



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia Instituut

KAUGKÜTTE TAGASIVOO LU TEMPERATUURI LANGETAMISE MÕJU SUITSUGAASIDE KONDENSAATORI EFEKTIIVSUSELE

THE EFFECT OF THE DISTRICT HEATING RETURN TEMPERATURE REDUCTION ON FLUE GAS CONDENSER EFFICIENCY

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kertu Lepiksaar
/nimi/

Üliõpilaskood: 183132MASM

Juhendaja: Anna Volkova, vanemteadur
/nimi, amet/

Tallinn 2020

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 2020

Autor: Kertu Lepiksaar

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2020

Juhendaja: Anna Volkova

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2020 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kertu Lepiksaar (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 18.10.1991)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langetamise mõju suitsugaaside kondensaatori efektiivsusele“,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Anna Volkova,

(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

_____ (*allkiri*)

_____ (*kuupäev*)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kertu Lepiksaar, 183132MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/18 Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): vanemteadur, Anna Volkova, 620 3905

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Kaugkütte tagasivoolu temperatuuri vähendamise mõju suitsugaaside kondensaatori efektiivsusele*

(inglise keeles) *The effect of the District heating return temperature reduction on flue gas condenser efficiency*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Määrata suitsugaaside kondensaatori soojustagastust mõjutavad parameetrid
2. Leida seos kaugkütte tagasivoolu temperatuuri ja suitsugaaside kondensaatori soojustagastuse vahel
3. Hinnata kaugkütte tagasivoolu temperatuuri mõju suitsugaaside kondensaatori soojustagastusele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Arendada teoreetiline mudel parameetritest, mis mõjutavad suitsugaaside kondensaatori poolt toodetud soojuse hulka	01.02.2020
2.	Koguda reaalseid andmeid kinnitamaks mudeli õigsust	01.04.2020
3.	Analüüsida tulemusi ning formuleerida järeldused	01.05.2020

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....2020.a

Üliõpilane: Kertu Lepiksaar ".....".....2020.a
/allkiri/

Juhendaja: Anna Volkova ".....".....2020.a
/allkiri/

Programmijuht: Eduard Latõšov ".....".....2020.a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	5
EESSÕNA	7
Tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	12
1 SUITSUGAASIDE KONDENSAATORID	14
1.1 SUITSUGAASIDE TÖÖTLEMINE	14
1.1.1 Suitsugaaside töötlemise tehnoloogiad	14
1.2 ERINEVAT TÜÜPI SUITSUGAASIDE KONDENSAATORID JA PESURID	16
1.2.1 Kuiv suitsugaaside pesur	16
1.2.2 Märg suitsugaaside pesur	17
1.2.3 Venturi pesur	18
1.2.4 Kandikutega pesur	19
1.3 SUITSUGAASIDE SOOJUSE TAGASTAMINE	20
1.3.1 Suitsugaaside kondensaator kui soojusvaheti	20
1.3.2 Erinevad soojustagastusega seotud uurimisküsimused	22
1.4 Installeeritud suitsugaaside kondensaatorid Eestis	24
2 SUITSUGAASIDE KONDENSAATORI SOOJUSTAGASTUSE ARVUTUSMUDEL	25
2.1 SUITSUGAASIDE KOOSTISE MÄÄRAMINE	28
2.1.1 Vajalikud lisaandmed suitsugaaside koostise määramiseks	28
2.1.2 Suitsugaaside koostise määramine DIN EN 12952-15 järgi	29
2.1.3 Suitsugaaside määramine stöhhiomeetrilisel meetodil	31
2.2 SUITSUGAASIDE SOOJUSVOO ARVUTUS	35
2.2.1 Latentne soojus	35
2.2.2 Mittekondenseeruvate suitsugaaside soojus	37
2.3 SUITSUGAASIDE KONDENSAATORI SOOJUSVAHETUSE ARVUTUS	38
3 TULEMUSTE ANALÜÜS	45
3.1.1 Mustamäe Koostootmisjaama andmed	45
3.1.2 Mudeli kontrollimine	46
3.1.3 Kütuse andmed	46
3.1.4 Suitsugaaside arvutus	47
3.1.5 Soojustagastuse arvutus puiduhakke näitel	51
3.1.6 Soojusvahetuse arvutus Mustamäe Koostootmisjaama suitsugaaside kondensaatori näitel	53
3.2 Mustamäe koostootmisjaama mõõtmistulemused	54
3.3 Kaugkütte tagasivoolu ja soojustagastuse sõltuvus	57
3.3.1 Soojustagastuse osakaal katla võimsusest	57

3.3.2 Primaarenergia säästupotentsiaal	58
3.3.3 Suitsugaaside kondensaatori kasutegur ja efektiivsus	59
3.4 Järeldused	62
KOKKUVÕTE	63
SUMMARY	65
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	67
LISAD	71

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema sõnastati lõputöö juhendaja Anna Volkova ja töö autori Kertu Lepiksaare ühisel algatusel. Teema on aktuaalne töhusa kaugkütte kontekstis.

Töö põhilised andmed, mida on kasutatud loodud arvutusmudeli kontrollimiseks, koguti Mustamäe Koostootmisjaamas ning sealjuures oli abiks AS Utilitas Tallinn tootmisjuht Vladislav Mašatin.

Töö raames on koostatud matemaatiline mudel, et hinnata kaugkütte tagasivoolu temperatuuri mõju suitsugaaside kondensaatori soojustagastusele ja efektiivsusele.

Koostatud mudel on üldine ning seda on võimalik rakendada erinevatel kütustel töötavatele katlamajadele ja koostootmisjaamadele ning selle abil on võimalik hinnata erineva konstruktsiooniga suitsugaaside kondensaatori efektiivsust ja kasutegurit.

Loodud mudel kirjeldab, millest sõltub suitsugaaside kondensaatori soojustagastuse suurus ning millised soojus- ja massileviprotsessid suitsugaaside kondensaatoris toimuvad. Mudeli kontrollarvutused on teostatud Mustamäe Koostootmisjaama andmete põhjal.

Loodud mudeli põhjal on võimalik hinnata kaugkütte tagasivoolu mõju suitsugaaside kondensaatori tööle.

