q_e . Üldjuhul katla omatarve ei ületa üht protsenti ja on väiksem suurema katla võimsuse korral. Netokasuteguri η_n saab avaldada, kui avaldisega 1.17 või 1.18 leitud väärtusest η lahutada soojuslik q_s ja elektriline omatarve q_e ning see avaldub järgnevalt [18]:

$$\eta_n = \eta - q_s - q_e \quad (1.19)$$

Katla töötamisel all- või ülevalpool nominaalset koormust kasutegur väheneb. Allpool nominaalset koormust suurenevad kaod lahkvate suitsugaasidega ja mittetäielikult põlemisest. Lisaks suureneb katla välisjahtumisest tingitud kao protsentuaalne väärtus, kuna kadu väisjahtumisest jääb muutumatuks. Ülevalpool nominaalset koormust töötades suurenevad järsult kaod lahkvate suitsugaasidega ja keemiliselt mittetäielikust põlemisest. [39]

1.3.8. Katlas kütteeveele antud soojushulk

Avaldises 1.17 murru lugejas olev liige väljendab katla kütteeveele antud kasuliku soojushulka Q_1 ja see on järgmine:

$$Q_1 = V_v \cdot \rho \cdot (h_v - h_s), \text{ kW} \quad (1.20)$$

1.3.9. Kolde soojuskoormus

Avaldises 1.17 murru nimetajas olev liige väljendab kolde soojuskoormust Q_{kolle} ehk põlemisel eralduv soojushulk ajaühikus. Avaldis on järgmine:

$$Q_{kolle} = B \cdot Q_k, \text{ kW} \quad (1.21)$$

1.3.10. Soojusbilansi võrrand

Katelseadme soojusbilanss iseloomustab kütusest saadava soojuse jagunemist ja selle alusel määratakse katelseadme kasutegur. Eksploatsioonil koostatakse soojusbilanss katsetulemuste põhjal ja projekteerimisel lähtutakse arvutatud tulemustest. Konventsionaalselt koostatakse soojusbilanss 1 kg põletatava tahke kütuse koguse kohta. [40]

Võrdsustades koldesse antavast kütuse kogusest saadava soojushulga ja soojushulga, mis on kulunud soojusülekanne protsessides, saab kirjutada järgneva võrrandi:

$$Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (1.22)$$

Eelnev võrrand 1.20 väljendub protsentides järgnevalt:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100, \% \quad (1.23)$$

1.4. Katsekütus

Lähtuvalt standardist EVS-EN 303-5:2012 kasutatakse katelseadme katsetamisel turul vabalt saadaval olevaid kütuseid. Juhul, kui kasutatakse pööki, valget pööki, kaske, tamme või kuuske tuleb järgida vastavaid tootja täpsustatud juhiseid. Biomassipõhiste katsekütuste niiskuse, tuhasuse ja alumisekütteväärtuse kohta toodud nõuded on esitatud tabelis 1.1.

Katsekütuse E kasutamisel tuleb kindlasti katseprotokolli märkida analüüsitud parameetrite väärtused.

Kütuse omaduste määramiseks võetakse proov lähtuvalt standardi EVS-EN 14778:2011 [51] nõuetest.

Tabel 1.1. Katsekütused [26]

Kütuse nimetus	Hakkpuit		Pressitud puitküütus	Saepuru	Mitte puidupõhine biomass
	B1	B2	C	D	E, e
niiskuse sisaldus	20 – 30 %	40 – 50 %	≤ 12 %	35 – 50 %	Vastavalt tootja täpsustustele või standardile ISO 17225 osad 1-7 [22]
Tuha sisaldus	≤ 1,5 %		≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	
Alumine kütteväärtus	>17 MJ/kg		>17 MJ/kg	>17MJ/kg	>16MJ/kg

1.4.1. Kütusekoormuse leidmine

Kütusekoormus B_{fl} on võimalik arvutada igale põlemisrežiimile järgneva valemi abil:

$$B_{fl} = \frac{360 \cdot Q_n \cdot t_{min}}{Q_k \cdot \eta} \quad (1.24)$$

Kus B_{fl} – kütusekoormus ehk põlemisperioodiks vajalik kütusekogus kg,

Q_k – kütuse tarbimisaine alumine kütteväärtus kJ/kg,

η - tootja poolt deklareeritud efektiivsus %,

Q_n – katla soojusvõimsus kW,

t_{min} – eeldatav katse kestvus h. [26]

1.5. Katseprotokoll

Katseprotokoll peab vastama standardis EN ISO/IEC 17025 toodud nõudmistele. Kohustuslikud punktid, mida protokoll peab sisaldama on toodud standardis EVS-EN 303-5:2012.

2. MÕÕTMISMEETODID

2.1. Mõõdetavad väärtused ja algandmed

Katla võimsuse katsetamisel tuleb standardi EVS-EN 303-5:2012 kohaselt mõõta vähemalt kahes järgnevas loetelus olevaid parameetreid.

Ühekordselt mõõdetakse järgnevad väärtused:

- Kütuse niiskus (%),
- Kütuse alumine kütteväärtus (kJ/kg),
- Kütuse mass (kg),
- Katseperiood (käsitsi kütuse lisamise korral) (h),
- Stendi pinnatemperatuurid (°C).

Pidevalt, intervalliga maksimaalselt 20 sekundit, välja arvatud peenosakesed, (andmete salvestasmist võib teha maksimaalselt ühe minuti keskvaärtustena, et vähendada mõõdetud väärtuste fluktuatsiooni), mõõdetakse katse vältel järgnevad parameetrid:

- Soojusvõimsus (kW),
- Vee pealevoolu temperatuur (°C),
- Vee tagasivoolu temperatuur (°C),
- Lisatava külma vee temperatuur (°C),
- Katshalli temperatuur (°C),
- Lahkuva gaasi temperatuur (°C),
- Tõmme katla taga (staatiline rõhk) (Pa),
- Hapniku O₂ või süsinikdioksiidi CO₂ sisaldus (%),
- Süsinikmonoksiidi CO sisaldus (ppm),
- Summaarne süsivesinike THC (inglise keelest tulenev akronüüm – *total hydro carbon*) sisaldus (ppm),
- Summaarne tahkete osakeste sisaldus (mg/m³),
- Lisaenergia tarve (kwh).

Lisaks on antud soovitusel mõõta NO ja NO₂ sisaldust.

2.2. Mõõteseadmete määramatus

Lähtuvalt standardist EVS-EN 303-5:2012 peab mõõtmisseadmete mõõtevahemik vastama standardis EVS-EN 304:2000 toodud nõuetele. Instrumentidele lubatud mõõtemääramatus on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Mõõtevahenditele lubatud määramatused [26]

Mõõdetav suurus	Lubatud mõõtemääramatus
Efektiivus ¹	± 3 %
Rõhk – 0,5 mbar	± 0,01 mbar EN 304 lisa A
Rõhk > 0,5 mbar	2% mõõdetud väärtusest
CO	± 10 % mõõdetud väärtusest või ± 10 ppm (lähtutakse suuremat väärtusest)
THC	± 10 % mõõdetud väärtusest või 5 ppm (lähtutakse suuremat väärtusest)
NO _x	± 5 % mõõdetud väärtusest või ± 15 ppm (lähtutakse suuremat väärtusest)
O ₂	± 5 % mõõdetud väärtusest või ± 0,4 vol. % (lähtutakse suuremat väärtusest)
CO ₂	± 5 % mõõdetud väärtusest või ± 0,4 vol. % (lähtutakse suuremat väärtusest)
PM	± 10 mg/m ³

THC ja NO_x mõõtmisel kasutatavad vahendid peavad vastama tehnilises spetsifikatsioonis CEN/TS 15883 toodud nõuetele. TVOC (inglise keelest tulenev akronüüm – *total volatile organic compound*) arvutamisel lähtutakse samas tehnilises spetsifikatsioonis toodud meetodikast.

Gaasiliste heitmete mõõtmiseks kasutatavad instrumendid peavad olema vastavuses järgnevate standarditega: EVS-EN 12619:2013 [58], EVS-EN 14789:2005 [63], EVS-EN 14792:2005 [57] ja EVS-EN 15058:2006 [60].

Peenosakeste sisaldus suitsugaasis määratakse lähtuvalt tehnilisest spetsifikatsioonist CEN/TS 15883:2009 ja standardist EVS-EN 13284:2004, kui kasutatakse filtermeetodit arvestatakse standardi EVS-EN 303-5:2012 lisast A tulenevaid nõudmisi ja kui kasutatakse gravimeetrilist või elektrostaatilist meetodit arvestatakse lisast C tulevaid tingimusi. Juhul kui mõõtevigade jääb lubatud piiridesse võib kasutada alternatiivset peenosakeste määramise meetodit. [26]

¹ Mõõtmine vahendid peavad olema valitud selliselt, et efektiivsuse saab määrata täpsusega ± 3 %.

2.3. Gaasianalüüs

Paljud kaubandus leiduvaid gaasianalüsaatorid kasutavad elektrokeemilist mõõterakku ja määravad gaasi koostise keemilis-optilise spektraalanalüüsiga. Kuna suitsugaasid on kõrge temperatuuriga, sisaldavad mehaanilisi jääke ja võivad põhjustada korrodeerumist, ei ole võimalik analüsaatori mõõterakku vahetult suitsugaasi käiku asetada. Sensori kaitsmiseks tuleb suitsugaasi enne analüüsimist filtreerida, et eemaldada selles sisalduvad mehaanilised osakesed, jahutada ja kuivatada, selleks ettenähtud sektsioonis.

Lähtuvalt standardist EVS-EN 303-5:2012 esitatakse kõik mõõdetud heitmete väärtused massikontsentratsioonina (mg/m^3) kuivas suitsugaasis, kus on hapniku sisaldus 10 %, temperatuur $0\text{ }^\circ\text{C}$ ja rõhk 1013 mbar. Mahuosadelt (ppm) massi sisaldusele (mg/m^3) ümberarvutamiseks on standardis toodud punktis 5.10.4.1 vastav meetodika.

2.3.1. FTIR tehnoloogia

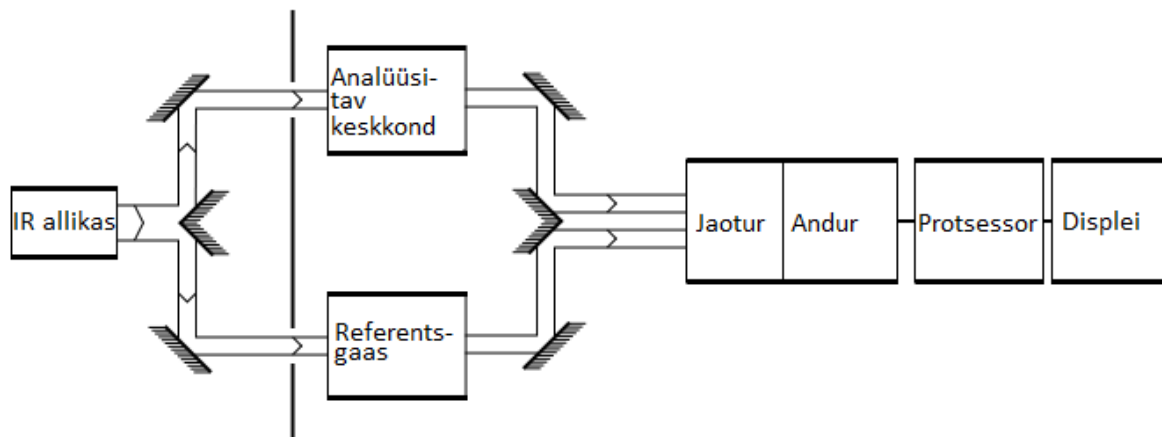
Absorptsioonil põhinev igasugune spektroskoopia mõõdab, kuidas analüüsitava keskkond absorbeerib valgust teataval lainepikkusel. Lihtsaim moodus on hajuspektroskoopia, mille korral juhitakse monokromaatiline valgusekiir läbi analüüsitava keskkonna ja mõõdetakse kui palju valgust mõõdetaval lainepikkusel neeldus.

Termin **Fourier teisendusel infrapunakiirguse spektroskoopia** (FTIR: inglise keelest tulenev lühend – *Fourier transform infrared spectroscopy*) viitab matemaatilisele protsessile, mis on vajalik mõõdetud andmete töötlemisel ja analüüsimisel. Infrapunakiirgus (IR: inglisekeelsest tulenev lühend – *infrared*) on nähtavast valgusest pikema lainepikkusega ja väiksema sagedusega. Konventsionaalselt esitatakse IR spektri graafiku horisontaalteljel IR kiirguse neeldumine või läbilaskvus ja vertikaalteljel sagedus või lainepikkus. FTIR tehnoloogia põhineb lairiba infrapunakiirguse juhtimises läbi analüüsitava keskkonna ja analüüsitakse, kui palju kiirgust analüüsitava keskkond absorbeeris. [15]

Analüüsitava keskkonnast spektri saamiseks on vajalik lisaks analüüsitava keskkonnale mõõta referentskeskkonna valguse absorbeerimist/läbilaskvust. See on vajalik, kuna mõõtmistulemus on mõjutatud lisaks valguse neeldumisele seadme komponentide omadustest ja referentsmõõtmine võimaldab kõrvaldada seadme komponentide mõju mõõtmistulemusele. Matemaatiliselt tähendab see läbilaskespektri jagamist referentsläbilaskespektriga. Lihtne

moodus referentskeskkonnaga võrdlemiseks on järjestikuline, see tähendab, et kõigepealt mõõdetakse referentskeskkonda ja seejärel analüüsiavat keskkonda. Sellise mõõtmismeetodiga saadud tulemused on oluliselt mõjutatud IR kiirguse intensiivsuse muutumisest. [15]

Täpsem viis on kiire jaotamise tehnoloogia, mis võimaldab elimineerida kiirgusallika intensiivsuset tingitud häiringud. Selel 2.1 on skemaatiliselt näidatud IR kiirguse liikumine ja mõõtmistulemuse töötlemine. IR kiirgus juhitakse läbi interferomeetri (ei ole joonisel näidatud) ja seejärel jaguneb kaheks kiireks. Üks juhitakse läbi analüüsitava keskkonna ja teine läbi referentskeskkonna. Jaoturil tehakse otsus, milline kiir suunatakse andurile. Kahe signaali võrdlemisel saadakse mõõtmistulemus. Selline kahe kiire kasutamine annab täpse spektri isegi, kui kiirgusallika intensiivsus muutub ajas. [15]



Sele 2.1. IR spektroskoopia skeem [15]

2.3.2. NDIR tehnoloogia

Mittehajuv infrapunakiirgus spektroskoopia (NDIR: inglise keelest tulenev lühend – *Non-dispersive Infrared*) kasutab võrdluskambris gaasi, mis ei põhjusta kiirguse absorptsiooni. Optilises käsitluses on infrapuna kiirguse levimine mittehajuv, kui analüüsikambris olevas gaasis ei toimu kiirguse deformatsiooni. [46]

Põhilised NDIR ja FTIR seadme osad on infrapuna allikas, analüüsikamber või –toru, valguse filter ja infrapuna andur. Infrapunakiirgust juhitakse otse läbi analüüsikambri andurile ja sellega paralleelselt asetseb teine kamber, kuhu suletuna asub võrdlusgaas. Analüüsikambris olev gaas põhjustab spetsiifilise lainepikkuse neeldumise vastavalt Beer-Lamberti seadusele.

Gaasikomponentide kontsentratsiooni määramiseks mõõdetakse anduriga iseloomuliku lainepikkuse sumbumist. Anduri ees asub optiline filter, mida ideaalse käsitluse korral läbib ainult mõõdetavas gaasikomponendis absorbeeruv lainepikkus. Üldjuhul IR kiirgus tükeldatakse või moduleeritakse, et saaks eemaldada soojusest tingitud mõju mõõdetavale signaalile. [15, 46]

2.4. Tahked osakesed

Peenosakeste kontsentratsiooni määramiseks esindusliku proovi saamiseks on vajalik teada suitsugaasi liikumiskiirust, temperatuuri ja staatilistrõhku, et tagada analüüsitava gaasi proovivõtu sondi sisenemine kiirusega, millega gaas kanalis liigub.

Standard EN 13284-1 [56] on referentsmeetodiks madala tahkete osakeste kontsentratsiooni kindlaksmääramisel. Maksimaalne tahkete osakeste sisaldus võibolla kuni 50 mg/m^3 kohta. Automatiseeritud mõõtesüsteemide kasutuselevõttu ja kalibreerimist käsitleb mainitud standardi 2. osa.

Standard EVS-ISO 23210:2009 [37] kirjeldab referentsmeetodit PM_{10} ja $\text{PM}_{2,5}$ osakeste sisalduse määramiseks paiksetest saasteallikatest kaheastmelise impaktoriga. See mõõtmismeetod sobib hästi alla 40 mg/m^3 sisalduse määramiseks. Seda standardit ei saa kasutada lahkuva gaasi kogu tolmusisalduse määramiseks. Peenosakeste kontsentratsioon leitakse impaktoris asetsevatele filtritele lisandunud massi ja impaktorit läbinud gaasimahu suhtena.

Standardi EVS-EN 303-5 lisa A nõuab isokineetilise tagamist vahemikus 70 – 150 %. Standard EN 13284-1 nõuab isokineetilise tagamist vahemikus 95 – 115 %. See lahknevus tuleneb kuna väikste seadmete gaasikäigus on suitsugaasi liikumiskiirus madal ($< 2 \text{ m/s}$). Seda standardit ei saa kasutada lahkuva gaasi kogu tahkete osakeste tolmusisalduse määramiseks.

2.4.1. Suitsugaaside kiirus

Standard EVS-ISO 10780:2006 [36] määratleb meetodid atmosfääri suunatava gaasi voolukiiruse ja mahtkiiruse määramiseks korstnates, šahtides ja torudes. Standard määratleb

L- ja S-tüüpi Pitot' torude kasutamise gaasi voolukiiruse ja mahtkiiruse määramiseks ning soovituslikud mõõtingimused, mille juures kumbagi tüüpi Pitot' toru eelistada. Standardi kohaselt lubatakse kasutada ka muud tüüpi Pitot' torusid, eeldusel et nad vastavad standardi jaotises 10 esitatud täpsusnõuetele.

