



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Andres Nääs

**ÕPPEAINE “SOOJUSGENERAATORID” LABORATOORNE
TÖÖ: KATLA BILANSIKATSE**

LABORATORY INSTRUCTIONS FOR THE BOILER ENERGY
BALANCE EXPERIMENT

Bakalaurusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: lektor Mart Hovi *MSc* ,

lektor Külli Hovi *MSc*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Andres Nääs		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Õppeaine “Soojusgeneraatorid” laboratoorne töö: katla bilansikatse			
Lehekülgi: 42	Jooniseid: 10	Tabeleid: 7	Lisaid: 2
Osakond/Õppetool: Energiakasutuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17.			
Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika			
Juhendaja(d): lektor Mart Hovi <i>MSc</i> , lektor Külli Hovi <i>MSc</i>			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021			
<p>Õppeaine Soojusgeneraatorid on Eesti Maaülikooli Tehnika ja tehnoloogia õppekavas. Kuna antud õppeaines saab üliõpilane palju teadmisi läbi praktilise töö, siis laboratoorse töö juhend on mõeldud praktikumi sujuvamaks korraldamiseks. Kuna siamaani puudus antud õppeaines selline juhend, siis töö eesmärgiks on koostada üliõpilasi abistav juhend praktikumi läbiviimiseks. Antud praktikumi töö sisuks on puuküttekatla LUK-50 soojusbilansi määramine. Lõputöö keskendubki bioloogilist päritolu kütustele, põlemisprotsessile ja katlast eralduvatele soojushulkadele. Parema tulemuse saavutamiseks on läbi viidud katlabilansikatse ka praktilise tööna, et näha paremini kütuse põletamisel tekkivaid murekohti. Töö käigus on teostatud ja uuritud väljuva suitsugaasi koostist ja määratud katla kasutegur. Sooritatud katsel mõõdetud ja analüüsitud andmeid on arvestatud praktikumi juhendi koostamisel ja antud soovitusi paremaks praktilise töö läbiviimiseks.</p>			
Märksõnad: soojus, juhend , tuhk, kütus, labor			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Andres Nääs		Curriculum: Engineering	
Title: Laboratory instructions for the boiler energy balance experiment			
Pages: 42	Figures: 10	Tables: 7	Appendixes: 2
<p>Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering</p> <p>Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy research</p> <p>Supervisors: lecturer Mart Hovi <i>MSc</i> , lecturer Külli Hovi <i>MSc</i></p> <p>Place and date: Tartu 2021</p>			
<p>The course Heat Generators is in the Curriculum of Engineering and Technology of the Estonian University of Life Sciences. Since the student acquires a lot of knowledge in this subject through practical work, the laboratory work instruction is intended for a smoother organization of the practical training. As there has been no such guide in this subject so far, the aim of the thesis is to compile a guide to assist students in conducting an internship. The content of the work of this practicum is to determine the heat balance of the wood heating boiler LUK-50. The thesis focuses on fuels of biological origin, the combustion process and the amount of heat released from the boiler. In order to achieve a better result, I also conducted a boiler balance test as a practical work to better see the concerns that arise when burning fuel. During the work, the composition of the flue gas has been performed and studied and the efficiency of the boiler has been determined. The data measured and analyzed in the performed experiment have been taken into account in compiling the instructions of the laboratory work and recommendations have been given for better practical work.</p>			
Keywords: heat, guide, ash, fuel, laboratory			

SISUKORD

LÜHENDID JA TÄHISED	6
SISSEJUHATUS	7
1. KÜTUSED	8
1.1. Kütuse mõiste ja koostis	8
1.2. Kütuste liigitus.....	10
1.3. Kütuse kütteväärtus	10
1.4. Enimkasutatavad kütused Eestis.....	12
2. PÕLEMISPROTSESS.....	13
2.1. Põlemise mõiste.....	13
2.2. Täielik põlemine	13
2.3. Mittetäielik põlemine.....	13
2.3. Vesiniku põlemine kütuses	14
2.4. Põlemiseks vajalik oksüdeerija.....	14
3. SOOJUSBILANSS.....	15
3.1. Soojusbilansi võrrand	15
4. PRAKTILINE TÖÖ	17
4.1. Katlabilansi katse.....	17
4.2. Keskküttekatel	19
4.3. Katlasse antud soojushulk Q	21
4.4. Katlast küttesüsteemile antud kasulik soojushulk Q_1	23
4.5. Suitsugaaside analüüs ja sellest tekkinud soojuskadu Q_2	26
4.5.1. Gaasianalüüs	26
4.5.2. Põlemiseks vajalik õhukogus	29
4.5.3. Suitsugaasi komponendid, kogused ja erisoojus	30

4.5.4. Soojuskadu Q_2 lahkvate suitsugaasidega	31
4.6. Keemiliselt mittetäielikust põlemisest tekkinud soojuskadu Q_3	32
4.7. Soojuskadu tingitud mehaanilisest mittepõlemisest Q_4	33
4.8. Soojushulgad Q_5 ja Q_6	35
4.9. Katla kasutegur	35
4.10. Laboratoorse töö juhend	35
KOKKUVÕTE	36
KASUTATUD KIRJANDUS	37
LISAD	38
Lisa1. Katlabilansi praktikumi juhend õppeaines “Soojusgeneraatorid”.....	39
Lisa1. Katlabilansi praktikumi juhend õppeaines “Soojusgeneraatorid” järg.....	40
Lisa1.Katlabilansi praktikumi juhend õppeaines “Soojusgeneraatorid” järg.....	41
Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	42

LÜHENDID JA TÄHISED

A-tuhk

c-erisoojus

K-kelvini kraad

*nm*³-normaalkuupmeeter

*pm*³-puistekuupmeeter

ppm-miljondikosa tervikust

*rm*³-ruumimeeter

^oC-celsiuse kraad

η-kasutegur

λ-liigõhutegur

Q-energiahulk, J

W-niiskus

SISSEJUHATUS

Õppeaines TE 1012 "Soojusgeneraatorid" saab üliõpilane teadmisi kütustest, põlemisprotsessi teooriast, katla soojusbilansist, katlamaja seadmetest ja võimsustest. Õppeaines on oluline osa ka laboratoorsel tööl, mis on antud aine läbimiseks vaja sooritada ja seetõttu on oluline osa õpieesmärkide saavutamisel ka laboratoorse töö juhendil, mis praegusel hetkel selles õppeaines puudub.

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli koostada katla bilansikatse laboratoorse töö juhend, mis lihtsustaks praktilise töö läbiviimist, annaks üliõpilastele juhiseid töö korraldamisel ja läbiviimisel. Samuti annaks ülevaate ja soovitusi põlemisprotsessi juhtimiseks,

Antud eesmärgi saavutamiseks on läbi viidud katla bilansikatse praktilise tööna, mille käigus määratakse kütusekogus ja selle kütteväärtus, teostatakse suitsugaasi analüüs, mille tulemuste põhjal saab hinnata põlemisprotsessi kulgu ja selle puhtust. Samuti hinnatakse katla kütmisel eralduvaid soojushulkasi ja koostatakse katla bilanss, mille käigus määratakse ka katla kasutegur.

Katse tulemuste analüüsist peaks olema näha, mida on vaja jälgida põlemisprotsessi juhtimisel, et saavutada puhtam põlemine ja sellega kaasnev suurem katla kasutegur.

Bakalaureusetöö sisaldab 4 peatükki. Esimene peatükk keskendub bioloogilist päritolu kütustele. Teises peatükis on kirjeldatud põlemisprotsessis toimuvat ja sellega kaasnevatest suitsugaasidest. Kolmandas peatükis on antud ülevaade katlabilansis osalevatest soojushulkadest. Neljas peatükk on koostatud praktilise katse alusel, kus on kirjeldatud töös kasutatud katelt. Viidud läbi põlemisprotsess ja mõõdetud selle käigus vajalikke parameetreid. Saadud tulemuste järgi on arvutatud katla kasutegur, analüüsitud katse käiku ja koostatud laboratoorse töö juhend.

1. KÜTUSED

1.1. Kütuse mõiste ja koostis.

Kütuseks loetakse aineid, mille keemilisel ühendamisel hapendajaga vabaneb suur hulk soojust. Tavaliselt on selleks hapendajaks hapnik. Samas on oluline, et kütusel oleks piisav varu või taastuvus keskkonnas, oleks suur kütteväärtus ja kiire reageerimine oksüdeerijaga ja põlemisel eralduvad jäägid ei saastaks ohtlikult meie keskkonda. On ka oluline et kütus oleks loodusest hästi kättesaadav ja teda oleks odav toota ja töödelda. [1]

Koostiselt sisaldavad kütused põlevat osa, mineraalset osa ja niiskust. Kütuse põlevosa moodustavad peamiselt süsiniku, vesiniku, lämmastiku, hapniku ja väävli keerukad ühendid. Tarbijateni jõudev kütus on kütuse tarbimisaine ja see sisaldab peale põlevaine veel, vett ja mittepõlevaid osiseid. Kütuse koostist saab väljendada järgnevate võrranditega: [2:10]

Kütuse tarbimisaine, tähistatakse ülaindeksiga t :

$$C^t + H^t + O^t + N^t + S^t + A^t + W^t = 100\%, \quad (1.1)$$

kus C^t on süsiniku sisaldus tarbimisaines %;

H^t -vesiniku sisaldus tarbimisaines %;

O^t -hapniku sisaldus tarbimisaines %;

N^t -lämmastiku sisaldus tarbimisaines %;

S^t -väävli sisaldus tarbimisaines %;

A^t - tuha sisaldus tarbimisaines %;

W^t - niiskuse sisaldus tarbimisaines %;

Niiskusetu kütust nimetatakse kütuse kuivaineeks, tähistatakse ülaindeksiga k :

$$C^k + H^k + O^k + N^k + S^k + A^k = 100\%, \quad (1.2)$$

kus C^k on süsiniku sisaldus kuivaines %;

H^k -vesiniku sisaldus kuivaines %;

O^k -hapniku sisaldus kuivaines %;

N^k -lämmastiku sisaldus kuivaines %;

S^k - väävli sisaldus kuivaines %;

A^l - tuha sisaldus kuivaines %.