Energiatõhusus, kaugküte, soojusvahetid, soojustagastus, suitsugaaside kondensaator

Tähiste loetelu

Δ	pinna karedus (m)
Δt_{kk}	kaugkütte vee temperatuuri muutus protsessi jooksul (K)
Δt_{log}	logaritmiline temperatuuride vahe (K)
Δt_{sg}	suitsugaaside temperatuuri muutus protsessi jooksul (K)
A	soojusvahetuspinna pindala (m ²)
b	kütusekulu (kg/s)
C	parandustegur
c''_{p,H_2O}	veeauru erisoojus jääval rõhul kondensaatorist väljuvate suitsugaaside temperatuuril [kJ/(kg·°C)]
$c''_{p,i}$	suitsugaaside komponendi i erisoojus jääval rõhul kondensaatorist väljumise temperatuuril t'' [kJ/(kg·°C)]
c'_{p,H_2O}	veeauru erisoojus jääval rõhul kondensaatorisse sisenevate (katlast väljuvate) suitsugaaside temperatuuril [kJ/(kg·°C)]
$c'_{p,i}$	suitsugaaside komponendi i erisoojus jääval rõhul kondensaatorisse sisenemise temperatuuril t' [kJ/(kg·°C)]
d_1	toruja soojusvahetuspinna välimine diameeter (m)
d_2	toruja soojusvahetuspinna sisemine diameeter (m)
d_k	iseloomustav diameeter, kui $h_1 > h_2$, siis $d_k = d_1$ ja vastupidi (m)
G	kondensaatorit läbiva kaugküttevee vooluhulk (kg/s)
g	raskuskiirendus (m/s ²)
Gr	vee Grashoffi arv
h_1	soojusülekanDETegur, mis kirjeldab soojuslevi kuumadelt suitsugaasidelt soojusvahetuspinnalet [kW/(m ² ·K)]
h_2	soojusülekanDETegur, mis kirjeldab soojuslevi soojusvahetuspinnalet kaugkütteveele [kW/(m ² ·K)]
h_D	soojusülekanDETegur, mis kirjeldab soojuslevi suitsugaasidelt kondensaadikihtile [kW/(m ² ·K)]
h_D	soojusülekanDETegur, mis kirjeldab soojuslevi suitsugaasidelt kondensaadikihtile [kW/(m ² ·K)]
h_k	soojusülekanDETegur, mis kirjeldab soojuslevi kondensaadikihtilt soojusvahetuspinnalet [kW/(m ² ·K)]
h_k	soojusülekanDETegur, mis kirjeldab soojuslevi kondensaadikihtilt soojusvahetuspinnalet [kW/(m ² ·K)]
h_{Nu}	soojusülekanDETegur, mis kirjeldab soojuslevi kuumade gaaside voolamisest läbi torukimbu [kW/(m ² ·K)]

j	kondensaadi juurdevool [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
k_{sg}	suitsugaaside soojusjuhtivustegur suitsugaaside keskmisel temperatuuril [$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
k_{vesi}	vee soojusjuhtivustegur vee keskmisel temperatuuril [$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
L	toru pikkus (m)
m''_{sg,H_2O}	veeauru kogus kondensaatorist väljuvates suitsugaasides 1 kg kütuse tarbimisaine kohta (kg/kg)
m'_{sg,H_2O}	veeauru kogus katlast väljuvates, kondensaatorisse sisenevates suitsugaasides (kg/kg)
$m_{Ar,pg}$	koos põlemisõhuga katlasse antav argooni kogus (kg/kg)
$m_{CO_2,pg}$	koos põlemisõhuga katlasse antav süsihappegaasi kogus (kg/kg)
$m_{H_2O,kütus}$	kütuse tarbimisaine niiskusesisaldus (kg/kg)
$m_{H_2O,pg}$	koos põlemisõhuga katlasse antav veeaur (kg/kg)
M_i	Aine i molaarmass, $M_C = 0,012 \text{ kg/mol}$, $M_{H_2} = 0,002 \text{ kg/mol}$, $M_{O_2} = 0,032 \text{ kg/mol}$, $M_{N_2} = 0,028 \text{ kg/mol}$
m_i	elemendi i osakaal kütuses (kg/kg)
$m_{i,kuiv}$	Elemendi i sisaldus kütuse kuivaines (kg/kg)
$m_{N_2,pg}$	koos põlemisõhuga katlasse antav lämmastiku kogus (kg/kg)
$m_{O_2,0}$	põlemiseks vajaliku hapniku mass (kg/kg)
$m_{O_2,pg}$	katlasse antav hapniku kogus (kg/kg)
$m_{O_2,sg}$	hapniku kogus katlast väljuvates suitsugaasides (kg/kg)
$m_{sg,kuiv}$	kuivade suitsugaaside kogus (kg/kg)
m_{tuhk}	kütuse tuha sisaldus (kg/kg)
n_1	astendaja vastavalt torude asetusele (koridoorne, malekorras)
n_i	Elemendi i ainehulk kütuses (mol/kg)
$n_{O_2,0}$	põlemiseks vajalik hapniku O_2 ainehulk (mol/kg)
Nu	kaugküttevee Nusselti arv
Nu_{sg}	suitsugaaside Nusselti arv
PES_{MWh}	Suitsugaaside kondensaatori kasutamisest tulenev primaarenergia sääst 1 MWh katlaga toodetud energia kohta
Pr_1	vee Prandtli arv temperatuuril t_2
Pr_2	vee Prandtli arv temperatuuril t''
Pr_{sg}	suitsugaaside Prandtli arv suitsugaaside keskmisel temperatuuril
$Pr_{t'}$	kondensaatorisse sisenevate suitsugaaside Prandtli arv
$Pr_{t''}$	kondensaatorist väljuvate suitsugaaside Prandtli arv
q	soojusvahetuspinna läbiv soojusvoog (kW/m^2)