Standard kehtib gaasivooludele, mille tihedus, temperatuur, voolukiirus ja rõhk on mõõtepunktides praktiliselt konstantsed. See kehtib juhtudel, kus gaasivoolu Reynoldsi arv Pitot' toru ümbruses on suurem kui 1,2 ja rõhuvahe Pitot' toru avade vahel suurem kui 5 Pa ning gaasikanali ristlõikepindala mõõtekohas vähemalt $0,07 \text{ m}^2$.

Kui mõni standardi nõue jääb täitmata, võib meetodit erijuhtudel siiski rakendada, kuid mõõtemääramatus voolukiiruse ja mahtkiiruse määramisel võib olla suurem.

2.5. Temperatuuri mõõtmine

ITS-90 (inglise keelest tulenev lühend – *International Temperature Scale of 1990*) on Kelvini ja Celsiuse temperatuuri skaalas tehtavate temperatuuri mõõtmisvahendite kalibreerimise standard. ITS-90 ühtlustab erinevad termodünaamilised temperatuuri skaalad ja lihtsustab temperatuuride võrdlemist. See defineerib kalibreerimispunktid vahemikus 0,65 K kuni 1358 K ja sisaldab mitmeid alajaotisi erinevates temperatuuri vahemikes. [33]

2.5.1. Termopaar

Termopaari töö põhineb nn Seebecki efektil, mis seisneb kahe erinevast materjalist kokkujoodetud elektrijuhi ühenduskoha kuumutamisel tekkivast elektromotoorjõust. Termopaar mõõdab idealiseeritud käsitluse korral keskkonna temperatuuri teatud kindlas ruumipunktis. [22]

Standard EVS-EN 60584-1:2013 [69] täpsustab termopaaride elektromotoorjõu-temperatuuri sõltuvuse ja lubatud tolerantsi. Standardi 3. osa EVS-EN 60584-3:2008 [70] täpsustab nõuded ja tolerantsid termopaaride juhtmetele.

2.5.2. Takistustermomeeter

Takistustermometer on temperatuuri andur, milles kasutatakse elektrilist takistust omavat takistuskeha, mille temperatuuri ja juhtivuse sõltuvus on teada. Takistustermomeeterite töökeha on vormindatud ruumilise või tasapinnalise elemendina ja sobib hästi ruumi või pinna temperatuuri mõõtmiseks. Takistustermomeetri kasutamisel saadakse keskkonna temperatuur takistuskeha asukoha teatava keskväärtusena. [54]

Standard EVS-EN 60751:2008 [21] kirjeldab nõudeid ja temperatuuri-takistuse sõltuvust tööstuslikele takistustermomeetritele.

2.5.3. Imipüromeeter

Temperatuuri mõõtmiste teostamiseks järelpõlemistsoonis või mujal, kus on vajalik mõõta ainult soojuse konvektiivset komponenti, on sobiv lahendus kasutada imipüromeetrit. Termopaar asetseb mõõtesondi eesosas ja on kaetud keraamilise kaitsekestaga ning on kaitstud kiirgusliku soojusülekanne eest. Kõrgetel temperatuuridel jahutatakse sondi soojuskandjaga. Gaas, mille temperatuuri mõõdetakse, imetakse sondi sisse suure kiirusega (> 80 m/s) ja see tagab termopaari temperatuuri võrdsustumise mõõdetava keskkonna temperatuuriga ilma täiendava korrektsiooni vajaduseta. Välja imetud ja jahutatud gaasi on võimalik kasutada gaasi koostise määramiseks. [41]

2.5.4. Ohutus

Standardis EVS-EN 12828:2012 on toodud ohutusnõuded kinnistele küttesüsteemidele. Lisaks käsitleb standard EVS-EN 14597:2012 [57] elektrilisi või mitteelektrilisi temperatuuri juhtimise ja piiramise vahendeid ja meetodeid. See standard täpsustab tööparameetrid, tööaja ja ohutusega seotud seadmete toimimise järjekorra ja lähtuvalt standardist EVS-EN303-5:2012 rakendub see avatud süsteemidele.

2.6. Kulu arvutamine

2.6.1. Mahtkiirus ja kiirus

Vedeliku ja gaasi koguse mõõtmiseks kasutatavad seadmed võivad töötada väga erineva põhimõtte alusel. Lisaks klassikalistele kiiruslikele ja mahtuvuslikele kulumõõteseadmetele,

on kulu mõõtmist võimalik teostada väga erinevate printsiipide alusel. Järgnevalt on toodud mõned võimaluse keskkonna kiiruse mõõtmiseks, mille abil saab arvutada mahukulu:

- **Pitot toru** – Gaasi voolamisel torus on kiirus toru ristlõike ulatuses ebaühtlane. Pitot toru abil tuleb dünaamiline rõhk määrata ristlõike diameetril mitmes punktis ning selle põhjal leida keskmine rõhu väärtus, mille põhjal arvutatakse kiirus. Juhul, kui pole võimalik toru ristlõike diameetril rõhkusi mõõta, või pole vajalik suur täpsus, võib mõõta rõhkusi ainult toru tsentris ja nende põhjal arvutada vooluse kiiruse ning saadud väärtuse korrutada parandusteguriga. Sellisel viisil saadud kiiruse väärtuse täpsus on $\pm 5\%$. [47]
- **Ultraheli** – töö põhineb nähtusel, et ultraheli leviku faktiline kiirus liikuvast keskkonnas sõltub ultrahelikiiruse ja keskkonna liikumise kiiruse vektorite suhtest.
- **Elektromagnetiline ehk induksioonmõõtur** – töö põhineb elektromotoorjõu mõõtmisel, mis indutseeritakse elektrit juhtivas vedelikus. Faraday seaduse kohaselt indutseeritakse teatud kiirusega magnetvälja jõujoontega risti liikuva elektrijuhtme otstes elektromotoorjõud.

2.6.2. Soojusliku hajuvuse mõõtmine

Soojuslikul hajuvusel põhinev kiiruse mõõtmine on laialdaselt kasutusel gaasiliste keskkondade kiiruse mõõtmisel, kuid on võimalik kasutada ka vedelike kiiruse mõõtmisel. Töö tugineb kuumutatud sensori jahtumise hindamisele, mis on tingitud soojuse ülekandumisest mõõdetavale voolusele. Kuumutatud sensorilt ärakantav soojushulk sõltub sensori disainist ja mõõdetava keskkonna soojuslikest omadustest, mis sõltuvad omakorda temperatuurist ja rõhust. [72]

Ärakantud soojushulga mõõtmiseks on mitmeid võimalusi ja järgnevalt on mõningad loetletud:

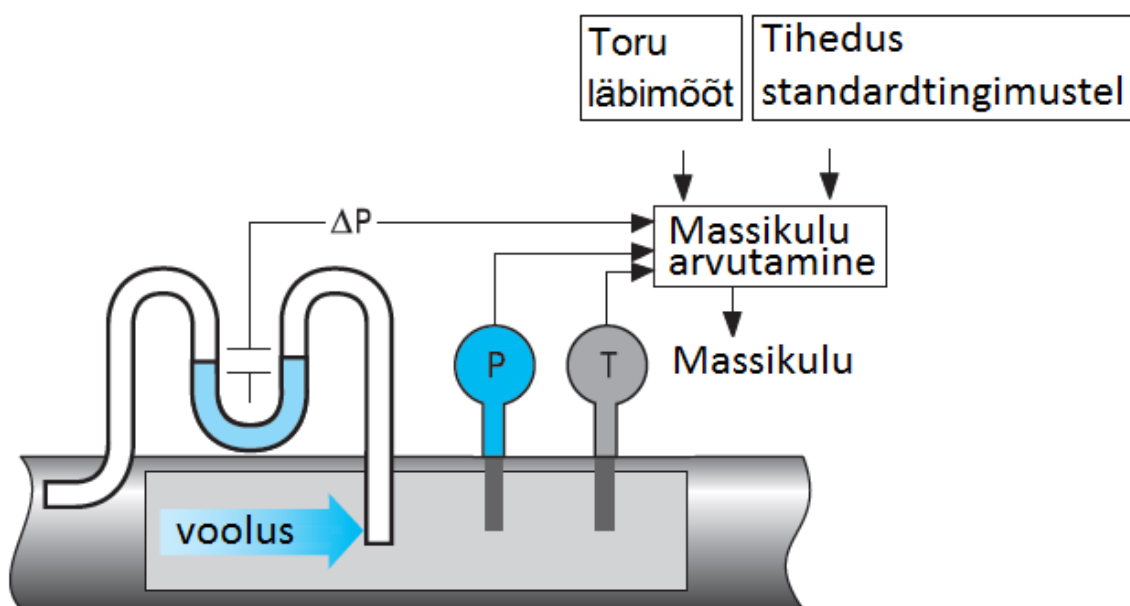
- Konstantse temperatuuri meetod. Kasutatakse kuumutatavat sensorit ja sensorit (sensoreid), mis mõõda(vad)b voolava keskkonna temperatuuri. Massikulu arvutatakse elektrilise võimsuse järgi, mis on vajalik, et hoida kahe sensori vahel konstantset temperatuuri. [72] Antud töö kolmanda peatüki punktis 4 on selgitatud konstantse temperatuuri meetodit.
- Konstantse voolutugevuse meetod. Nagu eelneva meetodi puhul kasutatakse kuumutatavat sensorit ja keskkonna temperatuuri mõõtvat sensorit või sensoreid. Selle

meetodi kasutamisel rakendatakse kuumutatavale sensorile konstantne voolutugevus. Massikulu leitakse kuumutatava sensori ja vooluse temperatuuri mõõtva sensori temperatuuri erinevusest. [72]

- Takistuse mõõtmise meetod – termoanemomeeter (kasutatav temperatuurideni ca 80 °C). Kuumutatavale sensorile rakendatakse konstantne voolutugevus või pinge ja mõõdetav voolus jahutab tööelementi ning selle elektriline takistus suureneb. Vastavalt Ohmi seadusele muutub vool tööelemendi ahelas ja voolu suurenemine või vähenemine on proportsionaalses sõltuvuses massikuluga. [72]

2.6.3. Massikulu arvutamine

Massikulu on võimalik arvutada kiiruse, temperatuuri, rõhu ja tiheduse standardtingimusel etteandmise abil, kui toru läbimõõt on teada. Sel 2.2 toodud skeemil on näidatud massikulu arvutamine.



Sele 2.2. Massikulu arvutamine dünamilisest rõhust [13]

2.6.4. Soojusarvesti

Soojusarvesti mõõdab katelt läbivat vee kulu ja siseneva ning väljuva vee temperatuuride erinevust. Soojusarvesti paigaldamisel tuleks eelistada selle paigutamist tagastuvale veetorule kuna pealevoolule mõeldud arvestite modifikatsioone toodetakse reeglina selleks, et võib esineda olukordi, kus tagasivoolule pole võimalik mingil põhjusel arvestit paigaldada (näiteks

ruumipuudus, puudub vajalik sirge toru osa, jne.). Pealevoolule paigaldatud arvesti asub raskemates töötingimustes ja tõrke tõenäosus on suurem ning tööiga lühem. Lisaks on arvesti mõõteviga suurem kuna see sõltub mõõdetava vee temperatuurist. [68]

3. ÜLEVAADE SEADMETEST

3.1. Katlad

3.1.1. Katelde tüübid

Ülemise põlemisega katlad

Konstruksioonilt on ülemise põlemisega katlad lihtsaimad ja tavaliselt töötavad korstna loomuliku tõmbe abil. Tegemist on traditsiooniliste kolletega, mis algselt projekteeriti lendosavaeste kütuste põletamiseks (antratsiit, koks ja kivisüsi). Selliseid kütuseid võib restile asetada paksu kihina ja põlemine toimub hõõgudes ning väga väikese leegiga. Enamik soojust kandub kiirgusega kolde seintele. Primaarõhu põlemisprotsessi juhtimine toimub enamasti resti alt. Lendosavaeste kütuste põletamisel on sekundaarõhu vajadus väike. Suitsugaaside soojuste ära kasutamiseks ei ole vaja suurt järelküttepinda kuna põhiline soojusvahetus toimub koldes. [39, 73]

Lendosarikaste kütuste põletamisel ülemise põlemisega koldes on vajalik jätta restile asetatud kütuse kohale piisavalt ruumi lendosade põlemiseks. Vajalik sekundaarõhk juhitakse kütuse kohale, kus toimub lendosade põlemine. Põhiline osa soojust eraldub kolde ülaosas, kus on leek. Koldest lahkuvad gaasid on suurema soojusmahtuvusega ja seetõttu on vajalik suurem järelküttepind kui lendosavaeste kütuste põletamisel. [39, 73]

Ülemise põlemisega katla töötamisel osalisel koormusel on suitsugaasis sisalduv põlemata osa suhteliselt kõrge. Kui opereerimine toimub loomulikul tõmbel on põlemata osa sügis- ja kevadperioodil, tingituna korstna kehvemast tõmbest, suurem kui talveperioodil. Optimaalne töö tagatakse katla käitamisel nominaalse võimsusega. Sellest tulenevalt on seda tüüpi katelde ühendamisel otstarbekas kasutada süsteemis soojussalvestit. Soojuse akumulatsioon võimaldab katelt käitada nominaalsel koormusel ja saavutada minimaalsed heitmed ning suur soojuslik efektiivsus. [39, 73]

Alumise põlemisega katlad

Alumise põlemisega katlad on reeglina varustatud kütuseresti kohal oleva šahtiga, kust ärapõlenud kütuse asemele valgub pidevalt uus kütus. Katlasse sisestatud kütuse kogusest, ainult teatav osa on põlemisprotsessis. Šahtis alla poole valgudes kütus kuivab ja kuumeneb. Resti lähedale jõudes eralduvad kütusest lendosad ja tekkinud lendosad põlevad lõpuni eraldi

asetsevas põlemiskambris. Lendosade põlemiskambrisse juhitakse sekundaarõhku, et tagada piisavalt kõrge temperatuur lendosade täielikuks ärapõlemiseks. Järelpõlemiskambri seintest on tavaliselt üks keraamilise kattega. Põlemisprotsessis tekkinud tuhk kukub läbi resti kolde all asuvale tuhapannile. [39, 73]

Kütusena kasutatakse tavaliselt halupuitu, puidubriketti ja turvast. Kasutatavale kütusele on kõrgemad nõudmised kui ülemise põlemisega kateldel. Töotsükkel on suhteliselt pikk, sõltuvalt šahti mahust ja kasutatavast kütusest ja see võib olla kuni ca 8 tundi. Halupuitu kütusena kasutades on töotsükkel lühem, kui turvast või puitbriketti kasutades. Alumise põlemisega kateldel on põlemisprotsess stabiilsem kui ülemise põlemisega kateldel. See tagab madalamad emissioonid ja kõrgema kasuteguri. Enamasti töötavad alumise põlemisega katelseadmed korstna loomuliku tõmbe abil, kuid esineb ka lahendusi, milles on kasutusel põlemisõhu- või tõmbeventilaator. Alumise põlemisega katelde edasiarenduseks on alttõmbega katlad. [39, 73]

Alttõmbega katlad

Eestis tuntakse alttõmbega katlaid ka puugaasikatelde nime all. Tahkekütuste katelde arengus on see lahendus käesoleval hetkel kõige uuem. Põlemisprotsess toimub kaheastmeliselt. Koldes kütus gaasistatakse (eraldatakse lendosad) ja järelpõlemiskambris tekkinud gaasid põletatakse. Kütusest eraldatud gaasid suunatakse läbi põlemist stabiliseeriva keraamilise resti. Väga heade põlemistingimuste tõttu ei ole vajalik nii suure mahuga põlemiskamber kui alumise põlemisega kateldel. Sekundaarõhu põlemisprotsessi suunamine toimub resti sisemuse või resti all asuvas põlemistsoonis, mis reeglina on keraamikaga isoleeritud. Läbi resti voolamisel on põlemisgaasidel suur takistus ja seetõttu kasutatakse põlemisõhu- ja tõmbeventilaatorit. Põlemisprotsessi paremaks kontrollimiseks kasutatakse tihti protsessi kontrollivaid seadmeid, näiteks lamdaandurit, millega määratakse hapniku sisaldus lahkuvas suitsugaasis. Kütusena kasutatakse kuivi halupuid või puitbriketti. [39]

Universaalkatlad

Universaalkateldel on kaks eraldi põlemiskambrit, mis on teineteisest sõltumatud. Ülemise põlemisega tahkekütuse kolle ja selle all paiknev vedel- või gaaskütuse (ka tahkekütuse, mille põletamist on võimalik automatiseerida) kolle, mille ette kinnitatakse vastav põleti. Võimalik on põletada väga erinevaid kütuseid – vedelkütuseid, halupuitu, puidujäätmeid, tükkturvast, turbabriketti, puitpelletteid ja kivisütt. [39]

Katla mõlemad kolded on arvestatud üheaegseks tööks. Tahkekütuse kasutamisel on kütuse lisamise intervall lühem kui alumise põlemisega katelidel. Automaatika lülitab põleti tööle, kui tahke kütus on lõpuni põlenud ja vee temperatuur langenud alla seade väärtuse. [39]

Kondensatsioonkatlad

Kondensatsioonkatla tehnoloogia põhineb kahekihiliste torude või roostevabade korrosioonikindlate teraste kasutamisel. Sama kütusekulu juures saavutatakse suurem soojusvõimsus kui tavalist tehnoloogiat kasutades. Protsess põhineb kütuses oleva vesiniku põlemisest ja niiskuse aurustumisest tekkinud veeauru katlast lahkumisel, madalamal temperatuuril, kui on veeauru kondenseerumistemperatuur. Veeaur kondenseerub (tekib vesi) ja selle käigus vabanev soojus kantakse üle soojusvahetuspindadele. Traditsioonilised katlad peavad töötama kastepunktist kõrgemal katlavee temperatuuril, et vältida suitsugaasides sisalduva veeauru kondenseerumist, mis tekitab küttepindade korrosiooni. Euroopas levinud kasuteguri määramise meetodikas kasutatakse soojusvõimsuse määramisel kütuse alumist kütteväärtust. Sellist lähenemist kasutati kuna kondenseerumisel vabanevat soojust ei olnud võimalik traditsioonilistes kateldes ära kasutada ja veeaur lahkus ilma kondenseerumiseta suitsugaaside koostises. Kasutades kasuteguri määramisel kütuse alumist kütteväärtust võib kondensatsioonkatelseadme maksimaalne kasutegur ületada 100 %. Teoreetiliselt peab kondensatsioonprotsessi stabiiluse tagamiseks katlasse siseneva vee temperatuur olema 10 – 15 K madalam, kui on kastepunkti temperatuur. Katlatehnika üks arengusuundasi on kindlasti kondensatsioonitehnoloogial põhinevate seadmete täiustamine. [39]

3.2. Põletite tüübid

Standard EVS-EN 15270:2008 [43] sisaldab katse ohutusnõudeid, põlemiskvaliteedi näitajaid, põletite töökarakteristikuid, põletite hoolduse juhiseid ja nõudeid ohutust mõjutavatele seadmetele. Standard on rakendatav põletitele, mille võimsus on kuni 70 kW ja on ettenähtud paigaldamiseks kateltele, mis toodavad sooja vett ning on mõeldud kõrgkvaliteediga pelletite (EVS-EN 14961:2011 [49]) põletamiseks.