Kütuse põlevaine moodustab tuhavaba ja niiskuseta kütus, tähistatakse ülaindeksiga p :

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p = 100\%, \quad (1.3)$$

kus C^p on süsiniku sisaldus põlevaines %;

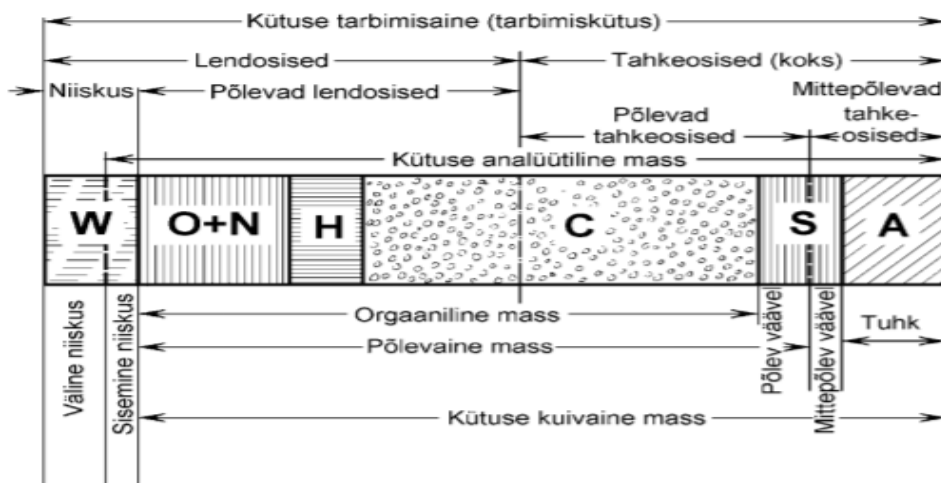
H^p -vesiniku sisaldus põlevaines %;

O^p -hapniku sisaldus põlevaines %;

N^p -lämmastiku sisaldus põlevaines %;

S^p - väävli sisaldus põlevaines %.

Kütuse koostist on kujutatud joonisel 1.1.



Joonis 1.1 Kütuse koostise jaotus. [2:10]

Kütuse koostise ümberarvutamiseks vajalikud tegurid on antud tabelis 1.1.

Tabel 1.1. Kütuse koostise ümberarvutamise tegurid [2:13]

Leitav koostis			
Leitav koostis	Tarbimisaine	Kuivaine	Põlevaine
Tarbimisaine	1	$\frac{100}{100 - W^t}$	$\frac{100}{100 - W^t - A^t}$
Kuivaine	$\frac{100 - W^t}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^k}$
Põlevaine	$\frac{100 - W^t - A^t}{100}$	$\frac{100 - A^k}{100}$	1

1.2. Kütuste liigitus

Kütust saab liigitada oma agregaatolekust lähtuvalt:

- tahked
- vedelad
- gaasilised

Need kütused võivad olla looduslikud või ka tehiskütused.

Mittetaastuvaid orgaanilisest ainest pärinevaid kütuseid nimetatakse fossiilseteks kütusteks ja need on taastumatud ressursid, mida saab tarvitada vaid olemasolevate varude ulatuses. Peamisteks fossiilkütusteks loetakse maagaasi, põlevkivi, kivisütt, pruunsütt ja turvast.

Biokütusteks loetakse bioloogilist päritolu kütuseid, mida saab kasutada organismide tekkimisel taastuvuse piiirides. Peamisteks esmasteks biokütusteks on puit, energeetilised kultuurid, tööstus- ja olmejäätmed, roog, hein, õled, sõnnik jt. Töödeldud biokütusteks loetakse hakkepuitu, saepuru, biodiisli, bioetanooli ja bioloogiliste jäätmete lagunemisel tekkinud biogaasi [2:7].

1.3. Kütuse kütteväärtus

Kütuse kütteväärtuseks e. põlemissoojuseks nimetatakse soojushulka, mida saadakse 1 kg kütuse täielikul põlemisel [3:32]. Mida vähem sisaldab tarbimiskütus niiskust ja tuhka, seda

suurem on kütuse kütteväärtus. Laboratoorselt mõõdetakse kütuse kütteväärtust kalorimeetrilises pommis. Tahkete ja vedelkütuste kütteväärtuse määramisel lähtutakse standardile ISO 1928 [4].

Suurema osa kütuse kütteväärtusest moodustavad süsinik, mille kütteväärtus on 33,7 MJ/kg ja vesinik, mille põlemisel eralduv soojus on 110,6 MJ/kg [2:11].

Sõltuvalt sellest, kuidas eralduv põlemisel tekkinud veeaur katlast, arvestatakse kas kütuse ülemist kütteväärtust $Q_{\text{ü}}$ või kütuse alumist kütteväärtust Q_{a} . Ülemist kütteväärtust arvestatakse siis, kui põlemisel tekkinud veeaur kondenseerub ja sellega vabastatakse ka kondenseerumissoojus ja see jääb katlasse, kui aga veeaur ei kondenseeru, ning lahkuv suitsugaasidega, siis on ka saadud soojushulk väiksem ja nimetatakse alumiseks kütteväärtuseks.

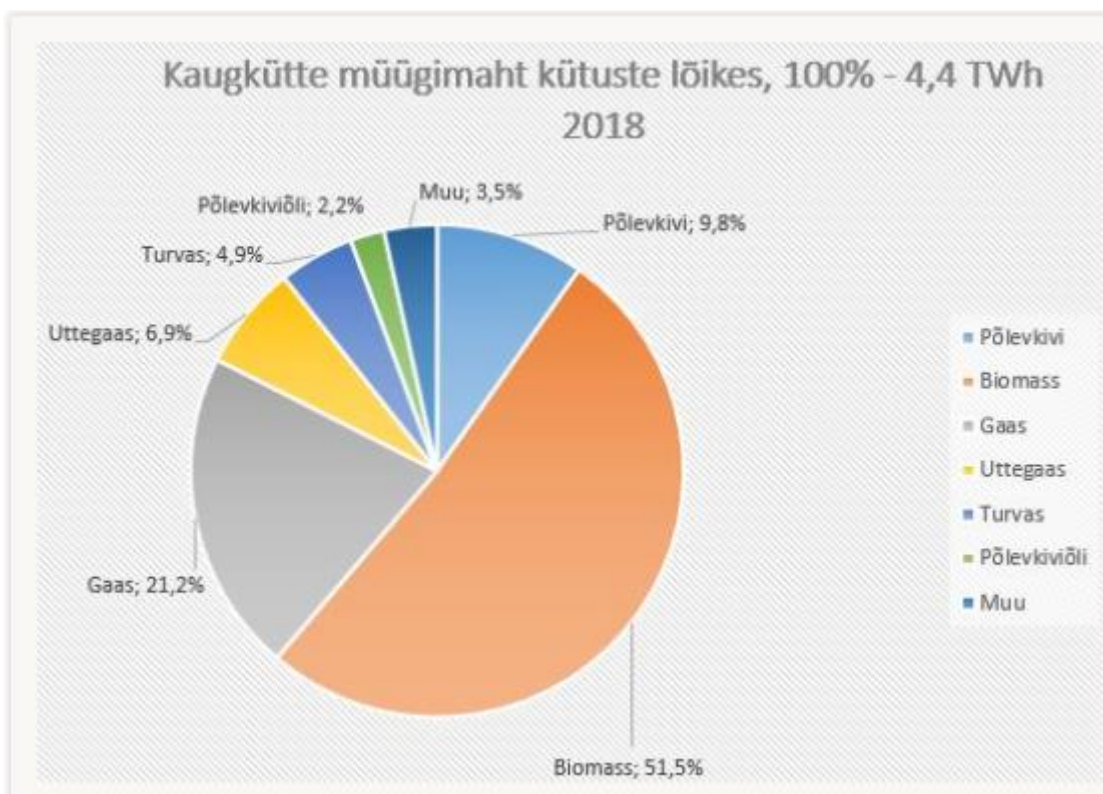
Tabel 1.2. Mõningate kütuste kütteväärtused [5]

Kütus	Ühik	GJ	MWh
Raske õli	t	40,61	11,28
Põlevkiviõli	t	38,9	10,8
Kerge õli	t	42,5	11,8
Kivisüsi	t	25,2	7,003
Maagaas (0°C)	1000m ³	36	10
Kasehalud	rm ³	5,4	1,5
Segahalupuit	rm ³	4,51	1,25
Hakkpuit	pm ³	2,88	0,8
Saepuru	pm ³	2,16	0,6
Höövli- ja freesilaast	pm ³	1,8	0,5
Okaspuu koor	pm ³	2,16	0,6
Kasekoor	pm ³	2,52	0,7
Raidmehake	pm ³	2,88	0,8
Puupellet ja brikett	t	16,92	4,7
Tükkturvas	pm ³	5,04	1,4
Freesturvas	pm ³	3,24	0,9
Kaer	t	12,6	3,5
Põhubrikett	t	15,4	4,3

Energiaühikute teisendamise reegleid arvestades on näha, et kahe viimase veeru suhe on 3,6

1.4. Enimkasutatavad kütused Eestis

2018 aastal oli kogu Eesti soojatarbimine 6,3 TWh, millest kaugküte moodustas 4,4 TWh ehk ca 70% kogutarbimisest. Kaugküttevõrgus sooja tootmiseks kasutati enim hakkepuitu 51,5% ja maagaasi 21,2%. Kaugküttekateldes kasutatavad kütused on näidatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Kütuse kasutamine kaugküttevõrgus aastal 2018 [6].

Ülejäänud 30% energiast on toodetud individuaalseid küttelehendusi.

2. PÕLEMISPROTSESS

2.1. Põlemise mõiste

Põlemine on kütuses sisalduvate põlevaelementide (C, H, S) ja hapniku energeetiliselt kulgev keemiline ühinemisprotsess, mille käigus eraldub suur hulk soojust. Selle ühinemise kõigus tekib harilikult ka leek [3:30]. Põlemisprotsessi toimimiseks on vajalikud järgmised tingimused:

- piisav kogus kütust
- oksüdeerija olemasolu (tavaliselt hapnik)
- vajaliku temperatuuri olemasolu (mis viib protsessis osaleva kütuse süttimistemperatuurini)

Põlemisprotsess võib toimuda kahes erinevas režiimis (leegiga põlemine ja hõõgumine) [7].

2.2. Täielik põlemine

Täielik põlemine tekib siis, kui kütuses sisalduv süsinik põletatakse täielikult süsihappegaasiks. Seda iseloomustab hästi keemiline põlemisvõrrand: [3:30]



Täieliku põlemise eelduseks on see, et 1 kg süsiniku põlemisel liitub temaga 2,3 kg hapnikku, kusjuures tekib selle protsessi käigus 9,1 kWh soojust. Kui arvestada veel õhu keemilist koostist (21% O₂, 78% N ja 1% muid gaase), siis vajaliku hapnikukoguse saamiseks on vaja 9 m³ õhku.