Q_{H2O}	suitsugaaside latentne soojus (kW)
Q_{kaod}	suitsugaaside kondensaatori soojuskaod (kW)
Q_{katel}	katla võimsus (kW)
Q_{kuiv}	kuivade suitsugaaside jahtumisest vabanev soojus (kW)
Q_{NCV}	kütuse tarbimisaine alumine kütteväärtus (kJ/kg)
Q_{SGK}	suitsugaaside kondensaatori poolt tagastatud soojus (kW)
$Q_{SGK,max}$	suitsugaaside maksimaalne soojusvoog (kW)
r	veeauru kondensatsioonisoojus sisenevate suitsugaaside kastepunkti temperatuuril (kJ/kg)
R	soojusvahetuspinna termiline takistus [(m ² ·K)/kW]
Re	kaugküttevee Reynoldsi arv
Re_{sg}	suitsugaaside Reynoldsi arv
RH	suhteline õhuniiskus (<i>relative humidity</i>)
$r_{t''}$	veeauru kondensatsioonisoojus väljuvate suitsugaaside temperatuuril (kJ/kg)
s_1	torutelgede vertikaalne kaugus (m)
s_2	torutelgede horisontaalne kaugus (m)
t'	suitsugaaside temperatuur kondensaatorisse sisenedes (°C)
t''	kaugkütte tagasivoolu temperatuur (°C)
t_1	soojusvahetuspinna väline temperatuur (°C)
t_2	soojusvahetuspinna sisemine temperatuur (°C)
t_k	suitsugaaside kastepunkti temperatuur (°C)
v	voolu kiirus (m/s)
V_{God}	1 kg kuiva kütuse põlemisel tekkivate suitsugaaside ruumala DIN EN 12952-15 meetodi järgi (m ³ /kg)
x'	kondensaatorisse sisenevate suitsugaaside niiskusesisaldus (kg _{H2O} /kg _{kuivad gaasid})
x''	kondensaatorist väljuvate suitsugaaside niiskusesisaldus (kg _{H2O} /kg _{kuivad gaasid})
x_{H2O}	suitsugaaside niiskusesisaldus DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg _{H2O} /kg _{kuivad gaasid})
x_{H2OAd}	katlasse siseneva õhu niiskusesisaldus DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
y_{O2Ad}	hapniku osakaal põlemisõhus – 0,20938 m ³ /m ³
y_{O2d}	on liighapniku osakaal suitsugaasides DIN EN 12952-15 meetodi järgi (m ³ /m ³)

α	liigõhutegur
γ_{ash}	kütuse tuhasisaldus DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
ε	parandustegur voolu algosale, $\varepsilon \approx 1$
ε_n	parandustegur toruridade arvu arvestamiseks
ε_s	parandustegur torusammu arvestamiseks
ε_{SGK}	suitsugaaside kondensaatori efektiivsus
ε_ψ	parandustegur voolusuuna arvestamiseks
η_{SGK}	suitsugaaside kondensaatori kasutegur
μ_1	vee dünaamiline viskoossus temperatuuril t_2 (Pa·s)
μ_2	vee dünaamiline viskoossus temperatuuril t'' (Pa·s)
μ_A	katlasse sisenev niiske õhk DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
μ_{Ad}	katlasse sisenev kuiv õhk koos liigõhuga 1 kg kütuse kohta DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
μ_{Aod}	kuiva põlemisõhu kogus 1 kg kütuse kohta ilma liigõhuta DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
μ_{AS}	pihustunud auru kogus suitsugaasides 1 kg kütuse põlemisel DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
μ_G	Kuivade suitsugaaside kogus DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
v	tuha lenduvate osade sisaldus DIN EN 12952-15 meetodi järgi (kg/kg)
ν	vee kinemaatiline viskoossus keskmisel temperatuuril (m ² /s)
ξ	hüdrodünaamiline takistustegur
ρ_{nAd}	kuiva õhu tihedus DIN EN 12952-15 meetodi järgi– 1,2930 kg/m ³
ψ	nurk toru telje ja gaaside voolusuuna vahel

SISSEJUHATUS

Suitsugaaside kondensaatorit kasutatakse kahel eesmärgil – suitsugaaside puhastamine ja suitsugaaside soojuse tagastamine. Kuna kondensaatori jahutusvee, milleks on kaugkütte tagasivool, temperatuuri muutmine mõjutab peamiselt soojustagastuse poolt, siis on käesolevas töös keskendunud vaid soojustagastuse analüüsimisele ning suitsugaaside puhtuse analüüsimine on kõrvale jäetud, kuna jahutuse temperatuuri muutmine suitsugaaside puhastamise efektiivsust ei mõjuta.

Kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langus on võimalik mitmel viisil. Esimene võimalus on temperatuurigraafiku langetamine – see tähendab, et langeb nii pealevoolu kui tagasivoolu temperatuur. Temperatuurigraafiku muutmine eeldab, et selleks on valmis ka tarbijad, seega ei ole see variant tõenäoline realiseeruma lühemas perspektiivis kuna tarbijapoolsed muutused on seotud kaugkütet tarbivate hoonete valmidusega kasutada madalaid temperatuure. See eeldab muutusi tarbijate küttesüsteemides, näiteks eeldab madalatemperatuuriline kaugküte suuremat küttepinda – radiaatorkütte asemel peaks olema põrandaküte. Ka peaks paranema hoonete energiatõhusus. Sellist liiki muutused on väga pikaajalised ja nõuavad suuri investeeringuid [1].

Samas on pakub pealevoolu temperatuuri langetamine samuti eeliseid – näiteks on koostootmisjaamades madalama kaugkütte pealevoolu temperatuuri puhul võimalik toota rohkem elektrit. Vasturõhutaturbiinide puhul suureneb elektritoodang ja kondensatsiooniturbiinide puhul suureneb elektritootmise efektiivsus [2].

Tagasivoolu temperatuur langeb ka siis, kui võrku lisandub uusi tarbijaid ehk võrku antav võimsus kasvab. Samal ajal jäävad pealevoolu temperatuur ja võrgu vooluhulk samaks.

Käesolevas magistritöös koostatud mudeli puhul pole vahet millisel viisil on kaugkütte tagasivoolu temperatuur langenud.