- **Ülemise etteandega põletid**
Lihtsaima konstruktsiooniga tahkekütuse põleti. [39]
- **Horisontaalse etteandega põletid**

Põleti korpus on seesmine horisontaalselt asetsev kütuse etteandetigu, mis lükkab kütust põlemisrestile. Konstruktsioon on keerulisem, kui ülemise etteandega süsteem, kuid tagab ühtlase kütuse etteande põlemisrestile ja süsteem on kütuse kvaliteedile vähem tundlik. [39]

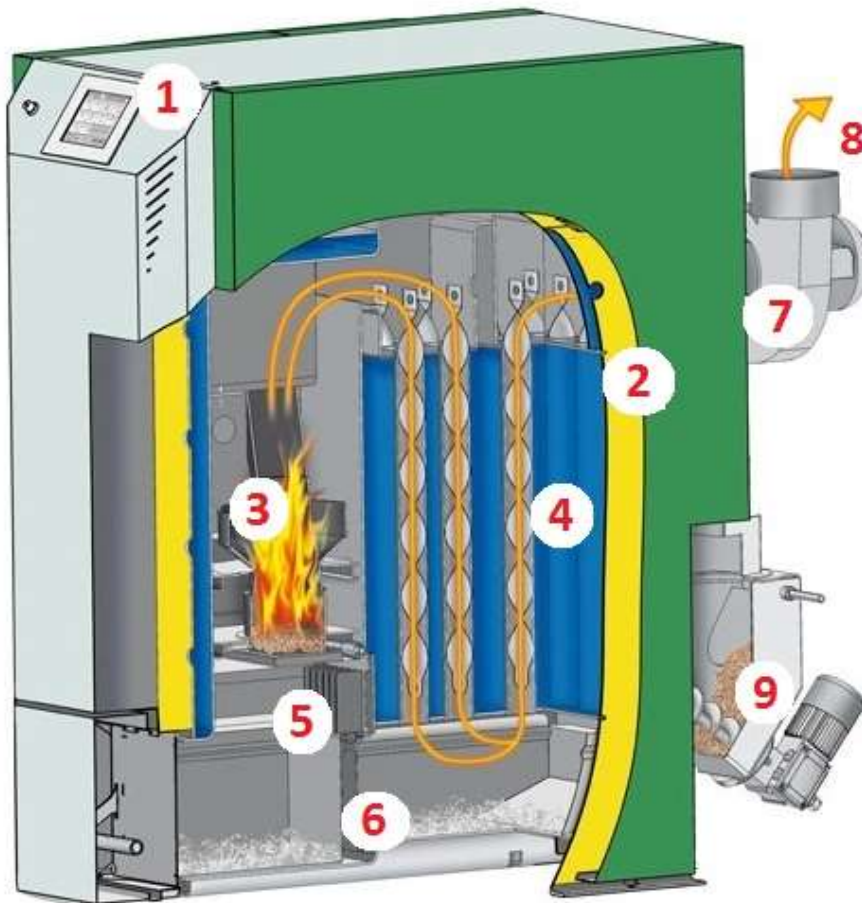
- **Alumise etteandega põletid**

Kütus suunatakse horisontaalse teo abil läbi pöördkambri põlemispeale, kus ärapõlenud kütusest tekkinud tahke jääk langeb üle põlemispea äärte ja keskelt siseneb uus kütus. Sellist tüüpi põletid võimaldavad põletada suurem tuha sisaldusega kütust, kui kaks eelnevat kirjeldatud põleti tüüpi, ilma, et oleks resti ummustumise oht. Uus alt peale surutav kütus purustab tuhast moodustunud struktuuri. [39]

3.3. Kommerts

3.3.1. Herz

Pelletstar 10 -60



- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| 1. Juhtpaneel | 6. Tuhašaft |
| 2. Soojusisolatsioon | 7. Lambdaandur |
| 3. Põlemiskamber | 8. Ventilaator |
| 4. Torusoojusvaheti | 9. Tagasipõlemise kaitstesüsteem |
| 5. Liikuv rest | |

Sele 3.1. Pelletstar, soojuslik võimsus 10 – 60 kW [17]

Tootja Herz katelseade Pelletstar on projekteeritud pelletite põletamiseks ja seadme konstruktsioon tagab kõrge efektiivsuse, mis ulatub kuni 95 %. Saadaval olevad seadmed on nominaalse võimsusega 10 – 60 kW. Katelseadme komplekti kuuluvad põleti,

tembeventilaator ja juhtsüsteem, mis kasutab põlemisprotsessi juhtimiseks lambda- ja koldetemperatuuri andurit. Juhtpaneel on puutetundlik ja automaatika võimaldab juhtida kuni 55 lisamoodulit. Seadmel on andmete ülekandmiseks ja/või juhtprogrammi uuenduste tegemiseks USB-liides. Lisaks on seadet võimalik ühendada internetiga ja kõiki protsessi andmeid läbi interneti jälgida ning vajadusel neid muuta. [17]

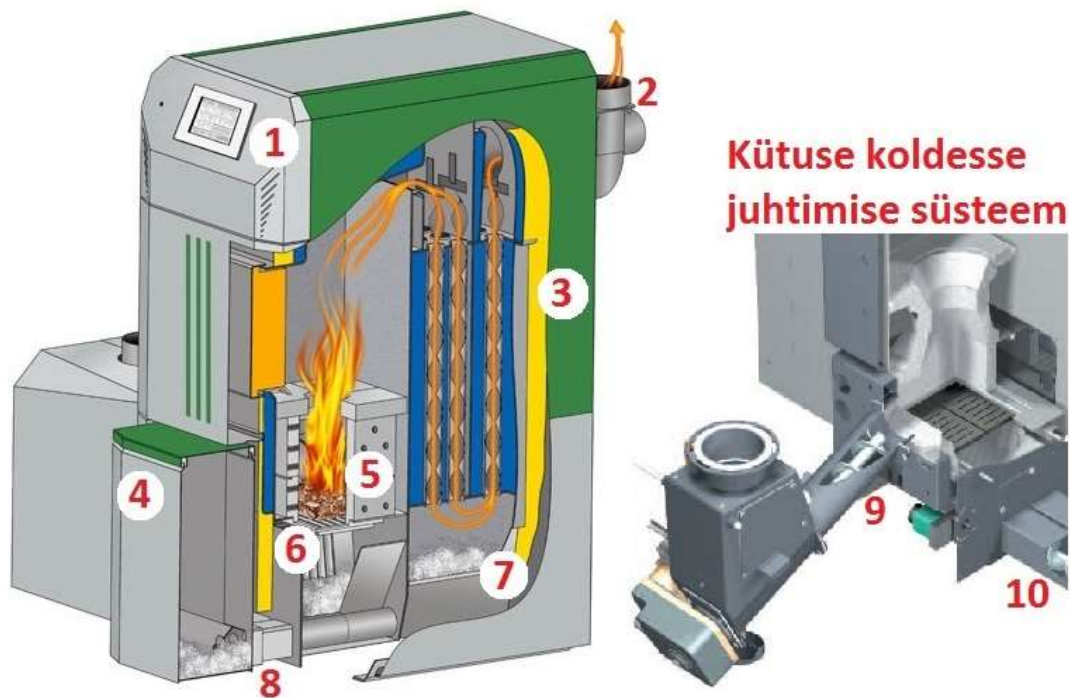
Põlemiskamber on valmistatud kõrget temperatuuri taluvast roostevabast terasest. Lambdaandur analüüsib pidevalt suitsugaasides oleva hapniku kogust ja see võimaldab seadistada optimaalse põlemisõhu koguse erintevate kütuste või muutuva koostisega kütuste põletamisel ning sellega kaasnevad madalad emissioonid suitsugaasidega. [17]

Põlemisresti ja soojusvahetuspindade puhastamise süsteem on automaatne ja sellega tagatakse minimaalne seadme hooldusvajadus. Soojusvaheti puhastamiseks kasutatakse gaasikäikudesse integreeritud turbulaatoreid. Puhastamise käigus eemaldatav sadestis kukub tuhašahti. Perioodiline põlemisresti puhastus tagab takistusteta põlemisõhu pääsemise protsessi. Resti puhastamiseks seda liigutatakse ja tahkepõlemisjääk kukub otse tuhašahti. Tuhašahti langev tuhk transporditakse transportöörkruviga tuha kogumiskasti, mis on seadme küljest eemaldatav. Perioodiline puhastamise süsteem tagab hea soojusvahetuse ja see on oluline komponent suure efektiivsuse saavutamisel. [17]

Katelseadmele Pellestar on saadaval käsitsi täidetav kütusepunker, seadmele võimsusega 10 - 30 kW mahuga 165 liitrit ja võimsusega 10 -60 kW mahuga 210 liitrit. Punkrid ja katel on omavahel jäigalt ühendatud. [17]

Tootja soovib katelseadme käitamisel kasutada kütust, mis kuulub standardis EN 14961-2 määratletud A1 klassi kütuste hulka. [17]

Firematic



- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Juhtpaneel | 6. Liikuv põlemisrest |
| 2. Ventilaator | 7. Tuhašaht (lendtuhk ja sadestised) |
| 3. Soojusisolatsioon | 8. Tuha transportöör kruvi |
| 4. Tuha kogumiskast | 9. Kütuse transportöör kruvi |
| 5. Kaheosaline põlemiskamber | 10. Tuha transportöör kruvi |

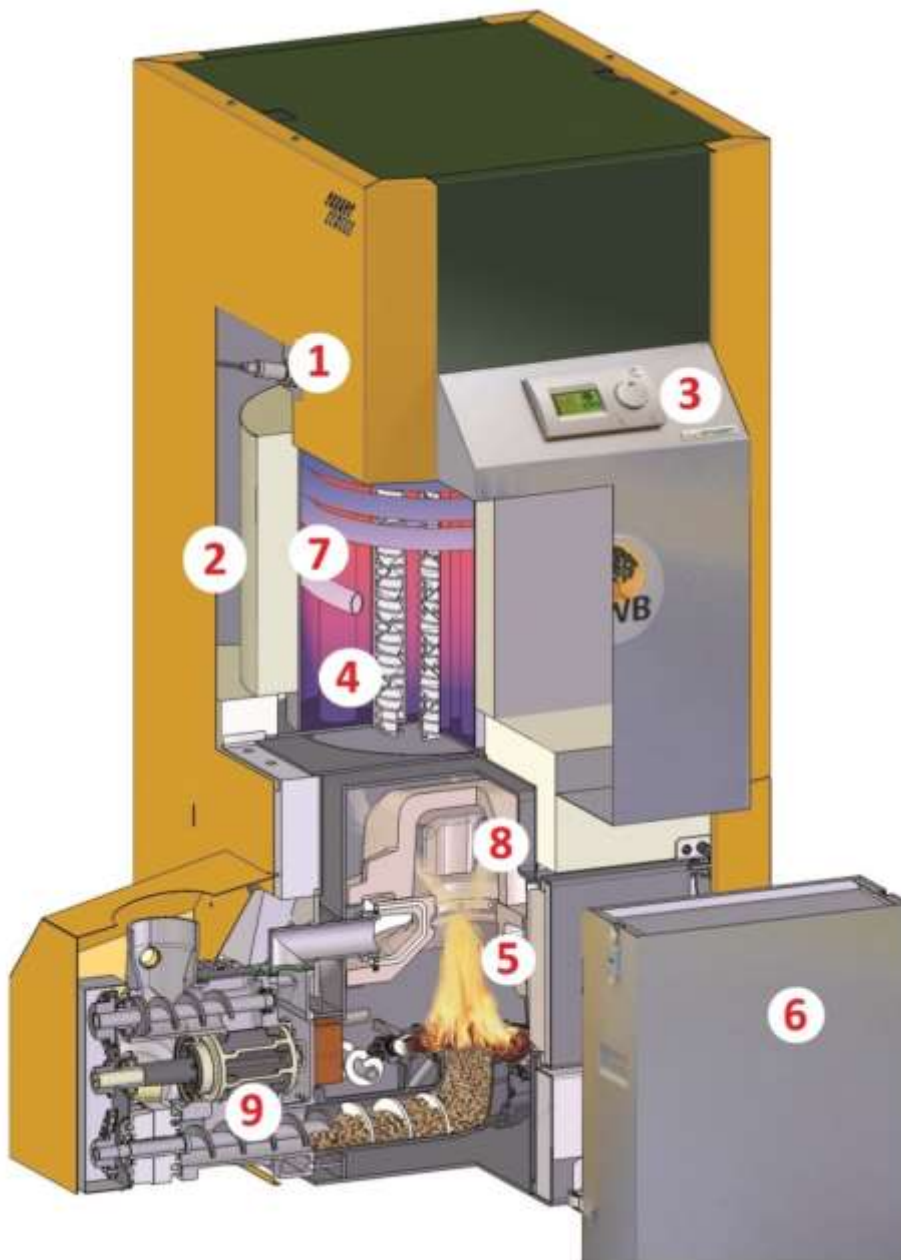
Sele 3.2. Firematic, soojuslik võimsus 20 – 60 kW [17]

Katelseade on täisautomaatne ja on projekteeritud kasutama pilleideid või hakkpuitu. Toodetakse kahte modifikatsiooni, mille nominaalne võimsus on pelletkütusel 20 – 60 kW ja 80 – 499 kW. Seadme efektiivsus on kuni 96 %. Põlemiskamber on jaotatud primaar- ja sekundaarõhu tsoonideks. Disain ja kasutatud materjalid on väga sarnased sama tootja seadmega Pelletstar. Kasutusel olev juhtautomaatika on sama nagu on katlal Pelletstar. [17]

Tootja poolt soovitatud pelletkütus peab vastama standarditele EN 14961-2 (klass A1), Swisspellet, DINplus, ENplus või ÖNORM M7135 ja hakkpuit peab vastama standarditele EN 14961-1/4 (klass A1, A2, B1 ja osakese suurus P16B, P31,5 või P45A), ÖNORM M7133 (G30-G50) ning maksimaalne niiskuse sisaldus kuni 40 %. [17]

3.3.2. KWB

Easyfire



- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Lambdaandur | 6. Tuhakonteiner |
| 2. Soojusisolatsioon | 7. Tagastuva vee eelsoojendi |
| 3. Juhtpaneel | 8. Tsüklon peenosakeste eemaldi |
| 4. Turbulaatoriga torusoojusvahetid | 9. Tagasipõlemise kaitsesüsteem |
| 5. Põlemiskamber | |

Sele 3.3. Katelseade Easyfire, soojuslik võimsus 8 – 35 kW [25]

Tootja KWB katel Easyfire on projekteeritud tööks pelletkütusel ja selle nominalane võimsus on 8 – 35 kW. Tootja katseandmete põhjal on seadme efektiivsus 92 - 96 %. [25]

Seadme töö juhtimisel kasutatakse spetsiaalselt väljaarendatud lairiba lambdaandurit. Kütuse süütamiseks on keraamiline element, mida montitakse fotoelemendiga. Sellega tagatakse kiire süütamine ja väike energiatarve. Tahkete osakeste eemaldamiseks suitsugaasist on kasutusel tsüklontoimeline süsteem, mis kindlustab minimaalse tahkete osakeste emisiooni ja tekkiv turbulents suurendab soojusülekanne efektiivsust. Koldest väljuv suitsugaas imetakse ventilaatori abil läbi turbulaatoritega soojusvahetite. [25]

Tavajuhtpaneel on varustatud ruumitemperatuuri anduriga ning LED märgutuledega. Režiimi kohta annab informatsiooni märgutuli. Eksklusiivjuhtpaneelil on lisaks tavapaneeli juhtimisvahenditele puutetundlik ekraan ja tarkvara uuendusi on võimalik teha SD mälukaardi või internetikaabli abil. Seadme saab ühendada internetiga ja kõiki parameetreid jälgida ning vajadusel läbi interneti muuta. [25]

Tagasipõlemise kaitseks on kütuse koldesse juhtimise süsteemis spetsiaalne lüüs. Selel 3.4 on alumiiniumist korpusega alattoitega põlemissüsteem, millel on roostevabastterasest põlemisplaat, mis tagab stabiilse põlemise ja ei põhjusta täiendavat osakeste lendumist. [25]



Sele 3.4. Seadme Easyfire pöörleva plaadiga põleti [25]

Tootja poolt soovitatud pelletkütus peab olema sertifitseeritud vastavalt standardile ÖNORM M7135, ISO 17225-2, või standardile DIN plus. [25]

Multifire II



- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. Ventilaator | 5. Liikuv rest |
| 2. Juhtpaneel | 6. Tuha transportöör kruvi |
| 3. Turbulaatoriga soojusvaheti | 7. tuhakogumiskast |
| 4. Ühekambriline lüüs | 8. Veetoru |

Sele 3.5. Multifire II, soojuslik võimus 20 – 120 kW [25]

Hakkpuidu- ja pelletikatel Multifire II on saadaval võimsuse vahemikus 20 – 120 kW. Kasutusel olev juhtautomaatika on sama, mis seadmel Easyfire, kuid lisaks lambdaandurile kasutatakse ka koldetemperatuuri andurit. Tagasipõlemise kaitseks on sarnane lüüs nagu seadmel Easyfire. Kütus juhitakse koldesse transportöörkruvi abil ja põlemisprotsess toimub pöörleval restil, mis sarnaneb roomikuga. Põlemiskamber on valmistatud silikonkarbiidist ja kuju optimeerimisel on kasutatud CFD (*Computational fluid dynamics*) tehnoloogiat.