2.3. Mittetäielik põlemine

Kui põlemisprotsessil põleva süsiniku juurde ei pääse täielikuks põlemiseks vajaminevat hapnikuhulka aga põlemine siiski kestab edasi, siis tekib mittetäielik põlemine, mille

jääkaineks on süsihapend e. vingugaas. See on põlev gaas, mis õhuga segunedes on väga plahvatusohtlik ja ka mürgine inimorganismile.

Keemilise võrrandi järgi on mittetäielik põlemine vaadeldav: [3:30]



See näitab, et kaks süsiniku aatomit liituvad hapniku molekuliga ja moodustavad kaks süsinikoksiidi molekuli.

Sellisel põlemisel seob 1kg süsinik 1,3 kg hapnikku, leegi temperatuur muutub madalamaks ja eralduv soojushulk on 2,53 kWh, mistõttu jääb kasutamata ca 70% kütuses sisalduvast soojusenergiast.

2.3. Vesiniku põlemine kütuses

Vesiniku põlemisreaktsioon on kirjeldatav keemilise võrrandi alusel: [8:112]



Lähtuvalt sellest võrrandist ühineb kaks vesiniku molekuli ühe hapniku molekuliga ja selle tulemusel saadakse kaks molekuli vett.

2.4. Põlemiseks vajalik oksüdeerija

Kütuse põlemisel on väga suur osa õhul. Sõltuvalt kütuses sisalduvatest keemilistest elementidest on iga elemendi põlemiseks vaja teatud kogus hapnikku, mille hulka saab arvutada keemiliste reaktsioonivõrrandite alusel. Vajaminevat õhu kogust nimetatakse teoreetiliseks õhu hulgaks ja tähistatakse V_0 . Seda mõõdetakse 1 kg kütuse kohta normaalkuupmeetrites (nm^3 , õhu mahtu mõõdetakse normaaltingimustes $p=760 \text{ mm Hg}$ ja $t=0^\circ\text{C}$) [9:177].

Kuna kütuste põlemine on keerukas keemiline protsess, siis ei taga teoreetilise õhuhulga juhtimine koldesse täielikku kütuse põlemist. Seetõttu tuleb anda koldesse õhku varuga ja seda nimetatakse tegelikuks õhukoguseks ja tähistatakse V_{teg} [9:118].

3. SOOJUSBILANSS

3.1. Soojusbilansi võrrand

Katla soojusbilanss koosneb erinevatest soojushulkadest ja näitab, kuidas jaguneb katlasse sisse antava energia hulk. Soojusbilansi võrrandi abil saab määrata katla kasutegurit. Katlasse kütusega antav soojushulk on kõige suurem ja ta sõltub kütuse kogusest ja kütteväärtusest. Seda soojushulka tähistatakse Q . [2:454]

Katlast kättesaadavat kasulikku energiahulka tähistatakse Q_1

Soojuskadu heitgaaside füüsikalise soojusega, mis lahkub katlast suitsugaasidega on tavaliselt kõige suurem, kuna suitsugaasi temperatuur katlast väljumisel on kõrge võrreldes välistemperatuuriga. Seda soojushulka tähistatakse Q_2 [10:454].

Soojuskadu, mis on tingitud katlas mittetäieliku põlemisega, kui põlemissaadustesse jääb põlevaid gaase (vingugaasi), nimetatakse kaoks keemiliselt puudulikust põlemisest ja tähistatakse Q_3 Põhiliselt tuleneb see puudulikust õhuhulgast, või õhk seguneb halvasti kütusega. [10:454]

Puudulik põlemine põhjustab ka põlemata kütuse vajumist läbi kolderesti ja eemaldatakse katlast koos tuhaga. Sellel põhjusel tekkinud soojuse kadu nimetatakse kaoks mehaaniliselt puudulikust põlemisest ja tähistatakse Q_4 . [10:454]

Soojuse kadusi põhjustab ka katla välispiirete temperatuur, mis on kõrgem kui ümbritsev keskkond ja ta annab ära soojust nii konvektsiooni kui ka kiirguse teel. Sellist soojushulka nimetatakse jahtumiskaoks ja tähistatakse Q_5 . [10:454]

Soojuskadu tuha füüsikalise soojusega tähistatakse Q_6 . Seda soojuskadu tuleb enamasti arvesse võtta siis, kui tuhaeristus käib automaatselt, mistõttu viiakse soojust katlast välja sooja tuhaga. [10:454]

Lähtudes nendest soojushulkadest, võib katla soojusbilanssi näidata järgmise võrrandiga:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (3.1)$$

kus Q on kütusega katlasse antud energiahulk kJ;

Q_1 on küttesüsteemile antud kasulik soojushulk kJ;

Q_2 on suitsugaasidega kaotatud soojushulk kJ;

Q_3 on keemilisest mittetäieliku põlemisest tekkinud soojushulk kJ;

Q_4 on soojushulk põlemata kütusest kJ;

Q_5 on soojuskadu katla välisjahtumisest kJ;

Q_6 soojushulk, mis eraldub tuha ja räbu katlast eemaldamisega kJ.

Katelseadme kasutegurit saab hinnata katlast kättesaadava energia ja kogu sisse antava soojusenergia suhtena ja võib välja kirjutada võrdusega: [8:145]

$$Q_1 = Q \cdot \eta, \tag{3.2}$$

kus η on kasutegur %.

4. PRAKTILINE TÖÖ

4.1. Katlabilansi katse

Praktiline katse on läbi viidud Eesti Maaülikooli katlalaboris (06.03.2021), kus on ühisesse küttesüsteemi ühendatud kolm erinevat energiaallikat ja üks eraldiseisev Ahja ahjutehase moodulahi (2000 kg). Ühisesse süsteemi on liidetud:

- Katel LUK-50
- Pelletikatel 20 kW
- Õhk vesi soojuspump.

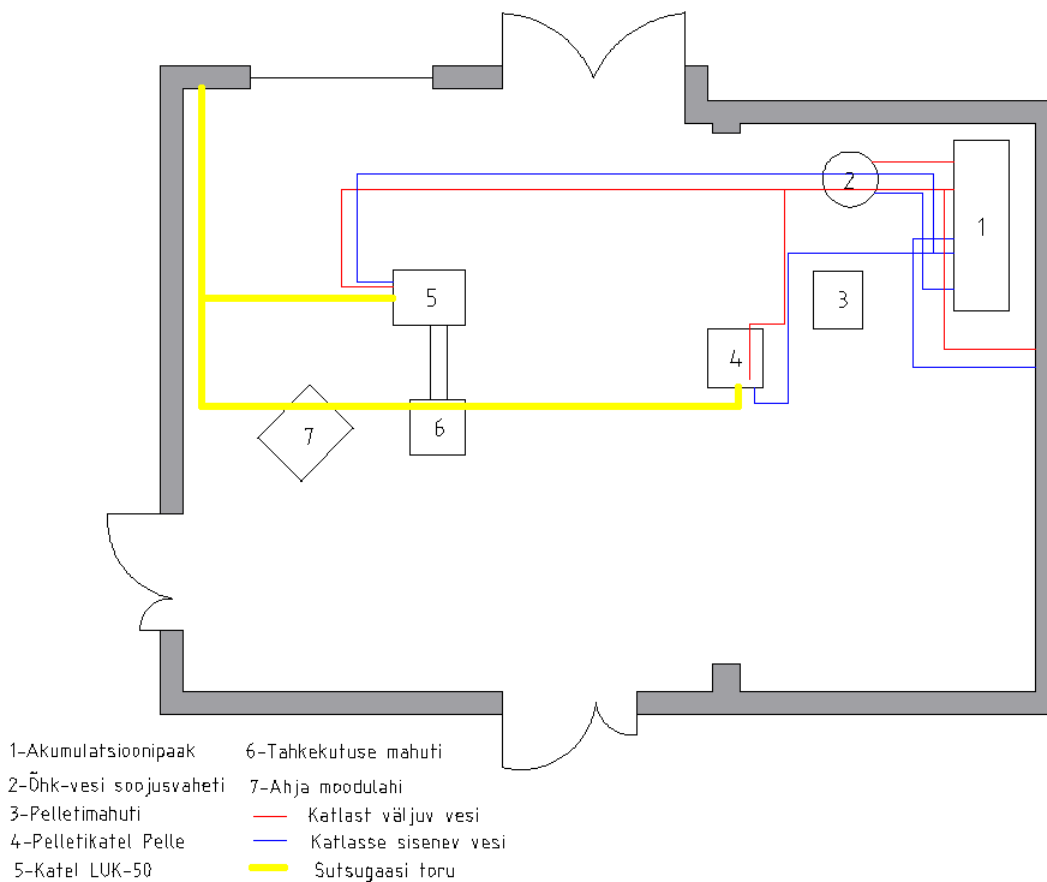
Saadud energia salvestatakse ettevõtte "Rapla Metall" poolt valmistatud akumulatsioonipaaki APK-1500.

Tabel 4.1. Akumulatsioonipaagi andmed

Töörõhk	2,0 bar
Töötemperatuur	95°C
Vee maht	1500 l
Mõõdud	1680×1860×700
Kaal	390 kg

Akumulatsioonipaagist saab salvestatud energiat anda edasi maja keskküttesüsteemi, kuid selleks peab olema akumulatsioonipaagi vee temperatuur olema 5 °C kõrgem, kui maja küttegaafiku alusel määratud temperatuur. Sellel päeval oli välisõhu temperatuur -3 °C, mis määras kütteeve temperatuuriks 63 °C millest tulenevalt pidi akumulatsioonipaagi temperatuur olema 68°C või kõrgem, et oleks võimalik soojusenergiat kooli soojasõlme juhtida.

Katlalabori soojussõlme põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1. Eesti Maaülikooli katlamaja põhimõtteskeem.