Kaugkütte soojuskandja (vee) temperatuuride langetamine on oluline, et vähendada kaugküttevõrkude soojuskadusid ja tõsta kaugküttesüsteemi efektiivsust. Samuti võimaldavad madalamad temperatuurid kaugküttevõrgus mitmekesistada energiaallikaid ning integreerida võrku ka päikesekollektoreid, soojusenergiasalvesteid, geotermaalenergiat, erinevat liiki jääsoojust (näiteks serverite ja tööstuste). See kõik kuulub 4. põlvkonna kaugkütte kontseptsiooni, mille tõi esmakordselt välja H. Lund artiklis „*4.th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems*” (2014) [3].

Üleminekul 4. põlvkonna kaugküttele on Eesti puhul vajalik vähendada kaugküttevõrkude soojuskadusid, langetada soojuskandja temperatuure kaugküttevõrgus, suurendada taastuvenergia osakaalu kasutatud energiaallikates, suurendada võrgu toimimise paindlikkust ning tõsta energiatõhusust [1].

Energiatõhusus kaugkütte puhul on välja toodud ka Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiivis 2012/27/EL, milles käsitletakse energiatõhusust. Direktiivi kohaselt on energiatõhus kaugküte kaugküttesüsteem, mis kasutab vähemalt 50% taastuvenegiat, 50% heitsoojust, 75% koostoodetud soojust või 50% sellise energia ja soojuse kombinatsiooni [4].

Tõhusa kaugkütte levikut soodustab ka Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2010/31/EL hoonete energiatõhususe kohta, kus soodustatakse energiatõhusa kaugkütte kasutamist läbi paremate kaalumistegurite [5].

Biomassi ehk puiduhakke kasutamine kaugküttes ja koostootmises on keskkonnasõbralik ning kaugküttevõrgud, mille soojus toodetakse puiduhakkest on enamasti ka tõhusa kaugkütte märgisega kaugküttevõrgud [6].

Suitsugaaside kondensaator sobib hästi kokku kõrge niiskusesisaldusega kütusega, milleks on näiteks puiduhake. Suitsugaaside kondensaatorit kasutatakse ka maagaasikatelde puhul, näiteks Kristiine katlamaja. Kondensaator aitab tõsta katla kasutegurit läbi kütuse niiskuse aurustamiseks kulunud energia tagastamise läbi suitsugaaside niiskuse kondenseerimise. Madalama kaugkütte tagasivoolu puhul on võimalik rohkem suitsugaasides sisalduvat veeauru kondenseerida ning seeläbi suurendada soojustagastust.

Niiskus on kütuse puhul üldiselt soovimatu lisand, sest suurendab kütuse mahukaalu ning vähendab kütuse kütteväärtust massi järgi. See tähendab, et kütuse transportimiseks on vaja rohkem energiat kulutada. Samas on puiduhakke puhul oluline, et kütuse niiskusesisaldus ei oleks liiga madal, et vähendada kütuse isesüttivuse ohtu [7]. Puiduhakke puhul on kütuse niiskusesisaldus ka oluline, et hoida temperatuuri koldes madalamana. Liiga kuiva kütuse puhul võib temperatuur koldes tõusta liiga kõrgele ja see võib kahjustada katla konstruktsioone. Seega on oluline, et puiduhakke puhul oleks niiskusesisaldus optimaalne [7].

Käesolev magistr töö koosneb kolmest osast. Esimeses osas antakse ülevaade suitsugaaside töötlemise tehnoloogiast ja erinevat tüüpi suitsugaaside kondensaatoritest. Antakse ülevaade ka samas valdkonnas varasemalt tehtud uurimustest ning põhiprobleemidest ning arvutusmetoodikatest.

Töö teises osas kirjeldatakse kaugkütte tagasivoolu temperatuuri mõju analüüsimiseks koostatud matemaatilist mudelit. Koostatud matemaatiline mudel koosneb kahest osast – suitsugaaside koostise ja soojusvoo määramine ning kondensaatori soojusvahetusprotsesside arvutus soojusülekandevõrgurite leidmise kaudu.

Töö kolmandas osas võrreldakse mudeli poolt arvutatud tulemusi Mustamäe Koostootmisjaama suitsugaaside kondensaatori töö andmetega, teostatakse näidisarvutus keskmiste parameetrite põhjal ning analüüsitakse mudeli poolt arvutatud tulemusi.

1 SUITSUGAASIDE KONDENSAATORID

1.1 SUITSUGAASIDE TÖÖTLEMINE

Esimesena hakati täheldama õhusaastet kui probleemi 19. sajandi algul kui märgati, et kivisöega kütmisega kaasneb sudu [8]. Õhusaastet kui keskkonnaprobleemi hakati teadvustama kui tõsist keskkonnaprobleemi 1960. aastatel, mis andis ka põhjuse tehaste ja jõujaamade suitsugaaside puhastussüsteemide arendamiseks. Samal ajal jõudsid avalikkuse huviorbiiti ka mitmed muud keskkonnaprobleemid nagu keskkonna hapestumine, metsade hävimine ja muutused veekogudes. Uuringud näitasid, et probleemide põhjuseks on väävli- ja lämmastikuühendid, mis võivad kanduda õhuvoogudega ka sadade kilomeetrite kaugusele saasteallikast [9]. Seetõttu 1979. kutsuti kokku piiriülese õhusaaste kauglevi käsitlev Genfi konventsioon, mis jõustus 1983. aastal. Konventsioon toob välja õhusaaste jälgimise ja ohjamise vajalikkuse ning manitseb riike võtma vastu meetmeid, õhusaaste piiramiseks [9]. Lepiti kokku, et töötatakse välja õhusaasteainete (esialgu vääveldioksiidi, edaspidi võimalusel ka teiste saasteainete) seire ja hindamise ulatuslik programm. Konventsiooni käigus välja töötatud protokollide sisust tuleb välja, et peamisteks jälgitavateks saasteaineteks on väävli- ja lämmastiku oksiidid (SO_x ja NO_x), lenduvad orgaanilised ühendid ning osoonireostus [9]. Suitsugaaside pesur suudab suitsugaasides oluliselt vähendada happeliste oksiidide – SO_x ja NO_x sisaldust, kuna reageerides absorberiga moodustuvad soolad, mis sadenevad ning eemaldatakse seejärel kondensaatorist [8].

Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu nõukogu on vastu võtnud kaks õhusaastet puudutavat direktiivi:

- Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv (EL) 2015/2193, keskmise võimsusega põletusseadmetest õhku eralduvate teatavate saasteainete heite piiramise kohta [10];
- Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv (EL) 2016/2284, mis käsitleb teatavate õhusaasteainete riiklike heitkoguste vähendamist [11].

1.1.1 Suitsugaaside töötlemise tehnoloogiad

Suitsugaaside pesur on suurepärane tehnoloogia tööstuses kasutamiseks, et vähendada õhuemissioonides nimetatud saasteainete hulka ning katelde puhul ka tõsta nende energeetilist efektiivsust.

Suitsugaasides sisalduvad saasteained võib liigitada tahketeks ja gaasilisteks. Enamasti on tahkete saasteainete puhul tegemist aluseliste või neutraalsete osakestega nagu tuhk ja tahm. Gaasilised saasteained on enamasti happelised – SO_2 , NO_x ja lenduvad orgaanilised ühendid (*VOC – volatile organic compounds*) on kõige enam levinud

gaasilised õhu saasteained. Suitsugaaside koostis ja saasteainete sisaldus sõltub põletatava kütuse koostisest ja selle põletamise viisist [12].

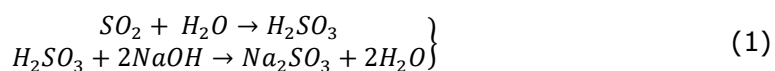
Lisaks suitsugaaside pesurile on suitsugaaside töötlemisel kasutusel ka teisi erinevaid tehnoloogiaid. Põletusseadmete puhul võib lisaks suitsugaaside pesurile välja tuua järgmised osakeste eraldamise tehnoloogiad – gravitatsiooniline osakeste eraldamine, inertsiaalne eraldamine ehk tsüklonid, elektrostaatiline sadestaja ehk elektrifilter ja erinevad kangasfiltrid nagu kottfilter ja käisfilter. Mainitud tehnoloogiaid kasutatakse suitsugaasidest tahkete osakeste eemaldamiseks [12].

Gaasiliste saasteainete eemaldamine suitsugaasidest on võimalik järgmistel meetoditel [12]:

- Absorptsioon;
- Adsorptsioon;
- Kondensatsioon;
- Põletus;
- Biofiltratsioon.

Suitsugaaside kondensaatori puhul on kasutusel absorptsioon ja kondensatsioon [12]. Katlast väljuvad suitsugaasid on enamasti happelised sisaldades vähemal või rohkemal määral erinevaid happelisi oksiide. Kuna enamasti suitsugaasides sisalduvad gaasilised saasteained on vees lahustuvad, siis on võimalik vedela absorbendina kasutada vett. Et oleks lihtsam saastet eemaldada, siis lisatakse veele keemilisi lisandeid, mis moodustavad happeliste osktsiididega tahkeid sooli, mis sadenevad ja seeläbi on võimalik saaste kondensaatorist eemaldada [12]. Tänu tahkete soolade moodustumisele ei lendu happelised osktsiidid ning on võimalik vältida õhusaastet. Selle protsessi jooksul saab õhusaastest veesaaste, mis nõuab edasist tegelemist [12].

Vastavalt suitsugaaside koostisele ja kasutatavale neutraliseerivale ühendile tekivad soolad. Enamasti kasutatakse neutraliseeriva vahendina NaOH, mis reageerides happeliste oksiididega moodustab erinevaid naatriumi-sooli ja vett või naatriumisoolade hüdraate [13]. Väevlioksiidide neutraliseerimise reaktsioonivõrrandid on toodud valemisüsteemis 1.



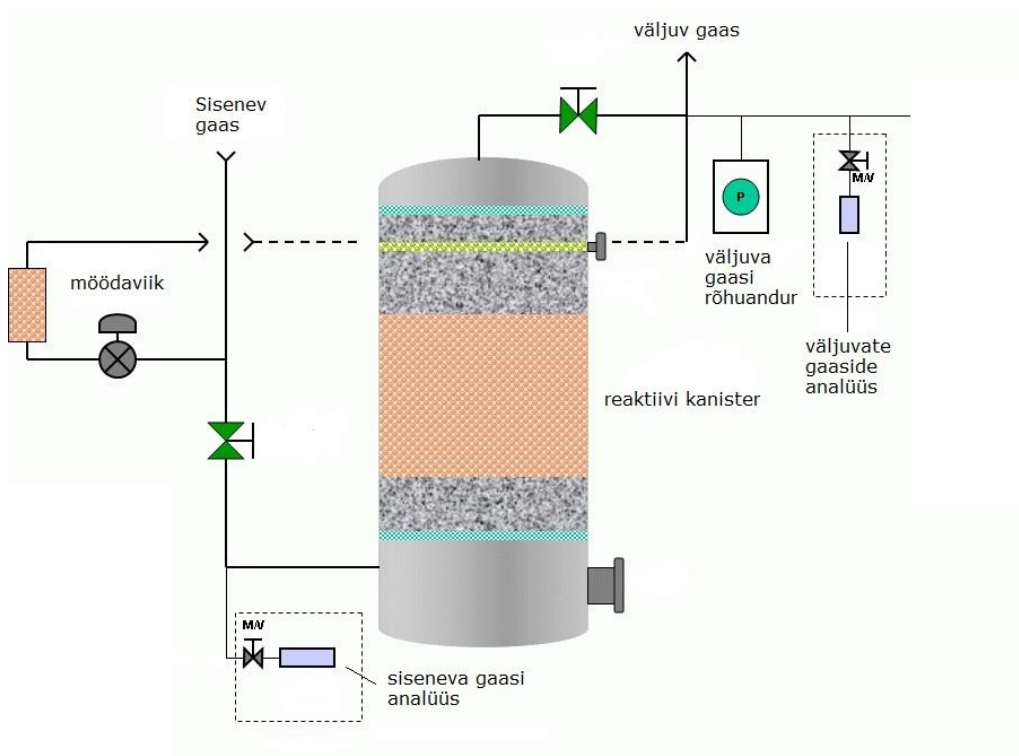
1.2 ERINEVAT TÜÜPI SUITSUGAASIDE KONDENSAATORID JA PESURID

Suitsugaaside kondensaatorite puhul kasutatakse tihti ka termineid suitsugaaside pesur ja inglise keelset terminit *scrubber* ehk skraber. Termin „pesur“ kehtib pigem seadme kohta, mille põhiülesanne on eemaldada suitsugaasist saasteained – väävlioksiidid ja peenosakesed.