Isepuhastuv liikuva resti süsteem (vt. joonis 3.6) võimaldab kasutada erinevat kütust, mille kvaliteet võib oluliselt varieeruda. Soovitav on kasutada hakkpuitu, mis vastavalt standardile ISO 17225-4 [50] kuulub A1, A2 või B1 klassi ja pelletkütust, mis vastavalt standardile ISO 17225-2 [48] kuulub klassi A1. [17]



Sele 3.6. Pöörlev restisüsteem [25]

Pöörlev restisüsteem on valmistatud kõrglegeritud malmist. Kütuse põlemine toimub stabiilselt kuna resti liikumiskiirus on väike ja sellega kaasneb madal emissioonide tase. Sõltuvalt kütuse omadustest muudab katla juhtautomaatika resti liikumise kiirust (ja õhukulu). Resti pöörlema panekuks kasutatakse autotööstuses töökindlust tõestanud elektrimootorit. [25]

Kütusepunker

Tootja KWB tootevalikus on saadaval pelletikatlale sobivaid kütusepункreid, mahuga 107 ja 300 liitrit, mis asetatakse vahetult katelseadme kõrvale ning mida täidetakse kütusega käsitsi. [25]

3.4. Gaasianalüsaatorid

Standard EVS-EN 14181:2014 [63] täpsustab automatiseeritud mõõtmisüsteemidele standardprotseduurid, millega kindlustatakse kvaliteedi tagamise tase QAL1, QAL2 või QAL3. (QAL: inglisekeelsest terminist tulenev akronüüm – *Quality Assurance Level*). Standard on mõeldud kasutamiseks süsteemides, mis on sertifitseeritud lähtuvalt standardi seeriast EN 15267 [2].

3.4.1. Gasmät

Portatiivne analüsaator DX4000



Sele 3.7. Portatiivne gaasianalüsaator DX4000 ja proovi võtmise seade [14]

Gaset DX4000 on portatiivne FTIR (Fourier transform infrared) tehnoloogiat kasutav ekstraktiivne gaasianalüsaator, mis võimaldab kuumas ja niiskes gaasis määrata mitmeid gaasikomponente. Korrosioonile resistentne mõõterakk kuumutatakse maksimaalselt kuni 180 °C-ni. Lisaks mõõteraku kuumutamisele on seadmel kuumutatav proovivõtuliin, millega tagatakse analüüsitava aine gaasilises olekus püsimine. Eriti oluline on kondenseerumise vältimine vees lahustuvate komponentide puhul (SO₂, NH₃, HCl jne.). Tüüpiliselt on aparaat

seadistatud H₂O, CO₂, CO, NO, NO₂, N₂O, SO₂, NH₃, CH₄, HCl, HF ja erinevate VOC (Volatile organic compound) mõõtmiseks, kuid võimalik on ilma riistvara muudatusteta mõõta täiendavaid gaasikomponente. Samaaegselt on võimalik mõõta kuni 50 erinevat gaasikomponenti. Kokku on seadmega võimalik mõõta kuni 400 erinevat gaasikomponenti. Lisaks mõõdab seade analüüsitava gaasi temperatuuri ja rõhku ning täpse hapniku sisalduse määramiseks on seadmega võimalik ühildada ZrO₂ andur. [14]

Seade on sertifitseeritud asutuse MCERTS poolt lähtuvalt standardist EN 15267. Vastavalt MCERTS tehnilisele juhendmaterjalile TGN M22 [72] tuleb FTIR seadmega proovi võtmisel ja selle asukoha valimisel lähtuda standardis EN 15259 [3] esitatud nõuetest ning võetud proov peab olema esinduslik.

Proovi võtmise eel on vajalik teada suitsugaasi järgmisi omadusi:

- Eeldatav temperatuur,
- Eeldatav niiskuse sisaldus,
- Eeldatav tahkete osakeste sisaldus,
- Eeldatav mõõdetavate gaasikomponentide kontsentratsioon ja emmisiooni piirväärtused,
- Eeldatav ainete kontsentratsioon, mis segavad proovi võtmist (vähemalt standardis EN 15267-3 loetletud komponendid). [66]

Kanalites suitsugaasi veeauru sisalduse määramist käsitleb standard EVS- EN 14790:2005 [59] ja see standard on kasutusel FTIR seadmetel referentsmeetodina. Alternatiivina on võimalik veeauru sisalduse määramisel lähtuda tehnilisest spetsifikatsioonist CEN/TS 14793 [55].

Veeauru sisaldust tuleks mõõta lisaks veel mõne teise seadmega. See on vajalik, et katsetulemustele saaks teha korrektuuri lähtuvalt referentstingimustest. Veeauru sisaldus mõjutab teisi mõõdetavaid komponente kuna sellel on väga lai spektri ulatus. [66]

Tabelis 3.1 on toodud mõnede gaasikomponentide mõõtmiseks referentsmeetodid, lähtuvalt tehnilisest juhendmaterjalist TGN M22.

Tabel 3.1. Referentsmeetodid FTIR tehnoloogiale [66]

Mõõdetav komponent		Standard referentsmeetod
H ₂ O	Veeaur	EN 14790
HCl	Vesinikkloriid	EN 1911
SO ₂	Vääveldioksiid	EN 14791
HF	Vesinikfluoriid	ISO 15713
NO _x	Lämmastikoksiidid (NO ja NO ₂)	EN 14792
CO	Süsinikmonoksiid	EN 15058
TVOC	Gaasiline orgaaniline süsinik (madal kontsentratsioon)	EN 12619
TVOC	Gaasiline orgaaniline süsinik (kõrge kontsentratsioon)	EN 13529

Statsionaarne süteem CEM II



- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Kompressorjahutusseade | 4. Proovivõtmise süsteem |
| 2. Gasmeti tööstuslik arvuti | 5. ZrO₂ hapniku analüsaator |
| 3. CEM signaaliides | 6. CX 4000 gaasianalüsaator |

Sele 3.8. Gaasianalüüsisüsteem CEMS II [14]

Gaasianalüüsisüsteem CEMS II (inglise keelsest nimetusest tulenev akronüüm – *Continuous Emission Monitoring System*) koosneb moodulitest ja kasutab analüüsimiseks FTIR tehnoloogiat. Süsteem koosneb järgmistest osadest:

- FTIR gaasianalüsaator CX4000,
- Gasmeti tööstuslik arvuti,
- Gasmeti proovivõtmise süsteem (sisaldab võrdlus- ja nullgaasi),
- Vahelduvvoolu kapp (seadme peal või tagaküljel),
- CEM signaaliliides,
- ZrO₂ hapniku analüsaator,
- Proovivõtusond ja kuumutatav proovivõtuliin. [14]

Süsteem on monteeritud 19 tollisele raamile ja seadmed paiknevad välja tõmmatavates sahtlites. Süsteemi töö on täielikult automatiseeritud kuid kõiki funktsioone on võimalik käsitsi muuta. Võrdlus/nullpunkti kalibreerimiseks on süsteemis kaks solenoidklappi. Seadmel on analoog- ja digitaalside väljundid ja sisendid. [14]

Nagu seade Gasmel DX4000 võimaldab CEMS II mõõta korraga kuni 50 gaasikomponenti. Spetsiaalne Calcmet'i tarkvara analüüsib näidisgaasi spektrit ja seejuures arvestab häiringuid, mida põhjustavad teised gaasikomponendid üksteisele. CEMS II võimaldab mõõta kogu orgaanilise süsiniku sisalduse **ilma lisa FID moodulita**. [14]

FTIR tehnoloogia ei nõua võrdlusgaasi kasutamist või uuesti kalibreerimist, vajalik on ainult nullpunkti kalibreerimine lämmastikuga iga 24 tunni järel, mis on võimalik CEMS II seadme puhul teostada automaatselt. Seadme hooldusvajadus on suhteliselt vähene. [14]

Mõõtmisüsteem on sertifitseeritud asutuste MCERTS ja TÜV Rheinland poolt lähtuvalt standardist EN 15267-3. [14]

CX4000

Seade CX4000 on statsionaarne gaasianalüsaator ja see sisaldab Fourier teisendusel töötavat spektromeetrit, kuumutatavat mõõterakku ja signaali töötlevat elektroonikat. Seade on

disainitud pidevaks emisioonide monitoorimiseks. Tööpõhimõte ja omadused on väga sarnased analüsaatoriga DX4000. [14]

ZrO₂ hapniku analüsaator

Analüsaator võimaldab hapniku sisalduse mõõtmist sooritada märgades ja kuivades suitsugaasides. Analüüsimiseks on kasutusel ZrO₂ mõõterakk. Kalibreerimiseks kasutatakse õhku või spetsiaalset gaasi, mis on analüüsisüsteemi juurde kuuluvates balloonides. Seadme tootjaks on Enotec. [14]

3.4.2. ABB

Järgnevalt väljatoodud ABB statsionaarsed gaasianalüüsi süsteemi komponendid on vastavuses standardi seeriaga EN 15267. [1]

Multifid14 ja Multifid14 NMHC

Multifid14 on leegi ionisatsiooni andur (FID: inglise keelsest nimetusest tulenev akronüüm – *Flame Ionization Detector*), mis mõõdab kogu orgaanilise süsiniku sisaldust. Orgaaniline aine, mis analüüsitavas gaasis sisaldub ioniseeritakse vesiniku põlemisel ja mõõdetud ionide voog on proportsionaalne kontsentratsiooniga gaasis. Süsinikmonoksiid ja süsinikdioksiid pole FID tehnoloogia abil tuvastatav. [1]

Multifid14 NMHC (NMHC: inglise keelsest nimetusest tulenev lühend – *Non-Methane Hydrocarbon*) mõõdab kogu orgaanilise süsiniku sisaldust koos metaaniga või ilma metaanita. Solenoidklapi abil juhitakse analüüsitav gaas läbi katalüsaatori, kus kõik süsivesinikud peale metaani põlevad ära või, kui tahetakse määrata kogu orgaanilise süsiniku sisaldust, juhitakse analüüsitav gaas otse andurile. Nende kahe alterantiivselt mõõdetud väärtuse põhjal on võimalik arvutada mittemetaani sisaldav süsivesinike kontsentratsioon. [1]

Uras26

Uras26 on NDIR tehnoloogial töötav fotomeetriline seade, mis on sobiv pidevaks gaasiliste heitmete monitoorimiseks. Seadmega saab selektiivselt mõõta kuni nelja infrapunakiirgusele tundliku gaasikomponenti ja andurid täidetakse gaasiga, mille sisaldust tahetakse mõõta. Uras206 mõõtmispõhimõte tugineb mittehajuva infrapunakiirguse neeldumisel lainepikkuse 2,5 – 8 pikomeetrit ulatuses. Lisaks saab Uras26-ga kombineeritult samasse korpusse

paigaldada Magnos206 paramagneetilise hapniku analüsaatori või elektrokeemilise hapniku anduri. [1]

Standardiorganisatsiooni CEN poolt kinnitatud referents meetodid gaasikomponentide mõõtmiseks NDIR seadmega.

Tabel 3.2. Referentsmeetodid NDIR tehnoloogiale

Mõõdetav komponent		Standard referentsmeetod
CO	Süsinikmonoksiid	EVS-EN 15058:2006 [59]
TVOC	Gaasiline orgaaniline süsinik	EVS-EN ISO 13199:2012 [61]
N ₂ O	Dilämmastikoksiid	ISO 21258:2010

Magnos206

Magnos206 on sobilik mõõtmisteks, kus määratava gaasi kontsentratsioon võib varieeruda suhteliselt kiiresti ja suures vahemikus. Analüsaatori mõõtevahemiku on võimalik seadistada ja kohandada erinevate mõõtmisülesannete lahendamiseks. Väikseim mõõtepiirkond on 0 – 0,5 vol. % ja suurim 0 – 100 vol. %. Nullpunkti kalibreerimine on vajalik suhteliselt harva ja võrdlusgaasina kasutatakse õhku, lämmastiku või spetsiaalset katsegaasi segu. [1]

Limas23

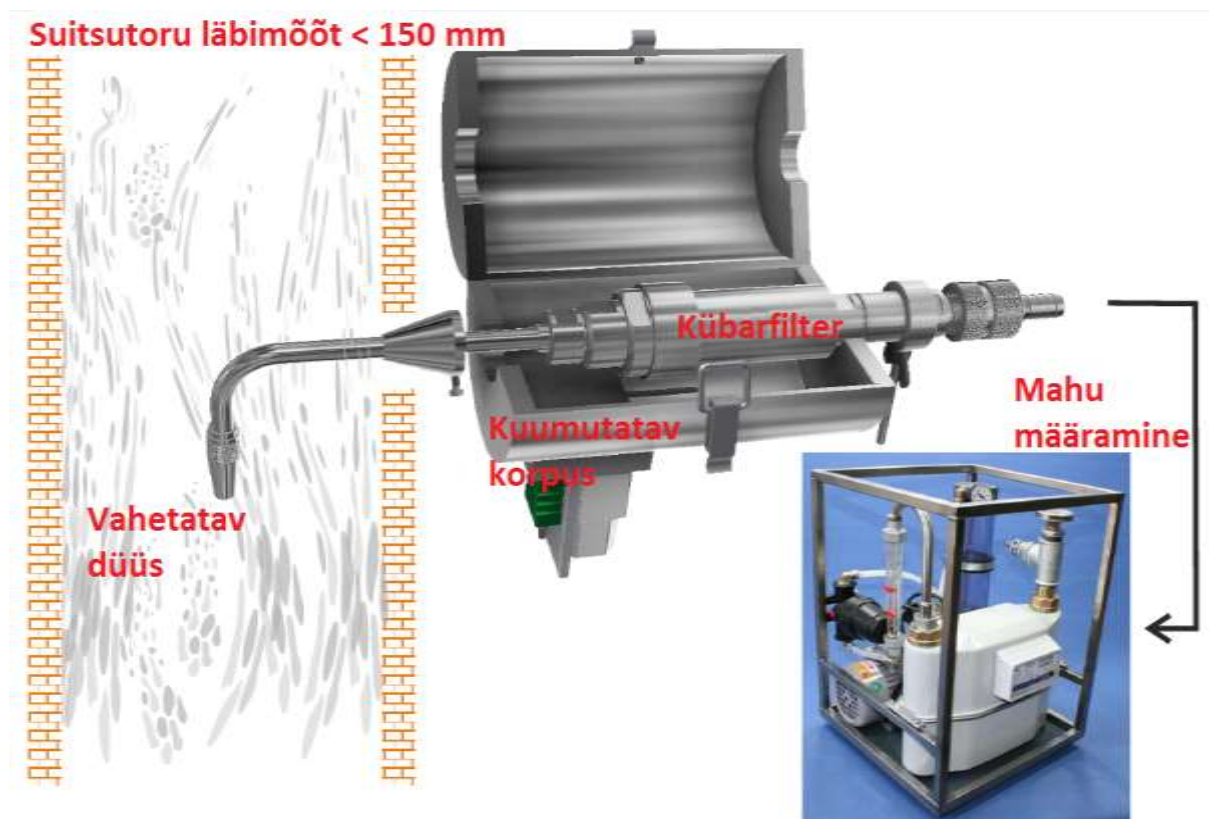
Limas23 on UV-RAS (inglisekeelsest terminist tulenev lühend – *Ultraviolet resonance absorption spectroscopy*) tehnoloogial töötav fotomeetriline gaasianalüsaator, millega saab mõõta erinevate gaasikomponentide sisaldust. Seade töötab ultravioletkiirguse spektri vahemikus 200 – 600 nanomeetrit ja mõõtmine toimub pidevalt. Nagu gaasianalüsaatori Uras26 puhul võimaldab Limas23 paigaldada samasse korpusesse hapniku analüsaatori Magnos26 või hapniku anduri. [1]

3.5. Peenosakesed

3.5.1. Paul Gothe

Paul Gothe seadmete/vahendite tootmisprotseduur on sertifitseeritud lähtuvalt standardi ISO 9001 nõuetest, mis spetsifitseerib nõuded kvaliteedijuhtimissüsteemile. [41]

Väikesed süsteemid



Sele 3.9. Peenosakeste Summaarse kontsentratsiooni mõõtmine [41]

Paul Gothe toodetud seade peenosakeste **kogu masskontsentratsiooni määramiseks** väikesemõõdulistes süsteemides. Seadmel on vahetatav düüs ja selle läbimõõt valitakse lähtuvalt suitsugaaside voolamiskiirusest kanalis. Düüsi valikuga tuleb ideaalse käsitluse korral saavutada isokineetilised proovivõtu tingimused. Selleks on vajalik eraldi rõhu ja temperatuuri mõõtmine. Sondi kõverusraadius on 25 mm ja võimalik on valida düüse vahemikus 3 kuni 30 mm. Kondenseerumise vältimiseks on tahkete osakeste püüdmise seadme ümber korpus, mida on võimalik kuumutada vahemikus 50 kuni 300 °C. Kasutades erinevat kulumõõturit on võimalik muuta proovivõtukulu vahemikus 0,2 kuni 2,5 m³/h. Analüüsimine tehakse lähtuvalt standardist EN 13284-1. [41]

Impaktor Johnas II

Kaskaadimpaktor koosneb mitmest põrkumise plaadist, mis paiknevad üksteise järel ja millel on gaasi liikumise suunas järjest väiksemad väljalõikeavad. Igas plaadis olevate avade suurus

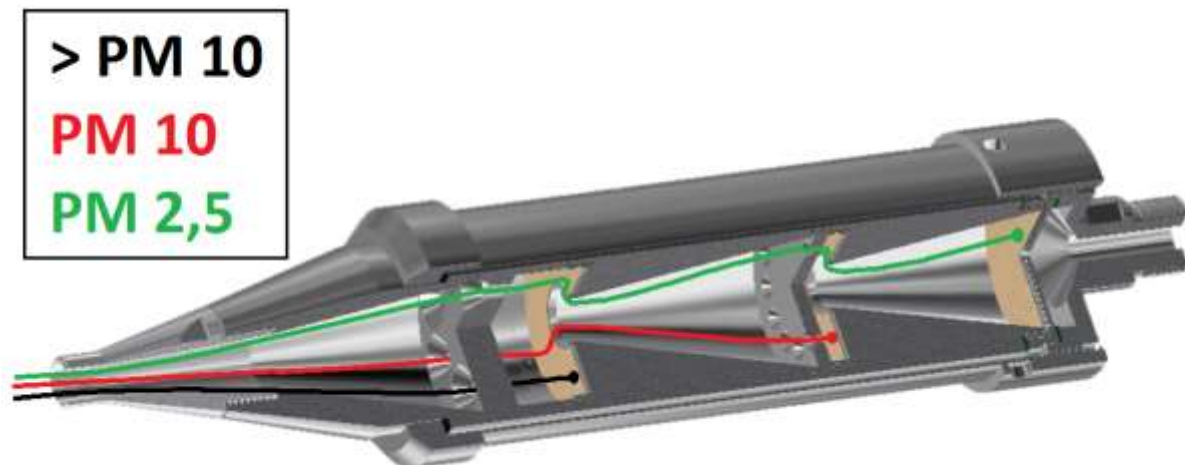
sõltub gaasi liikumise kiirusest ja plaadi geometriast. Põrkumise tasandil paiknevad filtrid, mis väldivad osakeste põrkumise tasandilt ja seovad vastava suurusega osakesed enda külge. Kaskaadimpaktoriga määratakse tahketeosakeste suurusjaotust.