Katsel tehtud protsessid ja nende ajaline järjestus:

- 10:00-tutvumine katlalaboriga ja vajalike andmete fikseerimine:
- välistemperatuur t_v - -3°C
- sisetemperatuur t_s - 25°C
- algne temperatuur katlas ja akumulatsioonipaagis t_v - $31,5^{\circ}\text{C}$
- õhurõhk -759 mm/Hg
- 10:30-välja kaalutud ja pandud katla koldesse esimese kogus puitkütust, mis koosnesid $12,7$ kilogrammist 18% niiskusesisaldusega halupuudest ja süütamiseks kasutatud $5,46$ kilogrammist 0% niiskusega puidu klotsidest
- 10:55-gaasianalüsaatori Testo 350 ühendamine suitsulõõri
- 11:00-koldes kütuse süütamine
- 11:40-küttevee suure ringi avamine ja tsirkulatsioonipumba tööle lülitamine

- 12:25-lisatud 16,8 kilogrammi 18 % niiskusesisaldusega halupuid
- 13:00-gaasianalüsaatori filtri vahetus
- 13:17-katla küttepindade puhastus
- 14:00-katlabilansikatse lõpp

4.2. Keskküttekatel

Katlabilansikatse viisin läbi LUK-50 katlaga. Teraskatel on mõeldud eramutele, mille köetav pind on ca 350 m². Lisana on võimalik paigaldada katla küljele tahkekütte või õlipõleti, millega saab kasutada kütustena vilja, viljajääke, hakkepuitu, freeslaastu, tükkturvast. Pelletipõleti on soovitatav paigaldada ukse külge. Katel on kujutatud joonisel 4.2.



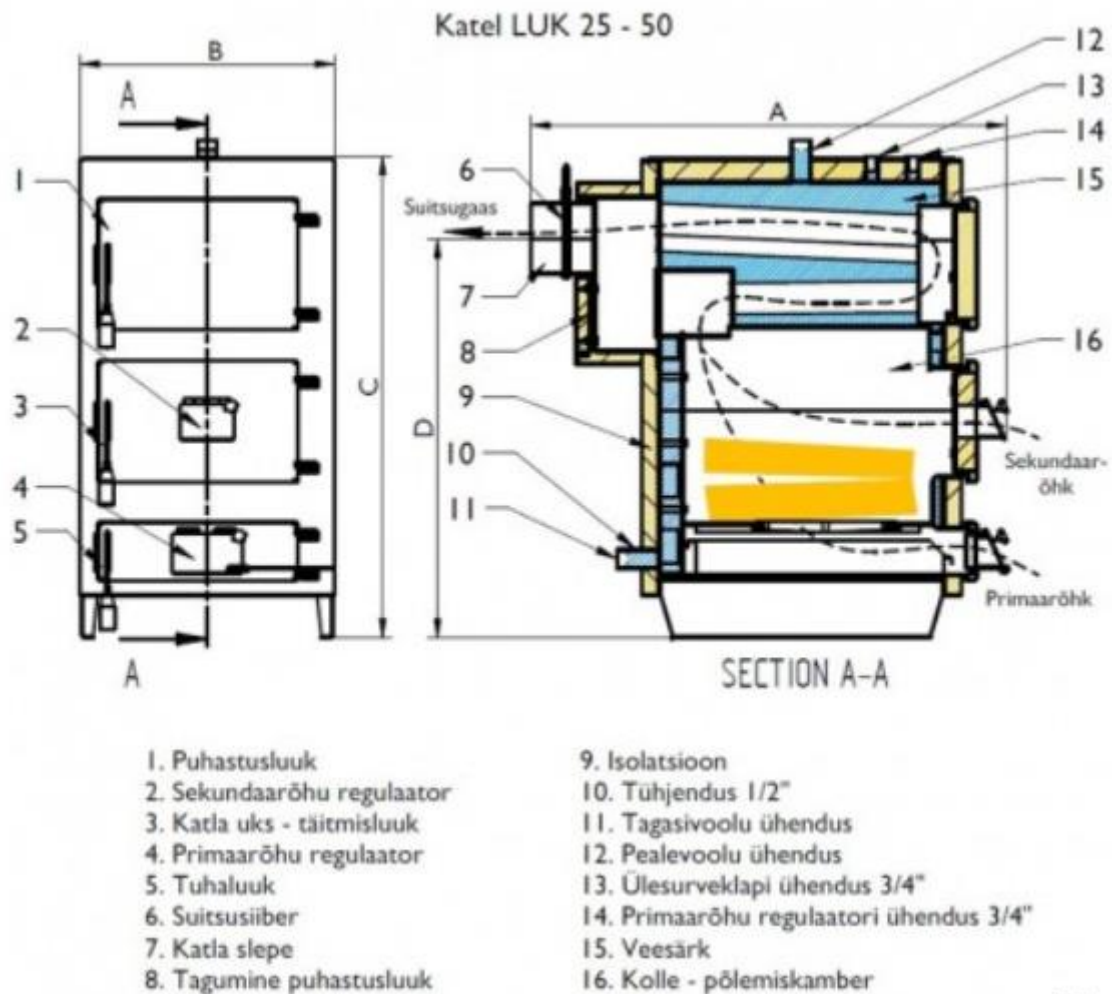
Joonis 4.2. Katel LUK-50 [11].

Katel LUK-50 tehnilised andmed on toodud välja tabelis 4.2

Tabel 4.2. Katla LUK-50 tehnilised andmed [11]

Nominaalvõimsus	50 KW
Kõetava hoone pind	350 m ²
Kasutegur halupuudega	~83 %
Kasutegur puitpelletiga	~90 %
Katla küttepind	3,3 m ²
Kolde pikkus	590 mm
Kolde maht	0,16 m ³
Maksimaalne töö rõhk	2,5 bar
Katserõhk	3,75 bar
Minimaalne vee temperatuur katlasse sisenemisel	60 °C
Maksimaalne töötemperatuur	95 °C
Veemaht	170 l
Peale ja tagasivoolu ühendus	1 1/2"
Kaal	410 kg
Pikkus	1170 mm
Laius	620 mm
Kõrgus	1500 mm
Suitsuviik	Ø 194 mm
Suitsuviigu kõrgus	1265 mm
Korstna min. tõmme	25 Pa
Soovitav korstna ristlõikepindala	600 cm ²
Soovitav korstna kõrgus	6-10 m

Katel LUK 50 on kolme horisontaalse küttekäiguga, mis tagab kõrge kasuteguri ja kiire soojuse ülekande. Katla kolde ja küttepindade puhastamine on lihtne, mugav ja võtab vähe aega. Katla LUK-50 põhimõtteskeem ja läbilõige on näidatud joonisel 4.3.



Joonis 4.3. Katel LUK 25-50 ehitus [11].

Katla põlemisprotsessi paremaks juhtimiseks on katlal õhuluugid nii katla täitmisluužil, kui ka tuhaluužil. Tuhaluugi õhuavast juhitakse primaarõhku, mis liigub läbi resti ja peaks tagama kütuse hea segunemise oksüdeerijaga alt ja keskelt. Sekundaarõhk, mida juhitakse kütuse peale, peab tagama et intensiivsel põlemisprotsessil primaarõhust puudu ei jää.

Suitsugaasid liiguvad koldest läbi suitsutorude, mida ümbritseb veeark edasi korstnasse, andes veele ära energiat.

4.3. Katlasse antud soojushulk Q

Katses kasutatavaks kütuseks oli halupuu, mille tarbimisaine mass oli 35 kg. Algselt kell 11:00 sai katla koldesse pandud 12,7 kg puid, mille niiskusesisalduseks sai mõõdetud Wetekom niiskusemõõturiga 18% ja süütamiseks 5,46 kg 0% niiskusesisaldusega puid (olid

seisnud pikalt kooli soojasõlmes). Kell 12:25 lisatud koldesse 16,8 kg 18% niiskusega halupuid. Seega sai katlasse pandud kütuse keskmiseks niiskuseks:

$$W^t = \frac{(12,7+16,8) \cdot 0,18 + 5,5 \cdot 0}{35} \cdot 100 = 15,2\%$$

Sellest lähtuvalt on kuiva puidu mass:

$$m_k = 35 \cdot (1 - 0,152) = 29,68 \text{ kg}$$

kus m_k -kuiva puidu mass kg.

Puitkütuse kütteväärtusel tuleb lähtuda alumisest kütteväärtusest, kuna antud katla puhul lahkeb korstna kaudu põlemisel tekkiv ja aurustunud veeaur ja viib endaga kaasa vee aurustumiseks vajaliku soojuse. Tarbimisaine alumist kütteväärtust saab arvutada Mendelejevi valemiga: [10:30]

$$Q_a^t = 81C^t + 246H^t - 26(O^t - S^t) - 6W^t \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}, \quad (4.1)$$

kus Q_a^t on tarbimisaine alumine kütteväärtus $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

Selleks tuleb leida puidu elementaarkoostis. Puidu põlevaine koostiseks valisin kirjandusest $C^p=50\%$, $H^p=6\%$, $O^p=43,4\%$, $N^p=0,6\%$, $S^p=0\%$ [9:158].

Kuivaine tuhasus $A^k=0,5\%$ tuleb arvutada ümber tarbimisainele, kasutades valemit tabelist 1.1.

$$A^t = A^k \cdot \frac{100 - W^t}{100} = 0,5 \cdot \frac{100 - 15,2}{100} = 0,42\%, \quad (4.2)$$

Nüüd tuleb kasutada teisendustegurit, et arvutada kütuse elementaarkoostis tarbimisainele, valemi saame tabelist 1.1:

$$k = \frac{100 - W^t - A^t}{100} = \frac{100 - 15,2 - 0,42}{100} = 0,8438 \quad (4.3)$$

Tarbimisaine elementaarkoostise saab nüüd arvutada teisendusteguri k abil:

$$C^t = C^p \cdot k = 50 \cdot 0,8438 = 42,19\%$$

$$H^t = H^p \cdot k = 6 \cdot 0,8438 = 5,06\%$$

$$O^t = O^p \cdot k = 43,4 \cdot 0,8438 = 36,62\%$$

$$N^t = N^p \cdot k = 0,6 \cdot 0,8438 = 0,50\%$$

Nüüd saab arvutada Mendelejevi valemiga tarbimiskütuse alumise kütuseväärtuse:

$$Q_a^t = 81 \cdot 42,19 + 246 \cdot 5,06 - 26(36,62 - 0,5) - 6 \cdot 15,2 = 3619 \frac{\text{k}\cdot\text{cal}}{\text{kg}} =$$

$$= 15141,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 4,2 \frac{\text{k}\cdot\text{Wh}}{\text{kg}}$$

Leian teoreetiliselt võimaliku soojushulga Q , mis on selle kütuse juures võimalik saada;

$$Q = Q_a^t \cdot m^t \quad (4.4)$$

kus Q on teoreetiliselt võimalik soojushulk kJ.