Järgnevalt on kirjeldatud erinevat liiki suitsugaaside pesureid ja kondensaatoreid.

1.2.1 Kuiv suitsugaaside pesur

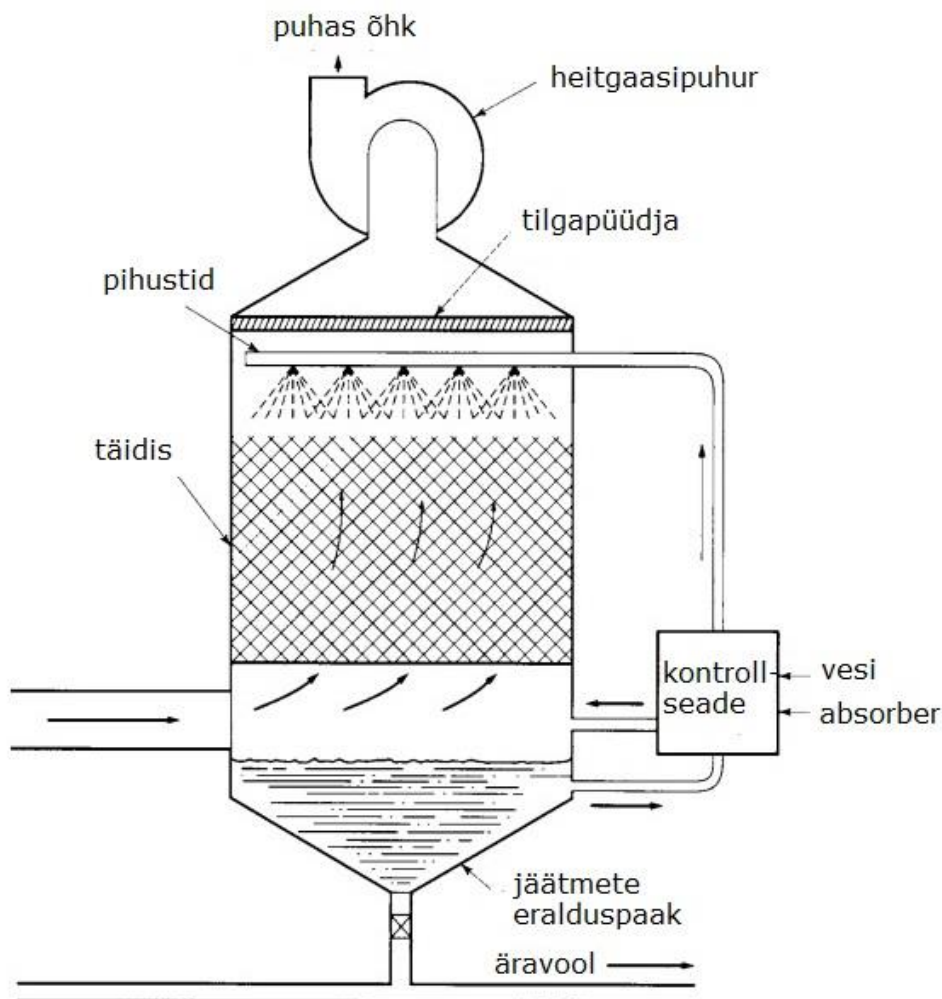
Kuiva suitsugaaside pesurit (joonis 1) kasutatakse vaid suitsugaaside puhastamiseks, soojustagastust suitsugaaside kondensaatori läbimisega ei kaasne. Kuivad pesurid eemaldavad gaasidest happelised koostisosad nagu väävli oksiidid. Suitsugaasidesse pihustatakse kuivi reaktiive eemaldamiseks või neutraliseerimaks kahjulikke saasteaineid. Kuivades suitsugaaside pesurites gaasid kõigepealt jahutatakse, seejärel pihustatakse reaktiividega ning peale seda gaas filtreeritakse. Kuivade suitsugaaside pesurite eelis märgade ees on väiksemad jäätmete mahud. Kasutatud reaktiivid on võimalik taastöödelda ja taaskasutada [14].



Joonis 1. Kuiv suitsugaaside pesur [15]

1.2.2 Märg suitsugaaside pesur

Märja suitsugaaside pesuri (joonis 2) puhul on tegemist kõige levinuma suitsugaaside pesuri tüübiga, kus lisaks suitsugaaside puhastamisele on võimalik tagastada ka suitsugaaside jääsoojus, kuna gaasides sisalduv niiskus kondenseeritakse [16]. Võrreldes kuiva suitsugaaside pesuriga peab märg suitsugaaside pesur olema oluliselt korrosioonikindlam [12].