Kaskaadimpaktor Johnas on valmistatud titaanist või roostevabast terasest. Impaktorit on võimalik ühendada Paul Gothe või mõne teise sarnase isokineetilise proovivõtmise süsteemiga. Seade on saadaval osakeste mõõtmiseks aerodünaamilise diameetriga $> 10 \mu\text{m}$, $10 \leq 2,5$ (või 4) μm ja $< 2,5$ (või 4) μm . Osakese aerodünaamiline diameeter on ekvivalentne sfäärilise osakese diameetriga, mille tihedus on 1 g/cm^3 ja aerodünaamilised omadused on samasugused. Mahukulu proovi võtmisel on suhteliselt suur (ca $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$, täpne väärtus sõltub lahkuvgaasi omadustest) ning sellest tingituna on proovi võtmise aeg suhteliselt lühike. Näiteks peenosakeste kontsentratsioonil 10 mg/Nm^3 korral on see 30 minutit. [41]

Impaktori töö põhineb osakeste erineval inertsjõul ja analüüsitav gaas imetakse proovivõtuliini isokineetiliselt (eelnevas punktis on kirjeldatud isokineetilisuse tagamiseks vajalikud meetmed). Osakeste liikumistrjektoor impaktoris on näidatud seel 3.10. Kuna gaasi liikumiskiirus impaktoris peab olema konstantne (määratud impaktori konstruktsiooniga), siis proovivõtu isokineetilisus tagatakse proovivõtusondi düüsi ava läbimõõdu valikuga. Sõltuvalt voolukiirusest kanalis saab sobiva düüsi suuruse arvutada Ms Exceli rakenduse abil, mis on tootega kaasas. Maksimaalne mõõdetava keskkonna temperatuur on kuni $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ja peenosakeste kontsentratsioon kuni 200 mg/m^3 . Impaktormõõteseadmele on Paul Gothe tootevalikus kuumutatav korpus, mis võimaldab lõõrivälist osakeste separeerimist. [41]

Impaktor Johnas II osakeste separeerimiskõverad on sarnased standardis ISO 7708 [4] toodutega ja vastavalt standardile ISO EVS-23210:2009 on $10 \mu\text{m}$ ning $2,5 \mu\text{m}$ suuruste osakeste separeerimiseefektiivsus 50 %. Osakeste kontsentratsioon gaasis määratakse gravimeetriselt filtrile ladestunud massist ja nende filtrile sadestumine sõltub järgnevatest teguritest:

- Osakese aerodünaamilisest diameetrist,
- Düüsi ja filtri vahelisest kaugusest,
- Düüsi diameetrist,
- Mõõdetava gaasi (osakeste) kiirusest düüsis,
- Gaasi dünaamilisest viskoossusest. [41]



Sele 3.10. Osakeste liikumistrajektor kaskaadimpaktoris sõltuvalt nende suuruselt [44]

3.6. Õhu massikulu

ABB Sensyflow FMT700-P on õhu massikulu mõõtmise seade, mis on akrediteeritud standardist DIN EN ISO/IEC 17025:2005 lähtuvalt. [1]

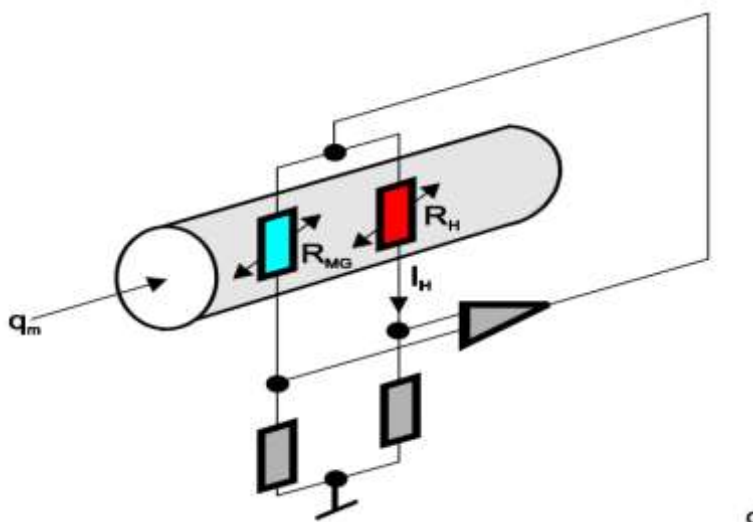
Mõõtmine ei sõltu mõõdetava keskkonna rõhust ega temperatuurist. Laialdaselt kasutatakse seadet referentssüsteemina autotööstuses sise põlemismootorite põlemisõhu massikulu mõõtmisel. Seade on saadaval kuue erineva nimidiameetriga vahemikus DN 25 – DN 200 ja mõõtepiirkond on 1 – 4000 kg/h. Seadme paigalduse lihtsustamiseks on saadaval erineva pikkusega torud, filtrid ja ühendamise tarvikud, mille abil kuluandur õhuliiniga ühendada. [1]

Mõõtmiste ajavahemiku suurus on võimalik seadistada vastavalt õhu voolamise kiirusele või soovitud signaali täpsusele. Minimaalne sooritatud mõõtmiste ajavanemik on 1 ms. Lisaks massikulu mõõtmisele on võimalik mõõta õhu mahukulu ja temperatuuri. Seade väljastab analoog- või digitaalsignaali. [1]



Sele 3.11. Sensyflow FMT700-P [1]

Selel 3.12 moodustavad takistid R_H ja R_{MG} elektriahelas silla ja takisti R_H kuumeneb ning takisti R_{MG} saavutab volava gaasi q_m temperatuuri elektrivoolu I_H toimel kuna $R_H < R_{MG}$. Voolu I_H kontrollitakse ECU (inglise keelest tulenev akronüüm – *Electronic Control Unit*) abil, et hoida konstantset temperatuuride erinevust takisti R_H ja R_{MG} vahel. Elektrivool, mille ECU suunab takistile R_H kompenseerib takistilt gaasile kandunud soojushulga. Takistilt R_H ärakantav soojushulk sõltub sellest kui palju õhu osakesi põrkub takisti R_H pinnale ja voolu tugevus I_H näitab sõltuvust massikulust. Järelikult, kui gaasi tihedus suureneb rõhu suurenemise või temperatuuri langemise tõttu, aga gaasi maht jääb samaks, siis tihedam gaas kannab ära suurema soojushulga ja saadakse suurem massikulu. [1]



Sele 3.12. Konstantse temperatuuri erinevuse meetod [1]

3.7. Soojusarvesti

SONTEX soojusarvesti Superstatic 449 on metrooloogilise klassiga 2 ja omab Euroopas tüübi heakskiitu vastavalt mõõtevahendite direktiivile MID 2004/22/EC ning standardile EN 1434:2007. Superstatic arvestid omavad Euroopas tüübiheakskiidu sertifikaati eeldusel, et mõõdetavas kontuuris on soojuskandjana kasutusel vesi. [52]

Seade on saadaval nominaalsele veekulule 0,6 – 2,5 m³/h ja mõõdetav maksimaalne veekulu on 5 m³/h ning minimaalne 0,006 m³/h. Korpus on valmistatud messingist, mille veeliiniga ühendus on ¾ või 1 tolli ja pikkus 110 – 190 mm. Töötemperatuur on – 20 kuni 200 °C ja vee temperatuuride mõõtmiseks kasutatakse termopaare gradueeringuga Pt 100 või Pt 500. Toide võetakse elektrivõrgust või alternatiivina kasutatakse akut. Mõõdetavat väärtust saab lugeda otse LCD (Liquid-Crystal Display) ekraanilt või läbi digitaal- või analoogväljundi edastada näiteks personaalarvutisse. [52]

Elektrivõrgu toitel registreerib seade tagastuva ja pealevoolu temperatuuri iga 3 sekundi järel, kui kasutusel on akutoide salvestatakse temperatuurid iga 30 sekundi järel. Seadme töö põhineb vedeliku võnkumise mõõtmisele. Otsillaatoris suunatakse vedelik düüsi ja sealt väljub kiirendatud vedelikujuga. Düüsist väljuv vedelikujuga suunatakse separaatori abil paremal või vasakul asuvasse kanalisse, kus mõõdetakse piesoelektrilise anduriga tekitatud survet. Vedelik voolab kanalist tagasi läbi tagasijooksu silmuse ja suunab düüsist väljuva joa teise kanalisse ning tekitab võnkumise. Võnkumissagedus, mis tekitatakse piesoelektrilisele andurile, on lineaarselt proportsionaalne voolukiirusega. [52]

3.8. Abiseadmete valimine

3.8.1. Akumulatsioonipaak

Kateldele, mis töötavad erineval kütusel, tuleb akumulaatsioonipaagi suuruse arvutamisel lähtuda kütusest, mis nõuab suurimat akumulatsioonipaaki. Minimaalne akumulatsioonipaagi maht peab olema lähtuvalt standardist EVS-EN 303-5:2012 vähemalt 300 liitrit ja antud on akumulatsioonipaagi mahu arvutamiseks järgnev valem:

$$V_{sp} = 15 \cdot T_B \cdot Q_N \left(1 - 0,3 \cdot \frac{Q_H}{Q_{min}} \right) \quad (22.1)$$

Kus V_{sp} – akumulatsiooni paagi maht (L),

- Q_N – nominaalne katla soojusvõimsus (kW),
- T_B – põlemisperiood (h),
- Q_H – ruumide küttekoormus (kW),
- Q_{\min} – minimaalne katla soojusvõimsus (kW).

3.8.2. Membraanpaisupaak

Membraanpaisupaaki kasutatakse süsteemis vee temperatuuri muutusest tingitud vee paisumise kompenseerimiseks. Membraanpaisupaagi kasutamine võimaldab vältida süsteemis ringleva vee kokkupuudet õhuga. Tavaliselt ühendatakse membraanpaisupaak kütteveekontuuri tagastuva liiniga või soojussalvesti alumise, jahedama, osaga. Minimaalne maht arvutatakse küttesüsteemi veemahu, maksimaalse lubatud vee temperatuuri ja maksimaalse lubatud süsteemi rõhu järgi. [39] Mahu arvutamiseks on järgnev valem:

$$V = \frac{e \cdot C}{1 - \left(\frac{P_i}{P_f}\right)} \quad (3.2)$$

- Kus V – paagi alagmaht (L),
 e – paisumistegur ($e = 0,04318$, kui maksimaalne katlavee temperatuur $t_{\max} = 99 \text{ }^\circ\text{C}$ ja minimalne katlavee temperatuur $t_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$),
 C – süsteemi veemahtuvus (L),
 P_i – paagi absoluutne eelrõhk (bar(a)),
 P_f – kaitseklapi absoluutne maksimaalne töö rõhk (bar(a)). [5]

Membraanpaisupaagi kasulik töömaht on valemi 3.2 lugejas olev suurus $e \cdot C = V_i - V_f$, kus V_i on algne maht ja V_f on lõppmaht.

Avatud süsteemides esinevad järgmised probleemid:

- vee aurustumine tingib magevee üleskerkimist,
- korrosioon ja seadme osade saastumine magevee atmosfääri heitmise ja haihtumise tõttu,
- suuremad soojuskaod soojusjuhtivuse ja vee aurustumise tõttu. [5]

3.8.3. Ringluspump

Küttesüsteemi ringluspumpadena kasutatakse rootorpumpasid ehk pöörleva tööorganiga pumpasid. Veetoru ristlõikepindala peab tagama voolukiiruse, mis ei ületa standardis EVS 844:2004 lubatud väärtust. Ristlõikepindala A saab leida järgnevast seosest:

$$A = \frac{Q}{v} \quad (3.3)$$

kus A – ristlõikepindala (m²),
Q – vee kulu (m³/s),
v – vee voolamise kiirus torustikus (m/s).

Survetoru rõhulang (eeldusel, et tegu on ainult hõõrdekaoga ja kohttakistused puuduvad) on kirjeldatav järgneva valemi abil:

$$h_{ts} = \frac{\lambda \cdot L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.4)$$

Kus λ - toru pinnakaredus,
L – toru pikkus (m),
D – toru läbimõõt (m),
v – vee liikumise kiirus (m/s),
g – raskuskiirendus (m/s²). [7]

Vee liikumisest tekkiv rõhulang (dünaamiline rõhk):

$$h_d = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.5)$$

[7]

4. SEADMETE VALIK JA STENDI SKEEM

Abi- ja põhiseadmete ühendamisel kasutatakse terastorusi, mille kokku ühendamisel kasutatakse keermestatud ühendusdetalle ja/või keevisliiteid. Kasutatavate torude läbimõõt sõltub katla võimsusest ja vooluhulgast. Maksimaalne voolukiirus tööstushoonetes asuvates küttesüsteemi torustikes sõltub kasutatavast toru materjalist ja on lähtuvalt standardist EVS 844:2004 terastorude korral 0,8 m/s [19]. Torustik varustatakse ventiilidega. [39]

4.1. Katel

Järgnevad katelseadme iseloomustamiseks toodud parameetrid on seadme tootja poolt deklareeritud väärtused või deklareeritud väärtuste põhjal arvutatud suurused ja tootja on katsetamisel kasutanud kütust, mille kütteväärtus on 16,5 MJ/kg, niiskuse sisaldus $\leq 10\%$ ja tuhasus $\leq 0,7\%$.

Kuna katlastendi üheks eesmärgiks on erinevate biokütuste põlemisomaduste hindamine tuleb katla ja põleti valikul arvestada seadmete konstruktsiooni ning sobivust mittepuitpõhise biomassi põletamiseks. TTÜ soojustehnika instituudis sooritatud katsed kinnitavad, et kõik pelletipõletite tüübid ei sobi rohtsest biomassist pelletite põletamiseks. Rohtsest biomassist pelletite põletamiseks sobib edukalt alattoitega pöördplaadiga põleti. Seda tüüpi põletiga katlaid iseloomustab paindlik kütusekasutus ja kasutada saab erinevat liiki pelleteid. [76] Sellest lähtudes on sobiv tootja **KWB pelletikatel Easyfire**, mille nominaalne võimsus on 22 kW ja minimaalne koormus on võimsus 6,4 kW. Seadme efektiivsus nominaalsel koormusel on 95 % ja osalisel koormusel 91,5 %. Tühimass on 352 kg ja vee kogus seadmes on 52 liitrit.

Kütus juhitakse koldesse põlemisplaadi tasapinnast allpool asuva transportöörkrui abil. Alt põlemisplaadile surutav kütus purustab tekiva tuha struktuuri ja seejuures jääb kütuse ase stabiilseks ega põhjusta täiendavaid keeriseid. Pelletite lõpuni põlemine toimub neljas kindlalt piiritletud põlemistsoonis. Põlemisõhk on võimalik koldesse juhtida autonoomsena ümbritsevast keskkonnast, selleks on kütusekoldesse juhtimise süsteemil spetsiaalne sisend torule läbimõõduga 100 mm. Katlavee töötemperatuur on 80 °C ja lubatud maksimaalne temperatuur on 95 °C. Seadme opereerimisel on maksimaalne lubatud rõhk 3,5 bar. Veeliini ühendamiseks on seadmel 1 tollise (DN 25) sisekeermega avad. Tootja soovib ühendamisel lähtuda standarditest EN 12809 ja/või EN 303. Tabelis 4.1 on toodud nõutud veekulu ja nõutud veetakistuse väärtused siseneva ja väljuva vee temperatuuri erinevustel 10 K ja 20 K.

Tabel 4.1. Nõutud vee parameetrid [25]

Temperatuuri erinevus, K	Vooluhulk, m ³ /h	Veetakistus, mbar
10	1,89	56
20	0,95	15,4

Suitsugaaside eemaldamiseks kasutatakse väljatõmbeventilaatorit. Osalisel koormusel on lahkuva suitsugaasi temperatuur 90 °C ja nominaalsel koormusel 120 °C ning nõutud on niiskuskindel korstna disain. Seadmest väljuva suitsugaasi toru diameeter on 130 mm ja korstnaga ühendus tuleb teostada tõusunurgaga vähemalt 3 kraadi. Soovitatav korstna läbimõõt on ligikaudu 140 mm. Nõutud tõmme nominaalsel koormusel on 0,05 mbar ja osalisel koormusel 0,03 mbar. Lahkuvate suitsugaaside mahu- ja massikulu on toodud tabelis 4.2. Suitsutorude ühendamisel soovib tootja lähtuda standardist EN 1856-2. Lisaks on nõutud, et katelt ja korstent ühendab suitsutoru maksimaalse pikkusega 2 meetrit ja milles võib olla kaks 90 kraadist nurka. Korstnale diameetrile nõutavad ligikaudsed tingimused on toodud toote spetsifikatsioonis. Juhul, kui on vajalik korstna mõõtmeid arvutada soovib tootja lähtuda standardist DIN 13384.

Tabel 4.2. Lahkuvate suitsugaaside massi- ja mahukulu [25]

Osaline koormus	massikulu	0,005	kg/s
	mahukulu	14,1	Nm ³ /h
Nominaalne koormus	massikulu	0,016	kg/s
	mahukulu	45,2	Nm ³ /h

Taandatuna kuiva suitsugaasi hapniku sisaldusele 10 % ja standardtingimustele (temperatuur 0 °C ja rõhk 1013 mbar) on tabelis 4.3 toodud heitmete kontsentratsioonid suitsugaasides.