$$Q = \cdot 35 = 147 \text{ k}\cdot\text{Wh}$$

4.4. Katlast küttesüsteemile antud kasulik soojushulk Q_I

Kütuse süütamine katlas sai alguse kell 11:00. Küttesüsteemi veetemperatuur oli katse alguses kogu süsteemis $31,5^{\circ}\text{C}$. Sellel ajal oli katlal avatud väike küttering seniks, kuni katel saavutab oma töötemperatuuri (ca $75\text{-}85^{\circ}\text{C}$). Kell 11:40. Sai avatud suur küttering kuna küttevee temperatuur katlas oli tõusnud juba katla maksimaalse töötemperatuur ja lülitatud tööle tsirkulatsioonipump sellise kiirusega, et katla võimsus oleks umbkaudu 30 kW. Arvestades, et pealevoolu ja tagasivoolu temperatuuride vahe on 35 K, siis saab ringlusele vajaliku veevoolu hulga arvutada valemiga: [12:167]

$$P = m_v \cdot \Delta T \cdot c \rightarrow m = \frac{P}{\Delta t \cdot c}, \quad (4.5)$$

kus m_v -vee mass kg;

P -võimsus kW;

ΔT -temperatuuride vahe K;

c -vee erisoojus $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

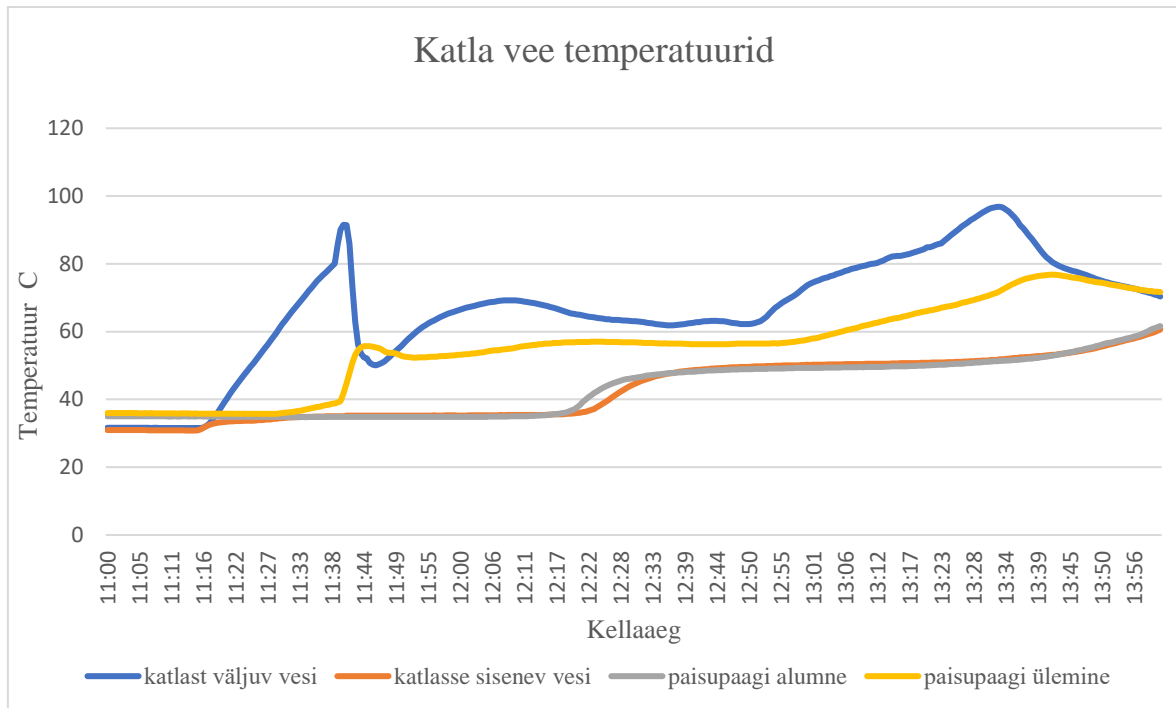
$$m_v = \frac{30}{35 \cdot 4,19} = 0,20 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 720 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Kella 13:35 oli vee temperatuur katlas tõusnud üle 95°C , mistõttu tuli kütteringis veevoolu kiirust suurendada, et vee temperatuur katlas ei tõuseks kriitiliselt kõrgele.

Antud hetkel oli katla võimsus:

$$P = 0,20 \cdot 47 \cdot 4,19 = 39,4 \text{ kW}$$

Veevoolukiirust sai suurendatud $1000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,27 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$, mis püsis seal katse lõpuni. Katsel mõõdetud temperatuurid on toodud joonisel 4.4.



Joonis 4.4. Katsejooksul mõõdetud vee temperatuurid küttesüsteemis.

Katse lõppedes oli akumulatsioonipaagis vee temperatuur 68°C . Sai proovitud soojusenergiat ära anda läbi soojusvaheti tehnikamajale, kuid see ei õnnestunud, kuna antud välistemperatuuri juures oleks pidanud akumulatsioonipaagi temperatuur olema 68°C või kõrgem.

Kütteele antud soojushulka Q_1 avaldub valemist: [12:167]

$$Q_1 = \Delta T_v \cdot m_v \cdot c, \quad (4.6)$$

kus Q_1 - kütteele antud energia kJ

ΔT_v - vee temperatuuri vahe K

Akumulatsioonipaagi temperatuur suure ringi avamisel oli 35°C ja katse lõppedes 68°C. Akumulatsioonipaagi veemass on 1500 kg ja sinna juurde tuleb ka arvestada 200 kg vett, mis ringleb läbi õhk-vesi soojuspumba.

Veele antud soojushulk on seega:

$$Q_{1pp} = 33 \cdot 4,19 \cdot (1500 + 200) = 235059 \text{ kJ} = 235,06 \text{ MJ} = 65,29 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Katlasüsteemis oli vee temperatuur katse alguses 32°C ja katse lõpus 68°C. Katlaringi vee massi moodustab 190 kg katla vett ja ca 60 kg vett kogu süsteemi torudes, kokku 250 kg, seega on veele antud soojushulk

$$Q_{1ks} = 36 \cdot 4,19 \cdot (190 + 60) = 37710 \text{ kJ} = 37,71 \text{ MJ} = 10,47 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Kokku on süsteemiveele ära antud kasulik soojus:

$$Q_{1vesi} = 65,29 + 10,47 = 75,76 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Et sellist vee temperatuuri saada, oli vaja soojendada ka akumulatsioonipaagi metallosa 390 kg, küttesüsteemi torusid koos väikese kütteringiga ca 190 kg ja katla metallosa 410 kg, siis selle jaoks kulus energiat:

$$Q_{1pp,teras} = 33 \cdot 0,47 \cdot 390 = 6048,9 \text{ kJ} = 6,49 \text{ MJ} = 1,68 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$Q_{1ks,teras} = 36 \cdot 0,47 \cdot 600 = 10152 \text{ kJ} = 10,15 \text{ MJ} = 2,82 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$Q_{1,teras} = 1,68 + 2,82 = 4,5 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Kogu soojushulk, mis läks küttesüsteemile on seega:

$$Q_1 = Q_{1vesi} + Q_{1teras} = 75,76 + 4,5 = 80,26 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Kogu soojuse hulgast moodustab kasuliku soojuse hulk protsentides:

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q}, \quad (4.7)$$

kus q_1 - on kasulik soojuse hulk protsentides kogu soojushulgast.

$$q_1 = \frac{75,76 + 4,5}{147} \cdot 100 = 55\%$$

4.5. Suitsugaaside analüüs ja sellest tekkinud soojuskadu Q₂

4.5.1. Gaasianalüüs

Gaasianalüüs on teostatud Testo 350 heitgaasianalüsaatoriga, millega on mõõdetud ajavahemikul 11:00-14:00 järgmisi suitsugaasi parameetreid:

- Hapnik suitsugaasides, O₂%
- Süsinikoksiid, CO ppm
- Lämmastikoksiidid, NO_x ppm
- Lämmastikoksiid, NO ppm
- Lämmastikdioksiid, NO₂ ppm
- Süsihappegaas, CO₂ IR %
- Suitsugaasi temperatuur °C
- Süivesinikud, HC ppm

Mõõtmisi salvestati exceli tabelisse 10 s intervalliga. Tabelitöötusega eemaldas tabelist andmed vahemikus kell 11:00-11:15, sest süütamisel on vaba hapniku hulk suitsugaasis väga suur, mis väljendub väga suures liigõhuteguris ja mõjutab palju arvutustulemust. Samuti eemaldas tabelist ka 13:00 rea, kui toimus gaasianalüsaatori filtri vahetus.

Keskmsed mõõtetulemused on kantud tabelisse 4.3.

Tabel 4.3. Keskmsed suitsugaaside mõõtmistulemused

O ₂ %	CO ppm	NO _x ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	CO ₂ IR%	°C FT	HC ppm
12,5862	3553,37	83,0357	81,1959	1,83979	7,72795	194,3	308,810

Keskmsite mõõtetulemuste alusel arvatud ka keskmsise saasteainete protsendiline kogus ja liigõhutegur valemiga: [13:226]

$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{\%CO_2IR}, \quad (4.8)$$

kus λ on liigõhutegur;

CO_{2max} – suurim võimalik süsinikdioksiidi hulk suitsugaasides %;

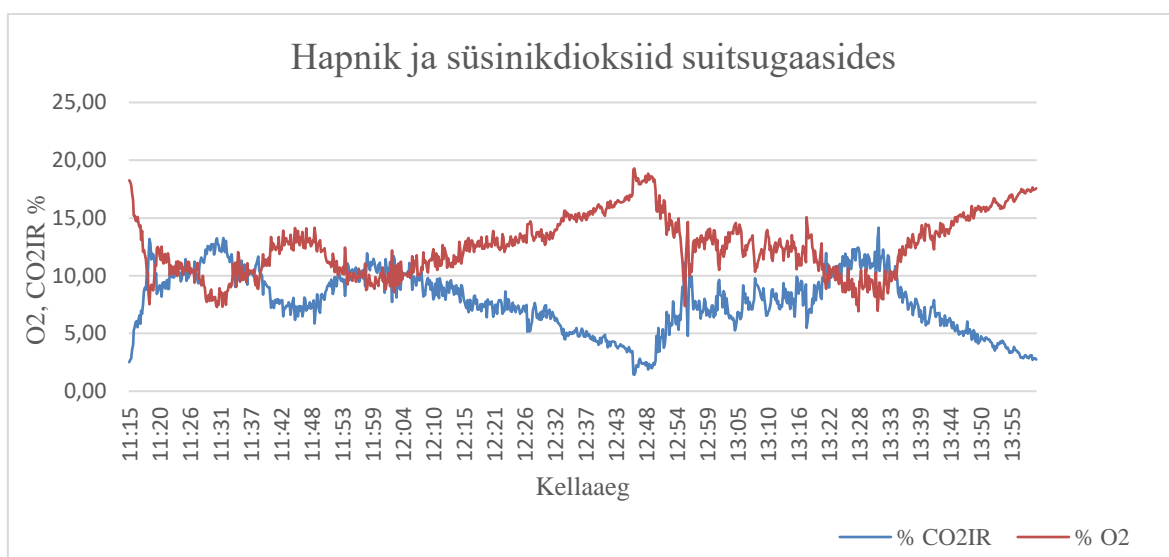
$\%CO_{2IR}$ – mõõdetud süsinikdioksiidi hulk suitsugaasides %.