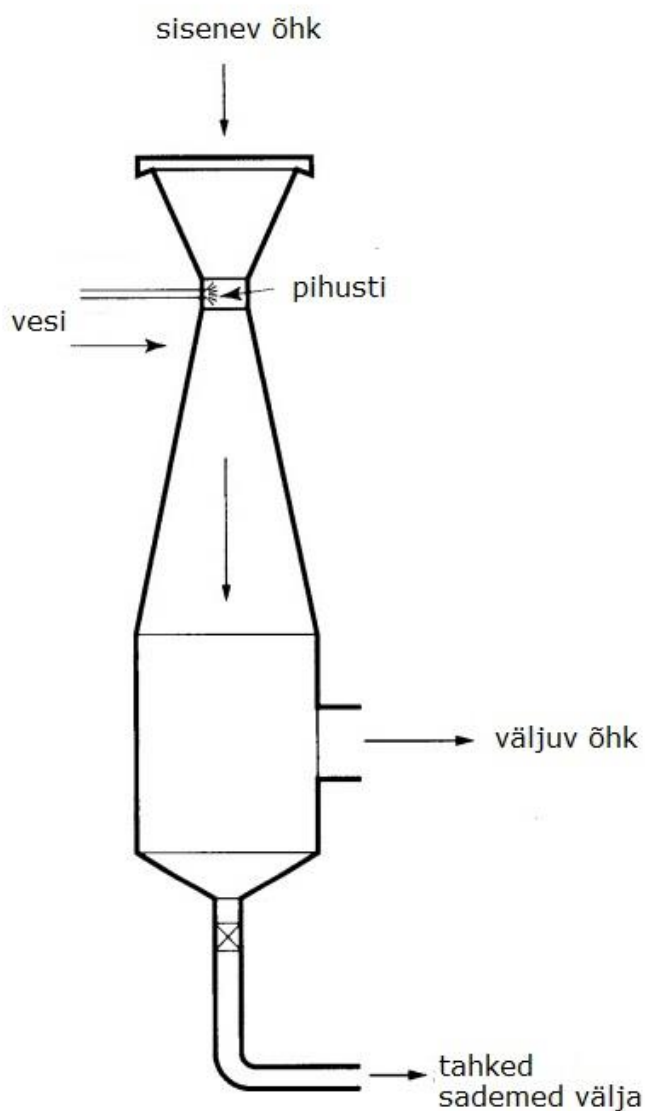


Joonis 2. Märg suitsugaaside pesur [12]

Oluliseks märja suitsugaaside pesuri komponendiks on kondensaatori tornis paiknev täidis, millest voolab läbi puhastamist vajav suitsugaaside voog. Täidis paigutatakse pesurisse, et suurendada jahutusvedeliku ja gaaside kokkupuutepinda. Täidise valiku puhul on olulisteks kriteeriumideks täidise korrosioonikindlus ja hind [16]. Täidise asemel võib olla ka muu soojusvahetuspind, näiteks integreeritud soojusvahetussüsteemina torud kaugkütteveega. Kui tegemist on täidisega märja suitsugaaside pesuriga, siis on vajalik ka eraldi soojusvaheti soojustagastuse jaoks.

1.2.3 Venturi pesur

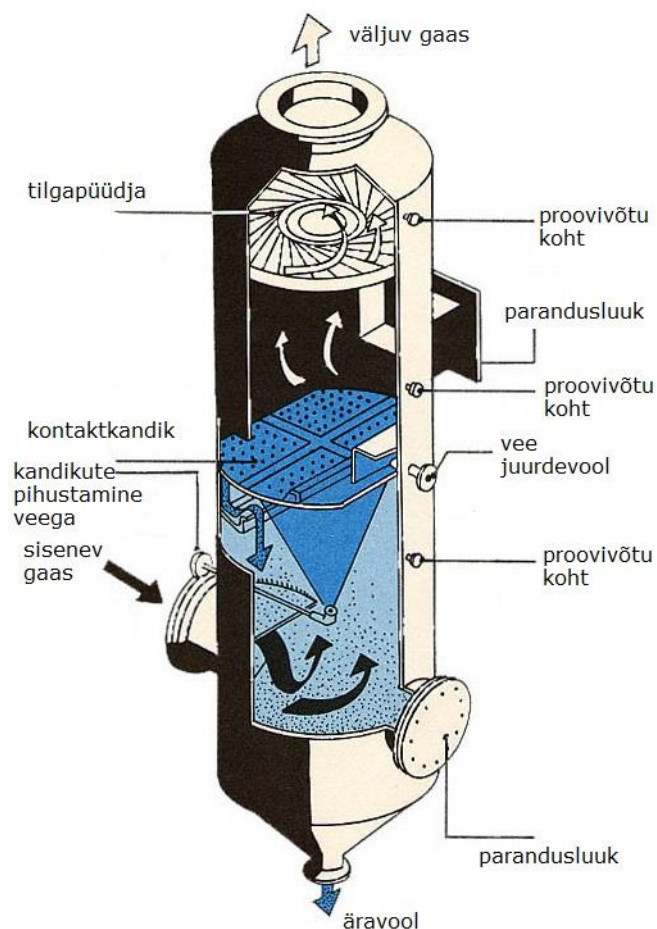
Venturi pesur (joonis 3) on mõeldud vaid tahkete osakeste eemaldamiseks. Venturi pesuris siseneb õhk ahendusega torusse, kus toru kõris (kitsamas kohas) paiknevad vee pihustid. Osakeste eemaldamise protsess on järgmine: saastunud gaas siseneb Venturi pesurisse ning kuna kõris on toru diameeter väiksem, siis gaasivool kiireneb. Kuna gaasivool on väga kiire, siis aitab see kõrisse pihustatud veel pihustuda väga paljudeks väikesteks piiskadeks ja seeläbi tekitada suurema veepiisa ja õhu kokkupuute pinna. Õhus sisalduvad saasteained absorbeeruvad gaasi pihustatud piiskadesse ja eemaldatakse seeläbi gaasist. Saastunud vesi sadeneb välja, puhastatud gaasid puhutakse pesurist välja. Venturi pesuri eeliseks on väikesed kulud – nii investeeringutena kui ka töös hoidmise kulude mõistes [12].



Joonis 3. Venturi pesur [12]

1.2.4 Kandikutega pesur

Kandikutega pesuri (joonis 4) puhul on tegemist Venturi pesuri edasiarendusega, mis suudab puhastada suitsugaase ulatuslikumalt kui Venturi pesur. Saastunud gaas juhatakse läbi avade või otsikute pesuri veega (või pesuri lahusega) kaetud kandikule, vedelik hakkab mullitama suurendades seeläbi gaasi ja puhastava vedeliku kokkupuutepinda [12].