Tabel 4.3. Heitmete kontsentratsioonid lahkuvas suitsugaasis [25]

Mõõdetav väärtus	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	TVOC	PM
Mõõtühik	vol. %	vol. %	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
Nominaalne koormus	7,3	13,2	15,0	144,0	< 1	7,0
Osaline koormus	10,3	10,3	25,0	131,0	< 1	18,0

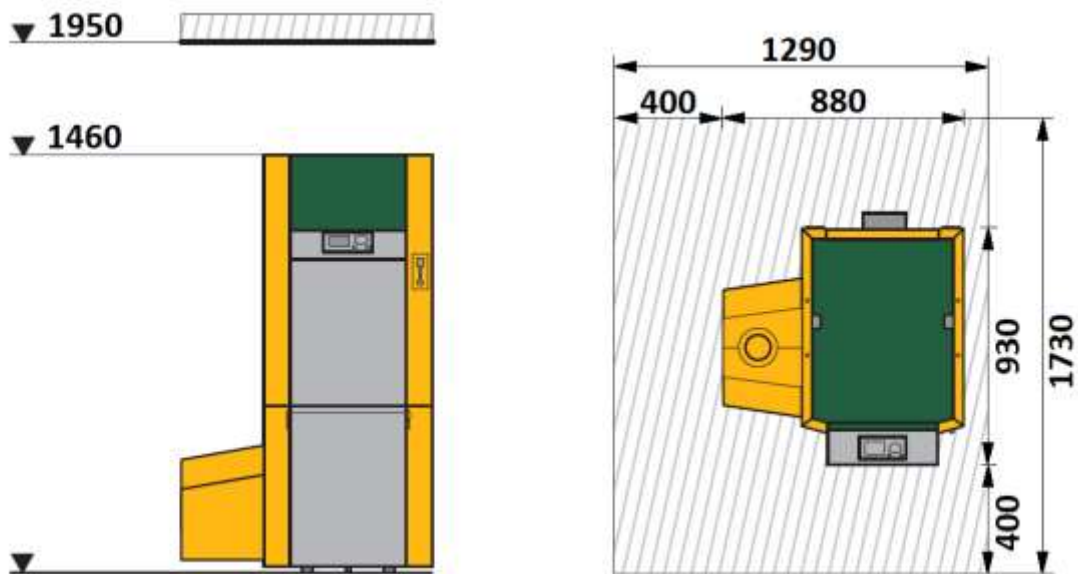
Põlemisprotsess peab olema väikeste emisioonidega. Standardis EVS-EN 303-5:2012 on katelseadmed jaotatud lähtuvalt emisioonide suurusest klassidesse ja tabelis 4.4 on toodud piirväärtused seadmetele võimsusega kuni 50 kW. Tabelis esitatud väärtused on esitatud kuivale suitsugaasile standardtingimustel.

Tabel 4.4. Biokütustel töötavad automaatse kütuse etteande süsteemiga katelseadmete emisiooniklassid, mille soojusvõimsus on kuni 50 kW [26]

Nominaalne soojusvõimsus	Emisiooni piirväärtused								
	CO			TVOC			PM		
	mg/m ³ , hapniku sisaldusel 10 %								
kW	klass	klass	klass	klass	klass	klass	klass	klass	klass
	3	4	5	3	4	5	3	4	5
≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40

Tarbitav elektriline kulu moodustab nominaalsel koormusel töötades 0,44 % seadme kogu toodetud energiast ja elektriliste mehhanismide maksimaalne võimsus on kokku 609 W. Vastavalt standardile EVS-EN 303-5:2012 kuulub katelseade Easyfire viiendasse klassi.

Selel 4.1 on toodud katelseadme kabariitmõõtmed ja tootja soovitatud paigalduskaugused.



Sele 4.1. Katelseadme KWB 22 kW kabariitmõõtmed (mõõtmed on millimeetrites) [25]

4.1.1. Kütusepunker

Tootja KWB poolt pakutavad käsitsi täidetavad kütusepunkrid on katelseadmega jäigalt ühendatud. Stendi jaoks sobiv punkri ja seadme ühendamise konstruktsioon peab võimaldama punkrit kaaluda. Lisaks pole katsestendi opereerimine pikaajaline, standardi EVS-EN 303-5:2012 järgi on katse kestvus 6 tundi, ja põletatav kütuse kogus pole suur.

Sobiv kütusepunker ja ühendus põleti toiteavaga on ratsionaalne valmistada käsitööna. Kasutades valemit 1.24 ja võttes pelleti kütteväärtuseks 16,5 MJ/kg on nominaalsel koormusel kuus tundi kestvaks katseperioodiks vaja arvutuslikult ca 30 kg kütust. Eeldades, et pelletite mahumass on 600 kg/m³, peab punkri maht olema minimaalselt 48 liitrit. Arvestades, et katsetustel kasutatava kütuse omadused võivad erineda eelpool toodust ja sooritatav katse võib pikeneda ning vajalik on teatav lisakogus punkris, et kindlustada kütuse pealevalgumine on sobiva punkri maht ca 100 – 120 liitrit.

4.2. Gaasianalüüsi süsteem

Sobiv gaasianalüsaator Gasmeter DX4000 koos proovivõtmise süsteemi ja muude tarvikutega on olemas Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi laboratooriumis. Seadmega opereerimisel on kogemus ja pole vaja uue süsteemiga tutvuda.

Standardis EVS-EN 304:2000 on joonisel 2 sondi asukoha valikuks mõõteseksioonis toodud olulised vahekaugused ja sisestamissügavus.

4.3. Peenosakesed

Peenosakeste määramisel on oluline teha kindlaks nende fraktsiooniline kuuluvus. Määrates kogu suitsugaasides sisalduva peenosakeste kontsentratsiooni, jääb saadavast informatsioonist väheseks, et hinnata võimaliku heitmetest põhjustatud mõju inimeste tervisele. Suurim mõju inimeste tervisele on fraktsioonil $PM_{2,5}$. Impaktor Johnas II on kasutatav koos isokineetilist proovivõtmist võimaldava seadmega. Impaktorisse sobivad Munktelli kvartskiust filtrid MK 360 (\varnothing 50 mm). Impaktorist Johnas II on kirjutatud pikemalt 3. peatüki alajaotises 5 punktis 1. [41]



Sele 4.2. Impactor Johnas kuumutatavas korpuses [41]

4.4. Temperatuur ja õhu niiskus

Temperatuuri ja õhu niiskuse mõõtmise vahendid on valitud Omega tootevalikust. Eestis müüb Omega tooteid Tim-Nordic Oy.

4.4.1. Katsehalli temperatuur ja õhuniiskus

Temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse mõõtmise sensor Omega EWS-RH on mahtuvusliku tüüpi andur, mille mõõtepiirkond on õhu temperatuuri mõõtmisel -15 kuni -60 °C ja suhtelise õhuniiskuse RH (inglise keelest tulenev akronüüm – *relative humidity*) mõõtmisel 5 – 95 %. Täpsus (temperatuuril $t = 25$ °C) RH mõõtmisel on ± 3 % (kui $RH = 20 - 80$ %) ning õhu temperatuuri mõõtmisel $\pm 0,7$ °C andur vajab alalisvoolu toidet 12 või 24 volti. [33]

Temperatuuri mõõtmise asukoha valimise põhimõte on toodud standardis EVS-EN 304:2000 joonisel 3.

4.4.2. Temperatuuri sondid

Omega PR-24

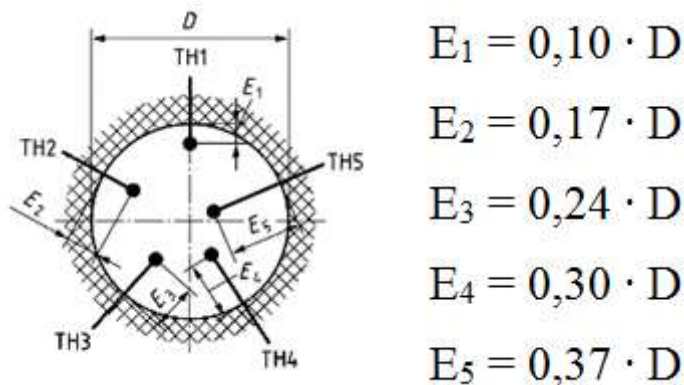
PR-24 seeria temperatuurisondis on tööelemendiks takistustermomeeter Pt100 (kui $t = 0\text{ °C}$ takistus $R = 100\ \Omega$) või Pt1000 (kui $t = 0\text{ °C}$ takistus $R = 1000\ \Omega$), mis kuuluvad A täpsusklassi lähtuvalt standardist IEC 60751. Sondi lubatud mõõtevahemik on -50 kuni 500 °C . Kasutusel on nelja juhtmega konstruktsioon, mis ühendatakse sondi külge pistikuga. Keskkonnamõjude eest kaitsmiseks on takistuskeha kaetud roostevabast terasest kestaga. [33]

PR-24 seeria temperatuuri sondi saab kasutada stendi järgnevate temperatuuri väärtuste mõõtmiseks: akumulatsiooni paagi T11 ja T12 ning kütuse T6.

Omega RTD-2-F3102-36-T-B

RTD-2-F3102-36-T-B temperatuurisondis on tööelemendiks takistustermomeeter PT100 ja maksimaalne mõõdetav temperatuur on 230 °C . Kuulub B täpsusklassi. Toode on müügil komplektina, kus on viis sondi. Mainitud sond sobib lahkuva suitsugaasi temperatuuri T4 mõõtmiseks. [33]

Lahkuva suitsugaasi temperatuuri täpsemaks määramiseks tuleb rakendada temperatuuri mõõtmist mitmes punktis. Selel 4.3 on näidatud temperatuuriandurite sobiv asukoht mõõteseksiooni ristlõikes.



Sele 4.3. suitsugaasi temperatuuri mõõtmine mitmes punktis [27]

Omega Nextel XC seeria

Keraamilise isolatsiooniga painduv termopaariga temperatuuri mõõtmise element. Püsivalt võimaldab töötada temperatuuril kuni 1200 °C ja lühiajaliselt kuni 1425 °C. Sobib temperatuuri mõõtmiseks enne soojusvahetit T2 ja peale soojusvahetit T3. [33]

Omega Bare-8-J-12

Keraamiliselt kaetud termopaar, mis võimaldab mõõta temperatuuri kuni 1600 °C. Sobib kolde temperatuuri T1 mõõtmiseks. Kindlasti on vajali eelkatsetega määrata termopaarile parandustegur. Üks võimalus selleks on teha imipüromeetriga võrdlusmõõtmised. [33]

4.4.3. Signaali konverterid

Temperatuuri anduri väljastatav analoogsignaali on vajalik konverteerida digitaalseks. Konverter kvandib sisendsignaali ja sellega kaasneb teatav signaali müra. Signaali konverteerimine toimub perioodiliselt ja tulemuseks on jada digitaalseid signaali väärtusi. Signaali konverterite valikut käesolevas töös ei käsitleta.

4.5. Katla ja kütusepunkri kaalumine

4.5.1. Katel

Katla tühimag on 352 kg ja veemahutuvus 52 liitrit. Lisaks on vajalik arvestada katlasse juhitava kütuse ja tekkiva tuha massiga. Koldesse juhitava kütuse mass on nominaalsel koormusel ca 5,5 – 6 kg/h.

Kuna kaalule asetatav mass on suur võrreldes massiga, mille muutust on vajalik määrata ja lisaks on vajalik suheliselt täpne massi määramine, siis töökindla kommertstoote leidmine on komplitseeritud. Põlemisprotsessi dünaamika hindamiseks peaks kaalumistäpsus olema võimalikult suur. Tööolukorras, kus kaalu andurid on pidevalt koormatud maksimaalilähedase koormusega, mis neile on lubatud, tekib andurites pideva surve mõjul püsiv deformatsioon ja kaalumisel saadud väärtus ei ole enam usaldusväärne. Andurite tööolukorra lihtsustamiseks on vajalik konstrueerida lahendus, mis võimaldaks katseväliseks perioodiks anduritelt koormus eemaldada.

Dini Argeo tootevalikus on sobiv platvormkaal TG600, mille kaalumise ülempiir on 600 kg ja täpsus 20 grammi. Seadmel on digitaalside väljund RS-232.

4.5.2. Kütusepunker

Punkri kaalumiseks sobiva platvormkaalu valimisel tuleb eeldada, et maksimaalne kaalule asetatav mass on kuni 150 kg ja kaalu täpsus võiks olla 5 grammi või väiksem. Kaalu töökindluse ja pikaajalise mõõtmistulemuste usaldatavuse suurendamiseks peaks, sarnaselt katla kaalumise seadmega, konstrueerima süsteemi, mis võimaldab anduritelt koormuse eemaldada.

Punkri kaalumiseks on sobiv seade Dini Argeo tootevalikust TG150, mille kaalumise ülempiir on 150 kg ja täpsus 5 grammi. Seadmel on digitaalside väljund RS-232.

4.6. Akumulatsioonipaak

Katelseade nominaalse võimsusega 22 kW toodab nominaalsel koormusel kuue tunnise katseperioodi jooksul 132 kWh soojust. Katla töötemperatuur on 80 °C ja lubatud maksimaalne temperatuur on 95 °C. Eeldades, et temperatuuri tõus akumulatsiooni paagis on katseperioodi jooksul 55 °C saab arvutada vee massi, mis on vajalik katlas toodetud soojuste salvestamiseks, kasutades valemit 4.1.

$$m = \frac{Q_N}{c \cdot (t - t_0)} \quad (4.1)$$

Kus m – vee mass (kg),

Q_N – katlas toodetud soojushulk (kWh),

$t - t_0$ – alg- ja lõpptemperatuuride vahe,

c – vee erisoojus 4,2 (kJ/(kg·K)).

Valemiga 4.1 arvatud vee mass on 2057 kg. Arvestades ka soojuste akumulatsiooniks varu on sobiv kommertstoode Art Kütteseadmed OÜ tootevalikust akumulatsioonipaak mahuga 2500 liitrit. Paagi isoleerimistööd teostatakse kohapeal ja sobiv materjal on 50-100 mm paksune klaasvill, mis on kaetud fooliumiga. Paak on valmistatud 3 mm terasest ja on kaetud kruntvärviga. [5]

4.7. Membraanpaisupaak

Eeldades, et süsteemis oleva vee maht on 2700 liitrit, membraanpaisupaagi absoluutne eelrõhk 1,5 bar(a) ja kaitsklapi maksimaalne lubatud asoluutnerõhk on 4,5 bar(a), saab valemiga 3.2 kasutades arvutada vajaliku membraanpaisupaagi mahu. Valemiga 3.2 arvutatud vajalik paagi maht on 175 liitrit, seejuures kasulik töömaht on 117 liitrit.

Sobiv kommerts toode on Zilmeti toode mahutavusega 200 liitrit. Paagile lubatud maksimaalne lubatud rõhk on 6 bar ja töötemperatuur -10 kuni 99 °C. Kõrgus on 812 mm ja diameeter 600 mm. Ühendustoru on DN 20. [5]

4.8. Ringluspump

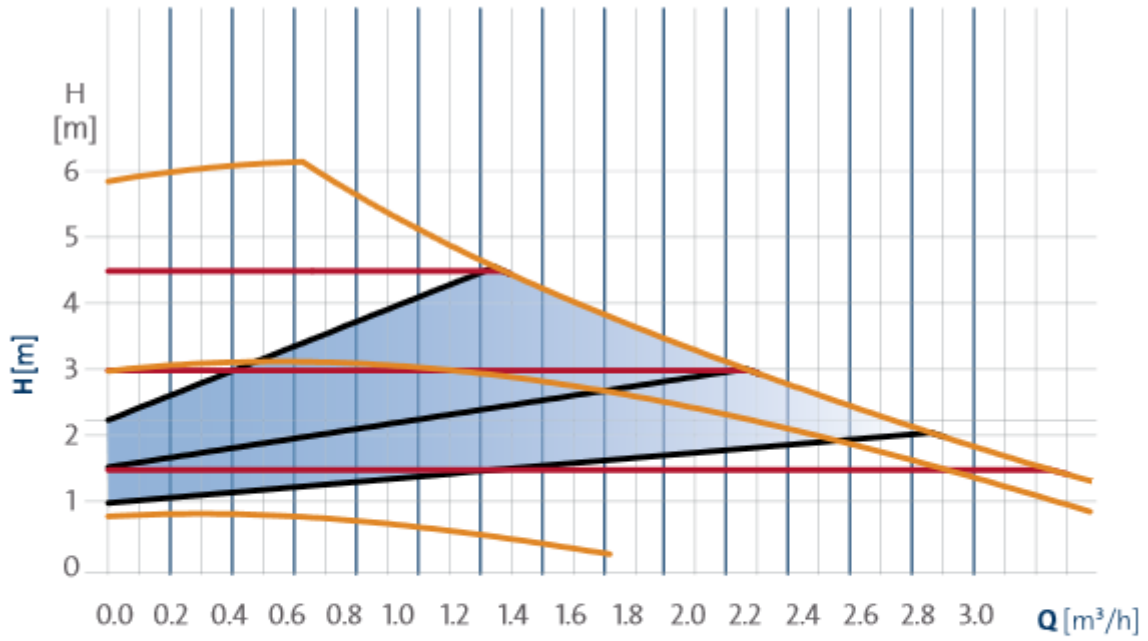
Eeldades, et vee liikumise kiirus torus ei tohi ületada 0,8 m/s ja katlast vee läbivoolu hulk peab olema 1,89 m³/h saab valemiga 3.3 kasutades leida minimaalse lubatud toru läbimõõdu. Arvutusega saadud minimaalne toru läbimõõt on 29 mm ja sobiv standartne toruläbimõõt on DN 32 ehk 1 ¼ tolli. [53, 71]

Soovituslik on pumba ette ja järele paigaldada sulgearmatuur, et pumba võimalik vahetamine oleks lihtsam. Soojusisolatsiooni paigaldades tuleb jälgida, et pumba mootor ja moodul jääks isoleerimata. Kondensaadi väljavooluavad peavad olema vabad. Pumba paigaldusasendid on ja muu vajalik informatsioon on olemas toote instruksioonis. Pumbast eralduva soojuse osatähtsust ja selle mõju stendi soojuskaole käsitleb standardi EVS-EN 304:2000 lisa F.