Arvutatud andmed kandsin tabelisse 4.4.

Tabel 4.4. Arvutatud suitsugaaside koostisosad suitsugaasides

CO %	NO _x %	NO%	NO ₂ %	HC%	λ
0,35533	0,00830	0,00812	0,00018	0,03088	3,0795

Mõõdetud süsinikdioksiidi ja hapniku sisaldus suitsugaasides on välja toodud graafiliselt joonisel 4.5.

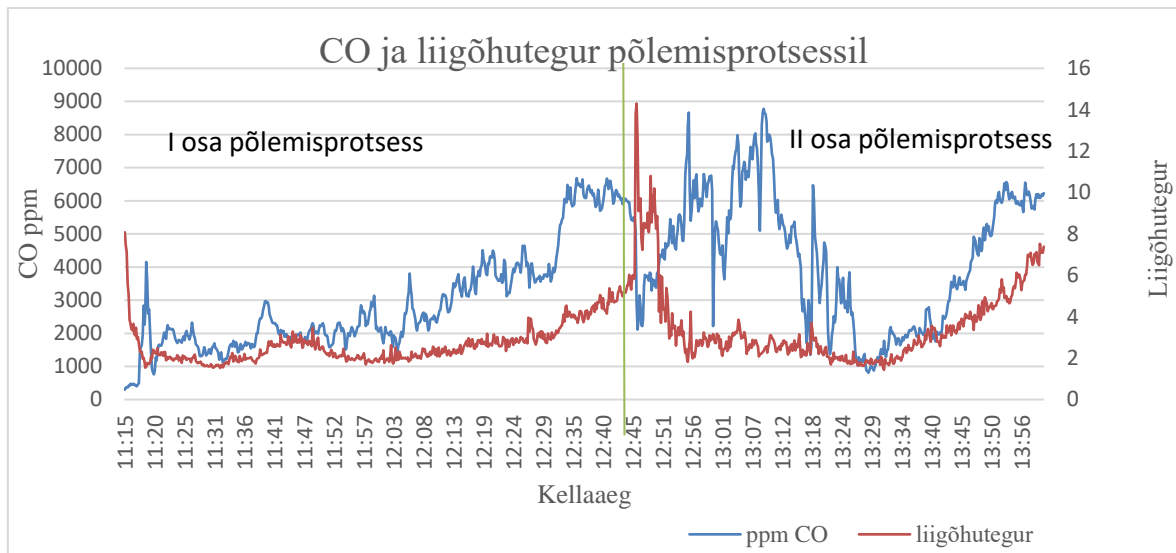


Joonis 4.5. Mõõdetud hapniku ja süsinikdioksiidi sisaldus põlemisgaasides.

Nagu graafikult nähtub, on hapniku ja süsinikdioksiidi suhe suitsugaasides pöördvõrdeline.

Selgelt on eristatavad 2 põlemisprotsessi lõppfaasi, kui hapnikutase suitsugaasides tõuseb ja süsinikdioksiidi tase alaneb.

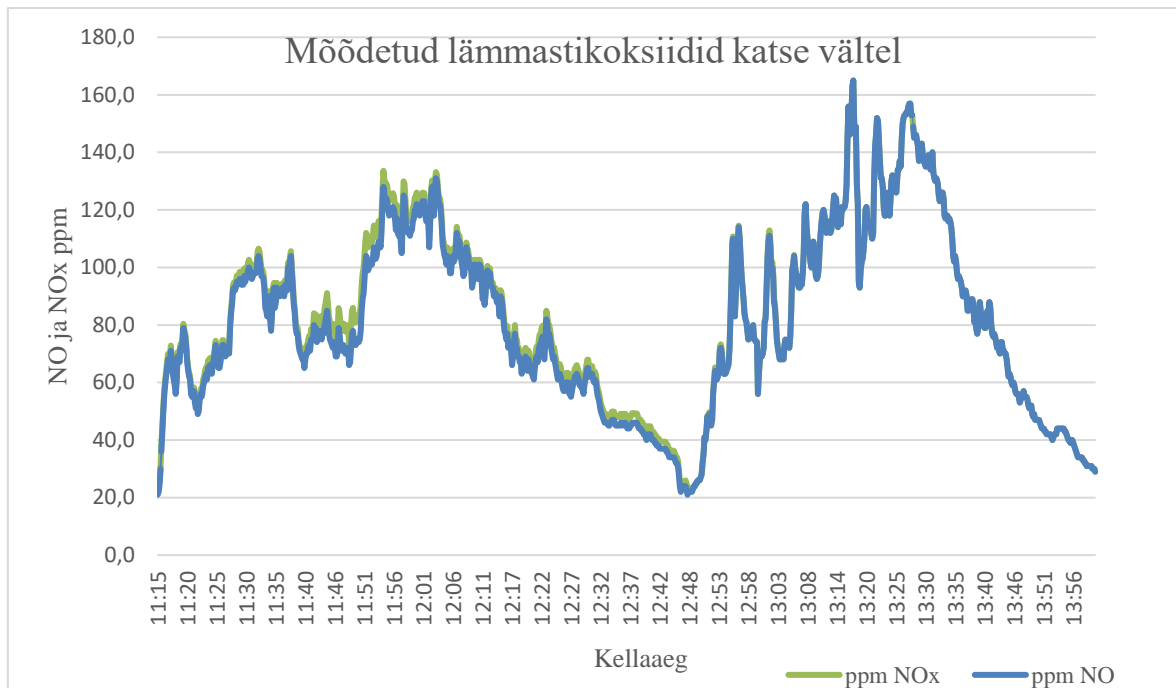
Vingugaasi ja liigõhuteguri suhe on näidatud joonisel 4.6.



Joonis 4.6. Vingugaasi ja liigõhuteguri vaheline seos põlemisprotsessil.

Graafikult on näha, et esimene katlatäis kütust põles küllaltki puhtalt. Vingugaasi tekkis rohkem alles esimese poole põlemise lõppfaasis. Kütuse lisamisel tõusis oluliselt vingugaasi osa suitsugaasides ja püsis kõrge küllalt pikalt. See võib olla tingitud madalast liigõhutegurist. Samuti võib olla põhjus korraka liiga suure hulga kütuse lisamisest, mis põhjustab kolde jahtumist ja põlemisprotsessi intensiivsus alaneb. Suure hulga kütuse lisamine pärsib ka primaarõhu liikumist läbi resti ja sellega halveneb kütuse segunemine hapnikuga. Kui vaadata ajaliselt, siis oli kõige väiksem CO heide suitsugaasides siis, kui katla vee temperatuur oli 90 °C juures. Samuti oli siis madal ka liigõhutegur, millest võib arvata et kõrge CO määr katla kütmise vältel oli tingitud kolderuumi jahtumisest. Arvutuslikult vaadates oli esimese koguse kütuse põletamisel vingugaasi sisaldus suitsugaasides ca 0,3%, siis teise ahjutäie kütuse põlemisel oli see 0,43%.

Lämmastikoksiid ja NO_x mõõtetulemustes praktiliselt kopeerivad teineteist kogu katse jooksul, mis pole sugugi ime, sest NO_x ühendis on lämmastikoksiidi hinnanguline sisaldus 75% [14]. Lämmastikoksiidide hulk suitsugaasides on näidatud joonisel 4.7.



Joonis 4.7. Mõõdetud lämmastikoksiidide kogus suitsugaasides.

Graafikult on näha, et ka lämmastikoksiidide kogus suitsugaasides oli suurem peale kütuse lisamisele järgnenud põlemisprotsessile.

4.5.2. Põlemiseks vajalik õhukogus

Iga kütuse täielikuks põlemises vajaminevat minimaalset õhu hulka nimetatakse teoreetiliselt vajaminevaks õhuhulgaks. Arvestatakse seda 1 kg tahkekütuse või 1nm^3 gaaskütuse põlemisel vastavalt põlemisreaktsioonide stöhhiomeetrilistele vahekordadele. Tahkekütuse põlemiseks vajalik teoreetiline õhuhulk $V_0\text{ nm}^3$ ja tegelik õhuhulk $V_{teg}\text{ nm}^3$. (tarbimisaine elementaarkoostised võetud punktist 4.3): [9:177]

$$V_0 = 0,0889 \cdot C^t + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t, \quad (4.9)$$

kus V_0 -teoreetiline õhukogus $\frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$.

$$V_0 = 0,0889 \cdot 42,19 + 0,265 \cdot 5,06 - 0,0333 \cdot 36,621 = 3,873 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Tegelik õhukulu:

$$V_{teg} = V_0 \cdot \lambda, \quad (4.10)$$

kus V_{teg} on tegelik tekkiv õhukulu $\frac{nm^3}{kg}$.

$$V_{teg} = 3,873 \cdot 3,08 = 11,928 \frac{nm^3}{kg}$$

4.5.3. Suitsugaasi komponendid, kogused ja erisoojus

Orgaaniliste kütuste täielikul põlemisel tekivad põlemisgaasides süsinikdioksiid CO_2 , lämmastik N_2 , ja veeaur H_2O , mis tekib kütuses oleva niiskuse mõjul, kütuses oleva vesiniku põlemisel ja ka põlemisõhus olevast niiskusest [13:224].