Sobiv pump on tootja Grundfos valikust **Alpha2 25 – 60**. Mille maksimaalne tõstekõrgus on 6 meetrit ja tootlikus 2,05 m³/h. Selet 4.4 on toodud valitud pumba karakteristikud. Pumbal on kolm kontrollrežiimi ja need on järgmised:

- Proportsionaalne rõhk,
- Konstantne rõhk,
- Konstantne kiirus. [53]

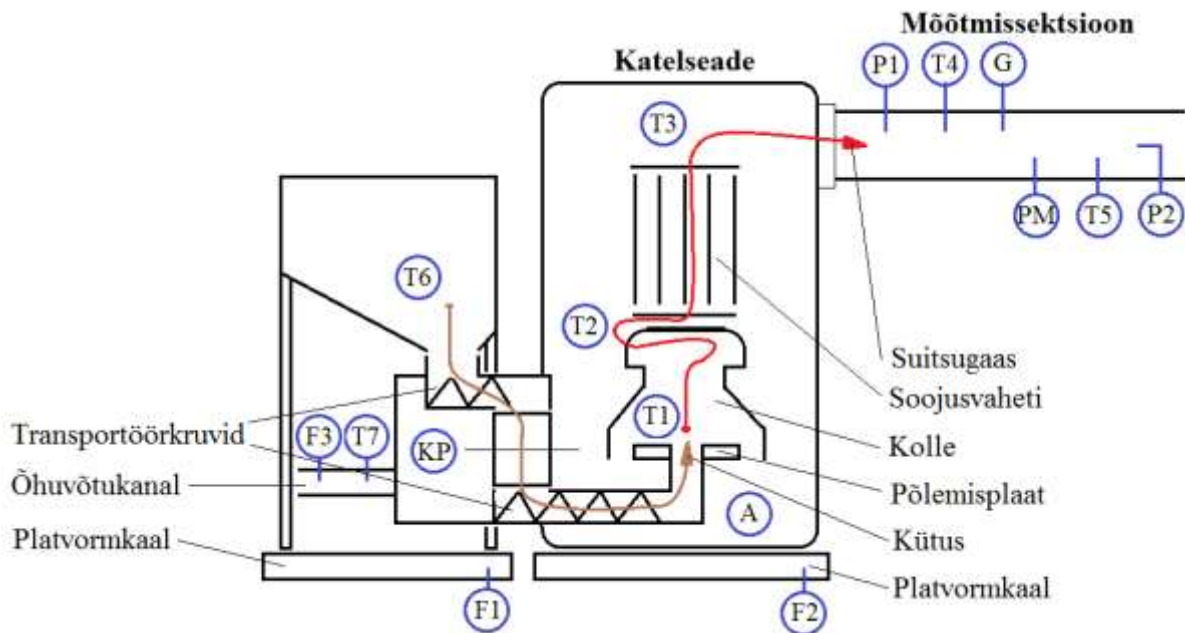
Lisaks on pumbal automaatne adapteerumise funktsioon, mis valib minimaalse surve nõutud kulu juures. [53]



- Automaatne kohanemisala**
- Konstantse rõhu jooned**
- Proportsionaalsed rõhukõverad**
- Fikseeritud kiiruse kõverad**

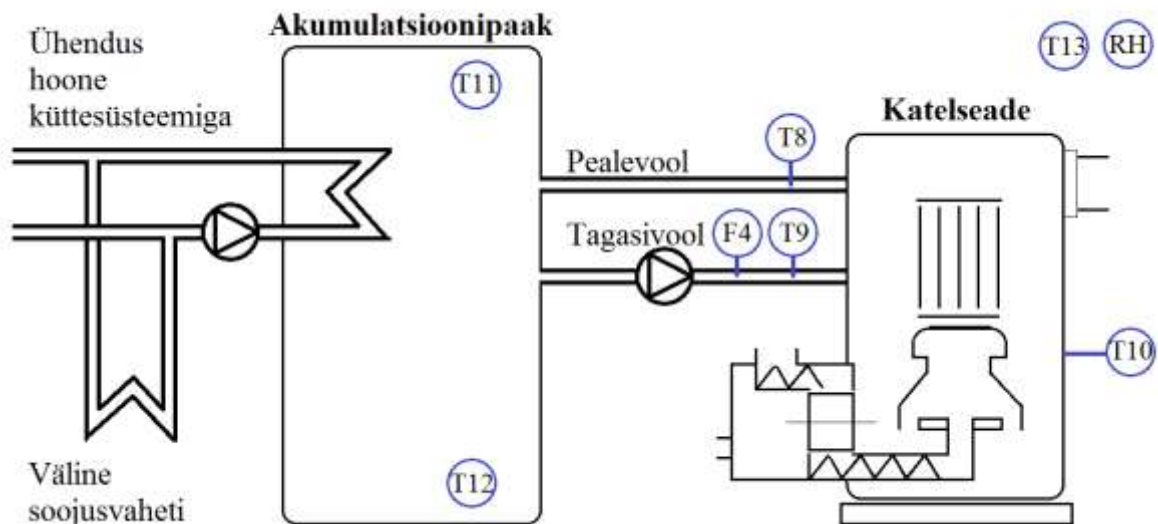
Sele 4.4. Grundfos Alpha2 25 – 60 karakteristikud [53]

4.9. Stendi skeem



A	Tuhk	PM	Peenosakesed
F1	Kütuse masikulu	T1	Koldetemperatuur
F2	Põlemise kiirus	T2	Temperatuur enne soojusvahetit
F3	Õhu massikulu	T3	Temperatuur peale soojusvahetit
G	O₂, CO₂, CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y, VOC, H₂O	T4	Lahkuvgaasi temperatuur
KP	Kruvi pöörlemine	T5	Lahkuvgaasi temperatuur
P1	Staatiline rõhk	T6	Kütuse temperatuur
P2	Dünaamiline rõhk	T7	Õhu temperatuur põletisse sisenemisel

Sele 4.5. katlastendi skeem



F4 Vee massikulu

RH Katsedehalli suhteline õhuniiskus

T8 Pealvoolu temperatuur

T9 Tagasivoolu temperatuur

T10 Katla välispinna temperatuur

T11 Akumulatsioonipaagi temperatuur

T12 Akumulatsioonipaagi temperatuur

T13 katsedehallitemperatuur

Sele 4.6. Katlastendi skeem (veeliin)

4.10. Stendi seadmete ja komponentide loetelu

1. Katelseade KWB Easyfire 22 kW
2. Gaasianalüsaator Gasmeter DX4000
3. Impaktor Johnas II
4. Õhu massikulu andur ABB sensyflow FMT700-P
5. Soojusarvesti Sontex Superstatic 449
6. Niiskuse ja temperatuuri andur Omega EWS-RH
7. Temperatuurisondid
 - Omega PR-24
 - Omega RTD-2-F3102-36-T-B
 - Omega Nextel XC seeria
 - Omega Bare-8-J-12
8. Käsitööna valmistatud kütusepunker, 100 liitrit

9. Akumulatsioonipaak, 2500 liitrit
10. Membraanpaisupaak Zilmet, 200 liitrit
11. Ringluspump Grundfos Alpha2
12. Platvormkaal Dini Argeo max 600kg, jaotusväärtus 20 grammi
13. Platvormkaal Dini Argeo max 150 kg, jaotusväärtus 5 grammi
14. Analoog-digitaalkonverter
15. Personaalarvuti

KOKKUVÕTE

Magistritöö esimene peatükk annab ülevaate stendi ja selle oluliste osade ülesseadmise põhimõtetest. Kirjeldab lühidalt katseprotseduuri ja selle läbiviimise korda ning katelseadme tööd iseloomustavaid näitajaid. Vaatleb, millised on nõuded stendis kasutatavatele katsekütustele ja kuidas arvutada ligikaudne kütuse kogus, mis kulub katseperioodi vältel. Peatüki viimane alajaotis käsitleb katseprotokolli vormistamisnõudeid ja informatsiooni, mida protokoll peab sisaldama. Teine peatükk annab ülevaate stendis määratavate parameetrite mõõtmiseks sobivatest meetoditest. Samade parameetrite määramiseks vaadeldakse alternatiivseid meetodeid. Kolmandas ja neljandas peatükis on rõhk asetatud stendi sobivatest kommertstoodetest ülevaate saamisele ja sobivate välja valimisele. Neljandas peatükis on lisaks stendi skeem ja loetelu valitud seadmetest. Töö käigus loodi stendi põhimõtteskeem, kuid töös on lahendamata seadmete ühendamiseks vajalikud täpsed tehnilised lahendused. Mõnede tehniliste sõlmede lahenduseks on antud soovitusi.

Majapidamiste energiakulu suureneb ja see on põhjus, miks räägitakse järjest rohkem vajadusest säästa energiat. Lähitulevikus energia tõenäoliselt ei odavne ja seega on väga oluline kasutada energiaressurssi tõhusamalt. Töös kirjeldatud katsestend võimaldab sooritada kütuse kvalitatiivset analüüsi ja määrata optimaalsed põlemisprotsessi parameetrid, sõltuvalt kasutatavast kütusest. Katseandmete põhjal on võimalik väikekateldes põlemisprotsessi tõhusust suurendada.

Stendi kontseptsiooni loomisel oli aluseks Eesti standard EVS- EN 303-5:2012. Kõik valitud seadmed on vastavuses nimetatud standardist tulenevate nõudmistega. Stendi valitud seadmete/vahendite tootjad on kõik Euroopas tutud kaubamärgid. Väikekatla stendis on mõnede oluliste parameetrite mõõtmine suhteliselt keeruline kuna mõõdetavad väärtused on väikesed. Näiteks lahkuvate suitsugaaside kiirus on valitud katlal tootja poolt soovitatud suitsutoru läbimõõdul ja osalise koormuse režiimil ca 0,3 m/s. Suitsugaaside kiiruse mõõtmiseks kasutatakse Pitot toru, mille mõõtmistäpsus on väikestel kiirustel ebatäpne, kuid määramatus on standardis lubuatu piires. Lisaks on võimalik teha kontrollarvutusi ja võrrelda mõõdetud tulemustega.

Gaasianalüüsil kasutatakse Gasmoti portatiivset analüsaatorit DX4000 ja Gasmoti proovivõtmise süsteemi. Nimetatud seade on Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika

instituudis olemas. Instituudi personali hulgas on inimesi, kellel on nimetatud seadmega töötamisel pikaajased kogemused.

Peenosakeste kontsentratsiooni PM_{10} ja $PM_{2,5}$ mõõtmiseks lahkuvates suitsugaasides kasutatakse impaktortüüpi mõõteseadet. Impaktoriga on võimalik mõõta erineva suurusega peenosakeste kontsentratsiooni. See on oluline kuna suurim mõju inimeste tervisele tuleneb osakestelt suurusega $PM_{2,5}$. Sooritatud katsed võimaldavad hinnata samas katlas erinevate kütuste põletamisel tekkivat peenosakeste kontsentratsiooni lahkuvas suitsugaasis sõltuvalt fraktsioonist. Saadud andmete alusel on võimalik teha ettepanek seadme tootjale konstruktsiooni täisutamiseks.

Temperatuuri mõõtmisel koldes T1, enne soojusvahetit T2, peale soojusvahetit T3 ja lahkuvates suitsugaasides T4 tuleks temperatuuri mõõtmise täpsuse huvides teha kontrollmõõtmised, millega leitakse mõõtepunktile parandustegurid. Kontrollmõõtmiste tegemiseks saab kasutada näiteks imipüromeetrit, mis võimaldab täpset keskkonna temperatuuri mõõtmist ja ei ole mõjutatud pindadelt tulevast kiirgusest. Lisaks võib mõnes punktis temperatuuri mõõtmise andurid dubleerida. See suurendab stendis tehtavate mõõtmiste täpsust ja aitab vältida võimalikust anduri rikkest põhjustatud häireid.

Välisjahtumisest põhjustatud soojuskadu hinnatakse manuaalselt teostatud mõõtmiste alusel. Pinnatemperatuurid määratakse katelseadme nominaalsel koormusel ja nende alusel leitakse soojuskadu välisjahtumisest. Osalisel koormusel ei ole vaja eraldi pinnatemperatuurde mõõtmist teha kuna soojuskadu muutub ainult protsentuaalselt toodetavst soojusvõimsusest ehk soojushulk välisjahtumisest jääb muutumatuks. Katla pinnatemperatuur ei tohi üheski punktis ületada katsehalli temperatuuri rohkem kui 60 K.

Katla ega põleti elektri tarbimist väjatöötatud stendi lahenduses ei mõõdeta, kuid seda on töös käsitletud ja on viidatud standarditele, mille alusel seda tuleb teha. Elektri tarbimist ei mõõdeta ja lähtutakse tootja deklareeritud andmetest. Tüübikatsetust teostades on elektri tarbimise mõõtmine vajalik.

Põleti transportööri liikumist juhib valitud katlal sisseehitatud automaatika ja andmete edastamine selle kohta võib osutuda komplitseerituks kuna seadmete tootjad kaitsevad

väljatöötatud juhtprogrammi üksikasju. Nimetatud parameetri fikseerimise moodus on antud töö raames lahendamata.

Käsitööna tuleb valmistada sobiv käsitsi täidetav kütusepunker, mille katlaga ühendus võimaldab punkri enda ja katla kaalumist, ilma olulist mõju mõõtmistulemustele avaldamata. Lisaks on vajalik valmistada mehhanism, mis võimaldab katla ja punkri kaalumiseks kasutatavate platvormkaalude anduritelt koormuse eemaldada. Nimetatud koormuse eemaldamise süsteemi antud töös käsitletud ei ole. Hea lahendus selleks võiks olla hooova abil liigutatava ekstsentrilise süsteemi kasutamine.

Sooritatavad katsed võimaldavad parandada õppe- ja teadustöö kvaliteeti. Stend võimaldab pakkuda üliõpilastele paremaid õppetingimusi läbi praktiliste laborikatsete. Suurendada soojusenergeetika instituudis väikeenergeetikaalast teadus- ja arendustööd.

Soojuse hoone küttesüsteemi suunamiseks on vajalik kooskõlastada see Tallinna Tehnikaülikooli haldusosakonnaga. Välise soojusvaheti jahutamisest eralduv soojus tuleb suunata otse atmosfääri. Hooneküttesüsteemi ja soojusvahetisse suunduvad veeliinid varustatakse ventiilidega. Sooritatavad katsed vähendavad ülikooli küttearveid.

SUMMARY

In the first chapter of this master thesis is general overview of the important components to erect laboratory-scale combustion test rig. Under examination is test procedure and test methods and important parameters for characterizing operation of boilers. In addition, dealt with test fuels and methods of calculation appropriate amount of fuel. In the last subdivision of the first chapter are described mandatory formalization for test report and what should the report include. In the second chapter is overview of methods for measuring different parameters in test rig. For measuring same parameter are described alternative techniques. In third and fourth chapter are emphasized commercial products which will be suitable for test rig. In the fourth chapter is also scheme of test rig and the list of qualified devices/components. In thesis was composed the scheme of test rig, but methods for assembly of components are unresolved.

In households the consumption of energy increases and this is the reason why energy saving is under discussion. Probably the price of energy in near future do not decrease and thus it is important to enhance use of energy resources. Test rig, described in this thesis, gives possibility for testing fuel quality and determine optimal condition for combustion process, which is depend by fuel. In small-scale boilers the records of tests make available enhance combustion efficiency.

The conception of the test rig in this thesis is based on Estonian standard EVS-EN 303-5:2012. Devices in test rig conception is compliance with Estonian standard which is mentioned before. Equipment which is in test rig is produced by big European companies. In small-scale combustion test rig some of parameters are difficult to measure because measured value is relatively small. For example, flue gas temperature in manufacturer recommended flue pipe diameter is at partial load approximately 0,3 mps. Velocity of flue gas is measured by pitot tube but accuracy of this instrument at low velocity is imprecise. Despite this, the uncertainty of measured value is in range of tolerances which is declared in standard test method. Moreover, it is possible to calculate theoretical flue gas volume flow and also the diameter of flue pipe is known, using this two values the velocity of gas will find.

Gasmeter portable gas analyzers DX4000 and Gasmeter gas sampling system is in use for gas component determination. Such an analyzer is in possession of department of thermal

engineering in Tallinn University of Technology. For measurement of particulates is in use impactor type device, which can separate different fractions of particulates. This measurement by fraction is important because biggest influence for humans health is particles $PM_{2.5}$. Testing boiler afford to evaluate the concentration of particulates if boiler is fired by different fuels. Records from tests make possible to do recommendation for manufacturer.

Temperature measurement in furnace T1, before the heat exchanger T2, after the heat exchanger T3, flue gas T4, should make reference measurement, which offer for measuring point a correction factor. These reference measurements will do by using suction pyrometer. In addition, in some temperature measuring point will set double temperature probe. This doubling probably increase accuracy and reliability of test result. Also such a doubling will prevent influence of probe failure for tests.

In test rig, boiler and burner electrical consumption are not measured. Also measuring of electrical consumption is regarded in thesis and references for standards which give recommendations are mentioned. When type tests are conducted electrical consumption should measured.

Heat losses from test rig surfaces are measured manually. Temperatures of surfaces should measured at nominal heat output and using this specified values heat loss from test rig surfaces is calculated. At partial load such a measurements are unnecessary because the heat losses from external cooling are same. Surfaces temperatures on any point of test rig should below 60 K.

Fuel hopper should manually manufacture. The construction of hopper should have such a connection with boiler, which have no influence for weighting process. In addition it is needed manufacture mechanism which have possibility release load from scales sensors. Solution for such a mechanism will be some eccentric system which can operated by lever.

To carry heat from test rig in heating system of the university the project should coordination with Tallinn University of Technology administrative department. Heat from external heat exchanger should conduct directly to atmosphere. Waterline are equipped with valve. Moreover, tranferred heat cut down bills for heating.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. ABB Ltd. koduleht. [WWW] <http://new.abb.com> (21.03. 2015 – 05.04.2015)
2. Air quality - Certification of automated measuring systems. osad 1 – 7. Euroopa standard EN 15267. Brüssel: Euroopa Standardiseerimise Komisjon.
3. Air quality - Measurement of stationary source emissions - Requirements for measurement sections and sites and for the measurement objective, plan and report. Eesti standard EVS-EN 15259:2007. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2007.
4. Air quality – Particle size fraction definitions for health-related sampling. Rahvusvaheline standard ISO 7708. Geneva: Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon ISO
5. ART Kütteseadmed OÜ koduleht. [WWW] <http://www.kytteseadmed.ee/> (15.04.2015 – 16.05.2015)
6. Chimneys - Thermal and fluid dynamic calculation methods. Part 1. Chimneys serving one appliance: Eesti standard EVS-EN 13384-1:2003+A2:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008.
7. Dedov, A. Loengukonspekt õppeaines Kompresormasinad: MST0040. Tallinna Tehnikaülikool, 2009.
8. Direktiiv taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta ning direktiivide 2001/77/EÜ ja 2003/30/EÜ muutmise ja hilisema kehtetuks tunnistamise kohta. Direktiiv 2009/28/EÜ. Brüssel: Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu, 2009.
9. Eesti Maaülikooli katlalabor/ M. Hovi, J. Uiga, A. Menind, M. Maidre, M. Ajaots, K. Hovi. – Eesti põlev-loodusvarad ja –jätmed, 2013. (12 -15), ISSN 1736-0315. [E-ajakiri] <http://www.eby.ee/ajakiri2013.pdf> (20.02.2015)
10. Eesti Maaülikoolis avatav õppelabor võimaldab uurida kütuseid ja põletustehnoloogiaid: pressiteade. [WWW] <http://www.emu.ee/ylikoolist/uudised/pressiteated/uudis/2013/01/17/eesti-maaulikoolis-avatav-oppelabor-voimaldab-uurida-kutuseid-ja-poletustehnoloogiaid> (20.02.2015)
11. Energiasäästlik käitumine elanikkonnas: Eesti elanikkonna uuring. Tallinn: Turu-uuringute AS, 2012 juuni. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/1/15/Turu-

- uuringute AS. Energias%C3%A4%C3%A4stlik k%C3%A4itumine elanikkonnas.pdf (30.03.2015)
12. Ennet, P. Peenosakesed nõuavad Eestis sadu inimelusid. [WWW] <http://novaator.err.ee/v/keskkond/219d7edd-341c-4129-8e9d-ca0d2f22b8b8> (04.05.2015)
13. Fluid Components International LLC, koduleht: prospekt. [WWW] <http://www.fluidcomponents.com/Sales%20Brochures/General/Capabilities-Brochure-RevN.pdf> (15.04.2015)
14. Gasmät Technologies Oy koduleht. [WWW] <http://www.gasmet.com/> (15.02.2015 – 10.05.2015)
15. Griffiths ,P. R., de Haseth, J. A. Fourier Transform Infrared Spectrometry. Second edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2007. [WWW] https://books.google.ee/books?id=C_c0GVe8MX0C&printsec=frontcover&hl=en#v=onepage&q=split&f=false (28.04.2015)
16. Heating boilers – Electrical power consumption for heat generators – System boundaries – Measurements: Eesti standard EVS-EN 15456:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008.
17. Herz Energietechnik GmbH koduleht. [WWW] <http://www.herz-energie.at/> (11.03.2015 – 28.03.2015)
18. Hinnang eramute kütmisest välisõhku eralduvate saasteainete heitkoguste kohta eestis. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2008. [WWW] http://www.envir.ee/sites/default/files/tty-eramud_kkmaruannefinal2.pdf (0.1.05.2015)
19. Hoonete kütte projekteerimine. Eesti standard EVS 844:2004. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2004.
20. Hoonete ventilatsioon – Elamute ventilatsioonisüsteemide katsetamine ja paigaldiste kontroll. Eesti standard EVS-EN 14134:2004 Tallinn: Eesti Standardikeskus,2004.
21. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. Eesti standard EVS-EN 60751:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008.
22. Ingermann, K. Temperatuuri Mõõtmine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjatus, 2009.
23. Katse- ja kalibreerimislaborite kompetentsuse üldnõuded. Eesti standard EVS-EN ISO/IEC 17025:2006. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2006.

24. Korstnad. Nõuded metallkorstnatele. Osa 2. Metallist suitsutorud ja lõõride ühendustorud. Eesti standard EVS-EN 1856-2:2009. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2009.
25. Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH koduleht. [WWW] <http://www.kwb-heating.co.uk/en.html> (20.03.2015 - 12.04.2015)
26. Küttekatlad. Osa 5. Käsitsi ja automaatselt köetavad tahkekütusekatlad nimisoojustootlikkusega kuni 500 kW. Mõisted, nõuded, katsetamine ja märgistus: Eesti standard EVS-EN 303-5:2012. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.
27. Küttekatlad. Peenpihustavate õlipõletitega küttekatelde katsekood. Eesti standard EVS-EN 304:2000. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2000.
28. Leibkondade energiatarbimise uuring: lõppraport. Tallinn: Eesti Statistikaamet, 2013. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/9/93/Leibkondade_energiatarbimine_2012.pdf (02.05.2015)
29. Measuring Instruments Directive. European Parliament & Council, 2004.
30. Mölder, I. Energiamajanduse arengukava aastani 2030, keskkonnamõju strateegiline hindamine: Aruanne. Tallinn: Eesti Arengufond, 2014. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/7/7e/ENMAK_2030_KSH_aruanne.pdf (02.05.2015)
31. Möldre, I. „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“ keskkonnamõju strateegiline hindamine: aruanne. Eesti Arengufond, 2014. [WWW] https://www.mkm.ee/sites/default/files/141023_enmak_2030_ksh_aruanne_avalikustamisele.pdf (02.05.2015)
32. Niinepuu, R. Tahkete kütuste tehnilisel analüüsil kasutatavate standardmeetodite võrdlus: Bakalaureusetöö. Tallinna Tehnikaülikool: Tallinn, 2014.
33. Omega Engineering Inc. koduleht. [WWW] <http://www.omega.com/techref/intltemp.html> (03.05.2015 – 15.05.2015)
34. Orru, H. Välisõhu kvaliteedi mõju inimeste tervisele peentest osakestest tuleneva mõju hindamine kogu Eesti lõikes. Tartu ülikool: arstiteaduskond, 2011. [WWW] <http://rahvatervis.ut.ee/bitstream/1/5081/1/Orru2011.pdf> (02.05.2015)
35. OÜ cerbos koduleht. [WWW] <http://www.cerbos.ee/et/44-pelletimahutid> (28.04.2015)
36. Paiksete saasteallikate heited. Gaasi kiiruse ja mahtkiiruse määramine gaasikäikudes. Eesti standard EVS-ISO 10780:2006. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2006.

37. Paiksete saasteallikate heited. PM10/PM2,5 sisalduse määramine heitgaasides. Madalate kontsentratsioonide mõõtmise impaktoritega. Eesti standard EVS-EN ISO 23210:2009. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2009.
38. Paiksete saasteallikate heited. Proovivõtt gaasikontsentratsioonide automaatseks määramiseks statsionaarsetes seiresüsteemides: Eesti standard EVS-ISO 10396:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008.
39. Paist, A., Plamus, K. Lokaalkatlamajad. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus, 2009.
40. Paist, Poobus. Soojusgeneraatorid: õppematerjal. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus, 2009.
41. Paul Gothe GmbH koduleht. [WWW] <http://paulgothe.de/eng/index.html> (02.03.2015 - 05.01.2015)
42. Peened osakesed välisõhus ja neist tuleneva tervise mõju hindamine Tallinnas, Tartus, Kohtla-Järvel, Narvas ja Pärnus. Tartu: Eesti Arst, 2010. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/f/f5/Eesti_Arst_Peened_osakesed_v%C3%A4lis%C3%B5hus_ja_neist_tuleneva_tervise_m%C3%B5ju_hindamine_Tallinnas%2C_Tartus%2C_P%C3%A4rnus%2C_Kohtla-J%C3%A4rvel%2C_Narvas_ja_P%C3%A4rnus._2010.pdf (02.05.2015)
43. Pellet burners for small heating boilers - Definitions, requirements, testing, marking. Eesti standard EVS-EN 15270:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008.
44. Rapla Metall OÜ koduleht. [WWW] <http://www.raplametall.ee/> (28.05.2015)
45. Residential solid fuel burning appliances - Emission test methods. Tehniline spetsifikatsioon CEN/TS 15883:2009. Brüssel: Euroopa Standardiseerimise Komisjon, 2009.
46. Seitz, J., Tong, C. LMP91051 NDIR CO₂ Gas Detection System: Application report. Texas Instruments, 2013. [WWW] <http://www.ti.com/lit/an/snaa207/snaa207.pdf> (20.04.2015)
47. Series 160S „S“ Type Pitot Tubes: Operating instructions. Michigan: Dwyer Instruments, Inc., 2003. [WWW] https://www.dwyer-inst.com/PDF_files/160S_iom.pdf (20.04.2015)
48. Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Part 2. Graded wood pellets: rahvusvaheline standard ISO 17225-2:2014. Geneva: Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon ISO, 2014.

49. Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Part 2. Wood pellets for non-industrial use. Eesti standard EVS-EN 14961-2:2011. Tallinn. Eesti Standardikeskus, 2011.
50. Solid biofuels -- Fuel specifications and classes. Part 4. Graded wood chips: rahvusvaheline standard ISO 17225-4:2014. Geneva: Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon ISO, 2014.
51. Solid biofuels – Sampling. Eesti standard EVS-EN 14778:2011. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2011.
52. Sontex SA koduleht. Prospekt. [WWW] <http://www.sontex.ch/>
http://www.sontex.ch/superstatic_e.html (12.04.2015)
53. Soojapood OÜ koduleht. [WWW] <http://www.soojapood.ee/et/p/pelletkute>
(12.04.2015)
54. Soojustehnika laboratoorsete tööde juhend / A.Kull, H. Lootus, R. Randmann, T. Tiikmaa, A. Paist, K. Ingermann, A. Ots. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjatus, 2003.
55. Stationary source emission - Intralaboratory validation procedure for an alternative method compared to a reference method. Tehniline spetsifikatsioon CEN/TS 14793:2005. Brüssel. Euroopa Standardiseerimise Komisjon, 2005.
56. Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust. Part 1: Manual gravimetric method. Eesti standard EVS-EN 13284-1:2002. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2002.
57. Stationary source emissions - Determination of mass concentration of nitrogen oxides (NO_x) - Reference method: Chemiluminescence. Eesti standard EVS-EN 14792:2005. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2005.
58. Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of total gaseous organic carbon - Continuous flame ionisation detector method. Eesti standard EVS-EN 12619:2013. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2013.
59. Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of carbon monoxide (CO) - Reference method: Non-dispersive infrared spectrometry. Eesti standard EVS-EN 15058:2006. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2006.
60. Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of carbon monoxide (CO) - Reference method: Non-dispersive infrared spectrometry. Eesti standard EVS-EN 15058:2006. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2006.
61. Stationary source emissions - Determination of the water vapour in ducts. Eesti standard EVS-EN 14790:2005. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2005.

62. Stationary source emissions - Determination of total volatile organic compounds (TVOCs) in waste gases from non-combustion processes - Non-dispersive infrared analyser equipped with catalytic converter. Eesti standard EVS-EN ISO 13199:2012. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.
63. Stationary source emissions - Determination of volume concentration of oxygen (O₂) - Reference method – Paramagnetism. Eesti standard EVS-EN 14789:2005. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2005.
64. Stationary source emissions - Quality assurance of automated measuring systems. Eesti standard EVS-EN 14181:2014. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2014.
65. Tahkel kütusel töötavad paiksed autonoomsed boilerid. Nominaalne soojusväljund kuni 50 kW. Nõuded ja testimetodid. Eesti standard EVS-EN 12809:2002. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2002.
66. Technical Guidance Note M22. Measuring stack gas emissions using FTIR instruments: version 3. Environment Agency, 2012. [WWW] https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/301229/TGN_M22_Measuring_Stack_Gas_Emissions_using_FTIR_Instruments.pdf (04.05.2015)
67. Temperature control devices and temperature limiters for heat generating systems. Eesti standard EVS-EN 14597:2012. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.
68. TEP SO AS, koduleht. [WWW] <http://tepsos.ee/failid/File/probleem13%281%29.pdf> (12.04.2015)
69. Thermocouples. Part 1. EMF specifications and tolerances. Eesti standard EVS-EN 60584-1:2013. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2013.
70. Thermocouples. Part 3. Extension and compensating cables - Tolerances and identification systems. Eesti standard EVS-EN 60584-3:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008.
71. Toru-Jüri OÜ koduleht. [WWW] <http://torujyri.ee> (12.04.2015)
72. Universal Flow Monitors Inc., koduleht [WWW] <http://www.flowmeters.com/thermal-technology> (12.04.2015)
73. Vares, V. Kohalike kütuste kasutamine üheperemajade ja talude kateldes, Tallinn 1992.
74. Välisõhu saastatuse taseme piir- ja sihtväärtused, saasteaine sisalduse muud piirnõrmi ning nende saavutamise tähtsused. Määrus. Tallinn: Keskkonnaminister, 2011. [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/112072011003> (02.05.2015)

75. Õhu paiksaasteallikate emissioonitasemed. Tolmu madala masskontsentratsiooni kindlaksmääramine. Osa 2. Automaatsed mõõtesüsteemid. Eesti standard EVS-EN 13284-2:2004. Tallinn. Eesti Standardikeskus, 2004.
76. Kask, Ü. Miljan, J. Juhised pillirooäri alustamiseks. Talibar OÜ, ISBN 978-9949-484-91-1 [WWW]
http://www.pilliroog.ee/Guidebook%20Cofreen%20%20EK_2013%20.pdf
(15.04.2015)

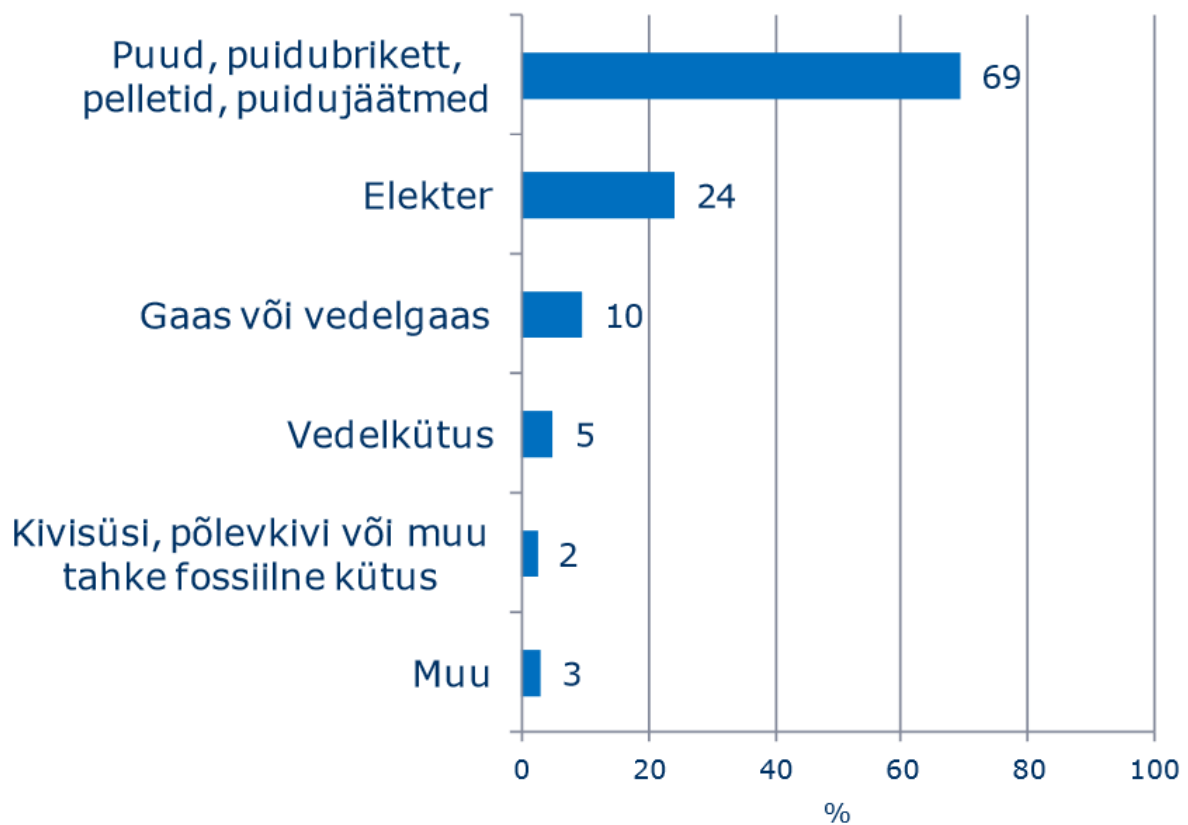
LISA 1. Seadmete/vahendite hinnad

Tabel L1.1. Seadmete/vahendite hinnad

Seade/toode	tootja	Iseloomustav suurus	Orienteeruv hind
kütusepunker	Cerbos	200 liitrit	160,00 €
Pelletstar	Herz	20 kW	9261,00 € + km €
Pelletstar	Herz	30 kW	9866,00 € + km
Firematic	Herz	35 kW	14078,00 € + km
Bare-8-J-12	Omega	-	16,00 \$
Membraanpaisupaak	Zilmet	200 liitrit	157,69 €
Impaktor Johnas II	Paul Gothe	+ 25 Munktelli filtrit	6894,30 €
PR-24	Omega	Juhtmed 5 meetrit	67 – 92.00 \$
Omega Nextel XC	Omega	-	24,00 \$
RTD-2-F3102-36-T-B	Omega	5 tk	91,00 \$
EWS-RH	Omega	-	149,00 \$
Superstatic 449	Sontex	-	217,90 €

Hinnad pärinevad tootjate ja edasimüüjate internetilehekülgedelt. Seadmete hindade loetelu on osaline ja on eesmärgiga anda informatsiooni ligikaudsest maksumusest.

LISA 2. Lokaalsetes seadmetes kasutatav kütus



Sele L2.1. Kütuseliik lokaalset või individuaalset küteliiki kasutavatel elanikel [13]

Graafikul L2 ületab summarne kütuseliikide kasutus 100 % kuna teatav osa elanikest kasutab mitut küteliiki.

LISA 3. Maaülikooli katlalabor



Sele L3.1. Eesti Maaülikooli katlalabor [45]