Suitsugaasi komponentide kogused nm^3 1 kilogrammi kütuse kohta: [9:178-179]

$$V_{CO_2} = 0,01866 \cdot C^t = 0,01866 \cdot 42,19 = 0,787 \frac{nm^3}{kg}, \quad (4.11)$$

kus V_{CO_2} on süsinikdioksiidi kogus, $\frac{nm^3}{kg}$

$$V_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot \lambda \cdot V_0, \quad (4.12)$$

kus V_{H_2O} veeauru kogus, $\frac{nm^3}{kg}$.

$$V_{H_2O} = 0,111 \cdot 5,06 + 0,0124 \cdot 15,2 + 0,0161 \cdot 3,08 \cdot 3,873 = 0,942 \frac{nm^3}{kg},$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_0 + 0,008 \cdot N^t + 0,79 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_0, \quad (4.13)$$

kus V_{N_2} on lämmastiku kogus, $\frac{nm^3}{kg}$.

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot 3,879 \cdot 0,008 \cdot 0,506 + 0,79(3,08 - 1) \cdot 3,873 = 9,427 \frac{nm^3}{kg},$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_0, \quad (4.13)$$

kus V_{O_2} on hapniku kogus, $\frac{nm^3}{kg}$.

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (3,08 - 1) \cdot 3,873 = 1,69 \frac{nm^3}{kg}$$

Suitsugaaside hulk 1kg kütuse kohta:

$$V_{sg} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}, \quad (4.14)$$

kus V_{sg} on suitsugaasi kogus, $\frac{nm^3}{kg}$.

$$V_{sg} = 0,787 + 0,942 + 9,427 + 1,682 = 12,849 \frac{nm^3}{kg},$$

Leian ka suitsugaasi komponentide %-lise koostise:

$$V_{CO_2\%} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sg}} \cdot 100 = \frac{0,787}{12,849} \cdot 100 = 6,127\%$$

$$V_{N_2\%} = \frac{V_{N_2}}{V_{sg}} \cdot 100 = \frac{9,424}{12,849} \cdot 100 = 73,372\%$$

$$V_{H_2O\%} = \frac{V_{H_2O}}{V_{sg}} \cdot 100 = \frac{0,942}{12,849} \cdot 100 = 7,335\%$$

$$V_{O_2\%} = \frac{V_{O_2}}{V_{sg}} \cdot 100 = \frac{1,692}{12,849} \cdot 100 = 13,166\%$$

4.5.4. Soojuskadu Q_2 lahkuvate suitsugaasidega

Kuna suitsugaasid sisaldavad 2-aatomilisi gaase mille mahuerisoojus on $c=29,31 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ja 3-aatomilise gaase, mille erisoojus on $c=37,68 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ saab välja arvutada soojuskao Q_2 . [9:35-48]

Arvutatud erisoojus 2-aatomilisele suitsugaasile:

$$c_{2aatom} = \frac{29,31}{22,4} = 1,308 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}, \quad (4.15)$$

kus c_{2aatom} on kahe aatomilise gaasi erisoojus $\frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$;

22,4 on gaasiliseaine molaarruumala.

Arvutatud erisoojus 3-aatomilisele suitsugaasile:

$$c_{3aatom} = \frac{37,68}{22,4} = 1,682 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}, \quad (4.16)$$

kus c_{3aatom} on kolme aatomilise gaasi erisoojus $\frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$.

Tekkinud suitsugaasi erisoojus:

$$c_{sg} = \frac{(V_{O_2\%} + V_{N_2\%})}{100} \cdot c_{2aatom} + \frac{(V_{CO_2\%} + V_{H_2O})}{100} \cdot c_{3aatom}, \quad (4.17)$$

kus c_{sg} on tekkinud suitsugaasi erisoojus $\frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$

$$c_{sg} = \frac{13,166 + 73,372}{100} \cdot 1,308 + \frac{6,127 + 7,335}{100} \cdot 1,682 = 1,359 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$$

Soojuskadu q_2 1kg kütuse kohta on:

$$Q_2 = V_{sg} \cdot c_{sg} \cdot (t_{sg} - t_0) \quad (4.18)$$

$$Q_2 = 12,849 \cdot 1,308 \cdot (197 - 27) = 2915,64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0,81 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Soojuskadu q_2 protsentides koguenergia suhtes:

$$q_2 = \frac{0,81 \cdot 35}{147} \cdot 100 = 19,32\%$$

4.6. Keemiliselt mittetäielikust põlemisest tekkinud soojuskadu Q_3

Keemiliselt mittetäielikul põlemisel tekkinud soojuskao Q_3 moodustavad suitsugaasiga eralduv vingugaas, mille alumine kütteväärtus on $12,64 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$ [15:422]

Katsel mõõdetud CO sisaldus suitsugaasis oli 0,355 protsenti, ja suitsugaase $12,849 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$, seega eralduv CO kogus oli:

$$V_{CO} = 35 \cdot 12,849 \cdot 0,0035 = 1,596 \text{ nm}^3$$

kus V_{CO} on vingugaasi kogus suitsugaasides nm^3 .

Saamata jäänud soojusenergia seega:

$$Q_{3CO} = 12640 \cdot 1,596 = 20179,61 \text{ kJ} = 5,60 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Sama arvutuskäiku kasutan ka soojuskao leidmiseks süsivesinike lendumise teel. Kuna mõõdetud HC sisaldus suitsugaasides oli 0,03088%, aga kuna pole mõõdetud nende täpset koostist, siis kütteväärtuse leidmiseks arvestan 4 esimese järgu alkaanide keskmist kütteväärtust ($\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8$ ja C_4H_{10}) Vastavad kütteväärtused on toodud tabelis 4.5.

Tabel 4.5. Alkaanide kütteväärtused $\frac{MJ}{m^3}$ [15:422]

Alkaan	Kütteväärtus $\frac{MJ}{m^3}$
CH ₄	35,88
C ₂ H ₆	64,36
C ₃ H ₈	93,18
C ₄ H ₁₀	123,15
Keskmine	79,14

HC kogus suitsugaasides:

$$V_{HC} = 35 \cdot 12,849 \cdot 0,0003088 = 0,139 \text{ nm}^3,$$

kus V_{HC} on süsivesinike kogus suitsugaasides nm^3 .

Saamata jäänud soojusenergia seega:

$$Q_{3HC} = 79140 \cdot 0,139 = 10990,32 \text{ kJ} = 3,05 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Kokku on soojuskadu Q_3 :

$$Q_3 = 5,60 + 3,05 = 8,65 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Soojuskadu q_3 protsentides kogusoojuse suhtes on:

$$q_3 = \frac{8,65}{147} \cdot 100 = 5,88\%$$

4.7. Soojuskadu tingitud mehaanilisest mittepõlemisest Q_4

Eemaldades katlast tuhka oli juba silmaga näha et see sisaldab põlemata kütust, kuna täielikult põlenud kütusetuhk peaks olema valge, aga eemaldatud tuhas oli küllalt palju musti tükke. Põlemata kütus tuhas näidatud joonisel 4.8.



Joonis 4.8. Põlemata kütuse ja tuha kaalumine.

Kogu katse vältel oli tekkinud 582g tuhka. Kui arvestada, et puitkütuse täielikul põlemisel on normaalne tuhasus 0,5%, siis oleks pidanud katsel jääma alles tuhka:

$$m_A = m_k \cdot A_k, \quad (4.19)$$

kus m_A -arvutuslik tuha mass g;

m_k -puidu kuivaine mass kg;

A_k -puidu kuivaine teoreetiline tuha kogus %.

$$m_A = 29,68 \cdot 0,5\% = 0,13345kg = 133,45g$$

Põlemata kütuse mass on seega:

$$m_p = A_{teg} - m_A, \quad (4.20)$$

kus m_p on põlemata kütuse mass kg ;

A_{teg} on katsel mõõdetud tegelik tuha kogus g.

$$m_p = 582 - 133,45 = 448,55g = 0,44 kg$$

Kui arvestada, et see põlemata kütus on süsinik, mille kütteväärtus on $33,7 \frac{MJ}{kg}$, siis saamatajäänud energia on:

$$Q_4 = m_p \cdot 33,7,$$

$$Q_4 = 0,448 \cdot 33700 = 15097,6 \text{ kJ} = 4,2 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Põlemata kütusest saamatajäänud soojuse osakaal kogusoojusesse protsentides on:

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q} \cdot 100$$

$$q_4 = \frac{4,2}{147} \cdot 100 = 2,85\%$$

4.8. Soojushulgad Q_5 ja Q_6

Soojushulk Q_5 jääb katses arvutamata, sest kolde välispiiretelt eralduv soojushulk läks katlaruumi kütmiseks, seetõttu pole see soojuskadu. Soojuskadu Q_6 puudub, kuna tuhk jahtus katlas ja selle eemaldamisega katlast mingisugust soojuskadu ei toimunud.

4.9. Katla kasutegur

Katla kasuteguri määramisel on võetud arvesse soojuskadudena lahkuvaid soojushulkasi q_2, q_3 ja q_4 , siis avaldub katla kasutegur: [16]

$$\eta = 100 - 19,32 - 5,88 - 2,85 = 71,95\% \quad (4.21)$$

Antud katlale on tootja andnud kasuteguriks halupuuga kütmisel ca 83%. Katse käigus jäi kasutegur 11% madalamaks, kui tootja on ette näinud.

4.10. Laboratoorse töö juhend

Vaadates katse käiku ja analüüsides mõõtmisel mõõdetud tulemusi on koostatud laboratoorse töö juhend õppeaines "Soojusgeneraatorid". Peamiselt on antud juhised, mida jälgida põlemisprotsessi juhtimisel et saavutada võimalikult kõrge kasutegur ja puhas põlemine. Laboritöö juhend on esitatud lisas 1.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö andis väga hea ülevaate kasutatavtest biokütustest ja nende omadustes. Töö käik andis ülevaate, kui palju võib mõjutada põlemisprotsessi juhtimine katla kasutegurit ja ka loodusesse eralduvaid saasteainete kogust.

Nagu praktilisest katsest näha, on üheks oluliseks parameetriks kütmise juures liigõhk. Liiga suur liigõhutegur suurendab eralduvat suitsugaaside hulka ja kuna see on üheks suuremaks soojuskaoks katla bilansil, siis mida madalam on liigõhutegur, seda väiksem on suitsugaasi kogus. Liiga madal liigõhutegur seevastu ei taga kütuse täielikku põlemist koldes, mistõttu põhjustab see soojuskadu põlemata kütuse näol ja suurendab saasteainete kogust suitsugaasis.

Katsetulemused tõid selgelt välja ka et põlemist mõjutab palju kolde temperatuur. Madala koldetemperatuuriga ei põle põlemisgaasides olev põlemata kütus ja lahkub suitsugaasidega korstnasse. Samuti mõjutab ka põlemisprotsessi kütuse lisamine koldesse. Liialt suur kogus kütust takistab õhu liikumist koldes ja ei segune hästi kütusega.

Võttes arvesse praktilisel töös analüüsitud tulemusi, võib öelda et katla kütmine kõrge katla kasuteguriga ja võimalikult väheste saasteainetega on küllalt keeruline protsess ja nõuab vilumust. Tuleb leida optimaalne tasakaalupunkt kõikide põlemisprotsessi mõjutavate tegurite vahel.

Töös tehtud katse ei tulnud küll välja kõige paremini (katla kasutegur 71 % , küllalt suur suitsugaaside kogus ja CO oleks võinud ka olla madalam), kuid selle põhjal on antud soovitusi paremaks kütmiseks katlabilansi laboratoorse töö juhendis. Peamisteks soovitusteks oli jälgida et liigõhutegur poleks liialt suur, koldes oleks piisavalt ruumi põlemisõhule, jälgida, et katlasse siseneva vee temperatuur ei jahutaks liialt madalale vett katlasüsteemis (saab reguleerida küttevete voolamise kiirusega) ja kütuse lisamisel põlemisprotsessi vahel jälgida kütusekoguseid ja vajadusel anda koldesse rohkem õhku.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. <https://old.taltech.ee>

https://old.taltech.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/oppematerjalid/kyte-ventilatsioon/1._Kutus.pdf (kättesaadav 19.02.2021)

2. Paist, A., Poobus, A. (2009). Soojusgeneraatorid. Tallinn: TTÜ Kirjastus. 147 lk.

3. Veski, A. (2005). Ahjud, pliigid, kamimad. Tallinn: Tormikiri OÜ. 212 lk.

4. <https://www.evs.ee> <https://www.evs.ee/et/iso-1928-2020> (kättesaadav 25.04.21)

5. <https://www.soojapood.ee> <https://www.soojapood.ee/et/p/kutuste-kuttevaartused> (kättesaadav 15.01.21)

6. <https://www.mkm.ee> <https://www.mkm.ee/et/tegevused-eesmargid/energeetika/soojusmajandus> (kättesaadav 21.01.21)

7. www.firesafe.org.uk <https://www.firesafe.org.uk/information-about-the-fire-triangletetrahedron-and-combustion/> (kättesaadav 23.03.2021)

8. Litvin, A. (1961) Soojusenergeetika alused. Tallinn: Eesti Riiklik kirjastus. 278 lk.

9. Mikk, I. (1977) Soojustehnika käsiraamat. Tallinn: Valgus 619 lk

10. Irak, A. (1974) Aurukatlad. Tallinn: Valgus 510 lk

11. <https://cerbos.ee/> <https://cerbos.ee/et/puukatlad/769-katel-luk-50.html> (kättesaadav 03.01.2021)

12. Seleznyov, J. (1969) Füüsika kõrgematesse koolidesse astujaile. Tallinn: Valgus 400 lk

13. Ingermann, K. (2015). Soojustehnika mõõtevahendid. Tallinn: TTÜ Kirjastus. 288 lk

14. <https://ec.europa.eu> <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/3/2016/ET/C-2016-8381-F1-ET-ANNEX-2-PART-1.PDF> (kättesaadav 13.05.2021)

15. Ots, A. (2011) Soojustehnika aluskursus Tallinn TTÜ Kirjastus. 816 lk

16. Soojustehnika laboratoorsed tööd. (1985) Eesti Põllumajanduse Akadeemia. 20 lk.

LISAD

Lisa1. Katlabilansi praktikumi juhend õppeaines “Soojusgeneraatorid”.

Üliõpilased:		Õppeaasta:	Rühm:
SOOJUSGENERAATORID			
Juhendaja: M. Hovi		Töö tehtud:	Aruanne esitatud:
Töö nr.	Katla bilansikatse		
Katseobjekt: KATEL LUK-50		Kasutatud seadmed:	

Töö eesmärgiks on tutvuda puuküttekatla LUK-50 ehituse ja tööpõhimõttega. Samuti saada teadmisi põlemisprotsessi olemusest ja selle juhtimisest. Laboritöö käigus peaks üliõpilane saama teadmisi katlabilansi moodustavatest soojushulkadest, suurustest ja jagunemisest protsessi käigus.

Ülesanne 1. Tutvuda vaatluse teel katsetatava katla ehitusega ja märkida üles põhiandmed. Samuti märkida ära katse alguses olevad põhilised parameetrid (kütteevee algtemperatuur katla süsteemis, kütteevee algtemperatuur akumulatsioonipaagis, sisetemperatuur, suhteline õhuniiskus, välistemperatuur). Samuti määrata soojussüsteemi massiline koostis.

Ülesanne 2. Eemaldada katlast vana tuhk, vajadusel puhastada suitsugaasi kanaleid, et küttepindadelt eralduv soojushulk oleks maksimaalne.

Ülesanne 3. Kütuse ettevalmistus. Määrata kütuse niiskus, kaaluda kütmiseks vajaminev kogus. Küttepuu kogus valida arvutuslikul meetodil vastavalt õppejõu poolt määratud lõppeesmärkidele.

Ülesanne 4. Ühendada gaasianalüsaator Testo 350 sond mõõtepunkti ja mõõta töö käigus põlemisprotsessil tekkivad gaasilised ühendid suitsugaasides ja suitsugaasi temperatuur. Samuti mõõta katsel kütteevee temperatuurid erinevates punktides (akumulatsioonipaak, katlast väljuva vee temperatuur ja katlasse siseneva vee temperatuur).

Lisa1. Katlabilansi praktikumi juhend õppeaines

“Soojsgeneraatorid” järg

Ülesanne 5. Katla käivitamine toimub väljalülitatud tsirkulatsioonipumbaga (tsirkulatsioonipump lülitada tööle katla töötemperatuuri saavutamisel).

Ülesanne 6. Põlemisprotsessi juhtida katla luukide küljes olevate õhupilude kaudu. Primaarõhu klapi abil saab reguleerida põlemisvõimsust koldes. Kuna põhiline osa biokütustest saadavast soojusest eraldub mitte kütusekihis, vaid kolderuumis, kuna nende kütuste lendainesisaldus on kõrge. Lendainete süttimiseks on vajalik nõutav temperatuur ja lisaks tuleb kolderuumi anda hapnikurikast õhku. Lendosade põlemiseks vajalikku lisaõhku nimetatakse sekundaarõhuks e pealtõhuks, kusjuures sekundaarõhu vajadus ületab nende kütuste põletamisel primaarõhu vajaduse.

Liigõhuteguri reaajas jälgimiseks saab kasutada valemeid: [1]

$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{\%CO_2IR},$$

kus CO_{2max} -maksimaalne süsinikdioksiidi %-line kogus suitsugaasis (20,3)

$\%CO_2IR$ -mõõdetud süsinikdioksiidi %-line kogus suitsugaasis

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2},$$

kus O_2 on vaba hapniku sisaldus kuivades põlemisgaasides.

Optimaalseks liigõhuteguriks peetakse puidu põlemisel vahemikku 1,4-1,6, kuid praktikas on see siiski kõrgem.

Ülesanne 7. Põlemisprotsessi lõppedes lasta katlal jahtuda, eemaldada tuhaja põlemata kütus koldest ja tuhavannist. Kaaluda tuhka ja põlemata kütus.

Ülesanne 8. Arvutada soojushulgad Q, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . Soojushulga Q_2 arvutamisel arvestada ka katlasse sisse antava õhu niiskusega. Saadud tulemusi kasutades määrata katla kasutegur η .

Ülesanne 9. Joonestada graafikud $t = O_2\%, CO_2\%$ ühises teljestikus, $t = CO_{ppm}, \lambda$ ühises teljestikus ja joonestada ka graafikud küttesüsteemi temperatuuri muutustest katse käigus.

Ülesanne 10. Analüüsida kriitiliselt töö käiku ja tulemusi.

Lisa1.Katlabilansi praktikumi juhend õppeaines

“Soojusgeneraatorid” järg

Metoodilisi juhendeid. Kütuse niiskuse määramisel kasutada niiskusemõõtjat. Kui kasutada kütusekoguseid, mille niiskusesisaldus on väga erinev on soovitatav keskmine niiskusesisaldus arvutada kütuse kogumassi suhtes. Koldesse kütuse panemisel tuleb arvestada, et kütus poleks väga kokku laotud (õhu liikumiseks kütuse vahel peaks jääma ruumi).

Põlemisprotsessi võib lugeda lõppenuks, kui CO_2 sisaldus suitsugaasis on ca 4%. Kütuse juurde lisamisel katlasse põlemisprotsessi lõppedes peaks vältima korraga suure koguse kütuse lisamist, kuna see madaldab oluliselt kolde temperatuuri ja takistab õhu liikumist. Samuti tuleks kütuse lisamisel katlasse anda ka juurde rohkem õhku, et põlemine saavutaks intensiivsuse.

Katla töötemperatuuri saavutamisel tuleb lülitada sisse tsirkulatsioonipump soovitatavalt sellise kiirusega, et katlasse sisenev küttevesi ei jahutaks kolde temperatuuri liialt madalale.

Akumulatsioonipaagi algtemperatuur oleks mõistlik määrata tsirkulatsioonipumba sisselülitamisel, kuna antud paagis võib temperatuur muutuda tänu teistele kütteseadmetele.

Samuti on soovitatav katse lõpus temperatuuride mõõtmise faili salvestamisel märkida ära täpne kellaeg, kuna selle alusel saab määrata mõõtetulemuste kellaaja. Pärast on parem võrrelda andmeid suitsugaasi andmetega.

Kasutatud kirjandus.

1.Ingermann, K. (2015) Soojustehnika mõõtevahendid. Tallinn: TTÜ Kirjastus 288 lk

Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

1. Mina, _____ Andres Nääs _____,

(*autori nimi*)

sünniaeg _09.03.1980 _____,

annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

_____ ÕPPEAINE “SOOJUSGENERAATORID” LABORATOORNE TÖÖ:

KATLA BILANSIKATSE _____,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on _____ lektor Mart Hovi *MSc*, Külli Hovi *MSc* _____,

(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _allkirjastatud digitaalselt _____

(*allkiri*)

Tartu, 28.05.2021 _____

(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Mart Hovi, Külli Hovi allkirjastatud digitaalselt _____

(*juhendaja(te) nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)