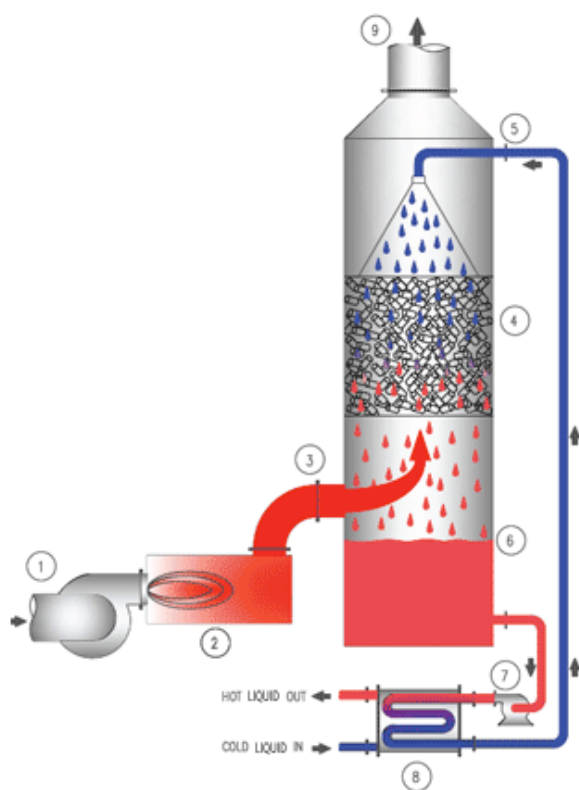
Joonis 4. Kandikutega pesur [17]

1.3 SUITSUGAASIDE SOOJUSE TAGASTAMINE

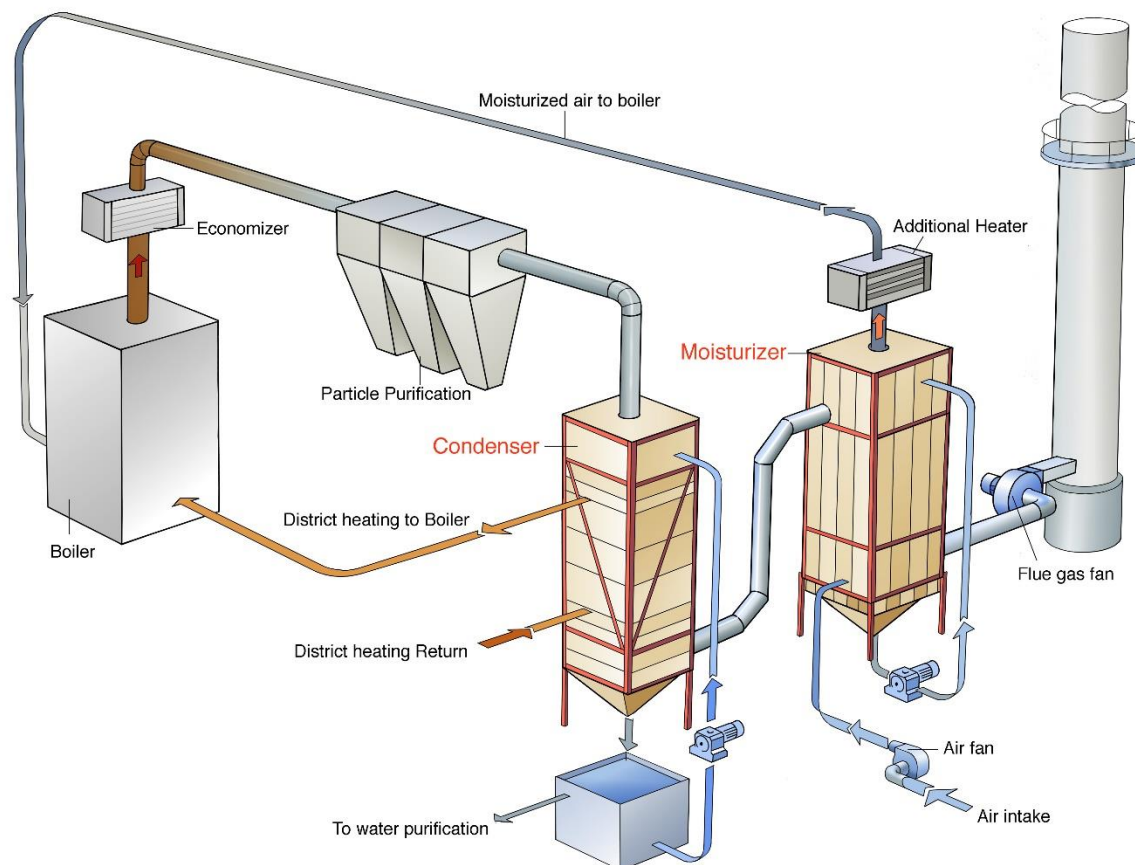
1.3.1 Suitsugaaside kondensaator kui soojusvaheti

Suitsugaaside soojuse tagastamine on võimalik märja suitsugaaside pesuri puhul (punkt 1.2.2). Suitsugaaside kondensaatoritel mitmeid erinevaid tootjaid, kellest võib tööstuslikus mastaabis välja tuua järgmised: Babcock & Wilcox Vølund AB, IS SaveEnergy AG, Thermeta Service BV ja Scheuch GmbH. Viimase toodetud suitsugaaside kondensaator on näiteks Mustamäe Koostootmisjaamas, mille andmeid on kasutatud käesolevas töös kirjeldatud mudeli tõepärasuse kinnitamiseks.

Kuna katlast väljuvad gaasid on küllaltki soojad ning niiskete kütuste põletamisel on suitsugaasides küllaldaselt ka veeauru, siis on suitsugaaside näol tegemist arvestatava jääksoojuse allikaga, mida on suitsugaaside kondensaatori abiga võimalik ära kasutada. Kui soovitakse suitsugaaside soojust kasulikult, peab olema süsteemi integreeritud ka soojusvaheti. See võib olla eraldiseisev (joonis 5) – soojusvahetus toimub vaid kondensaatori vee ja kaugkütte vee vahel või kondensaatori sisene (joonis 6) – kaugküttevesi ringleb läbi torustiku kondensaatori, kus soojusvahetus toimub läbi torupinna kondensaatoris olevate suitsugaaside ja kondensaatorivee ning torudes ringleva kaugküttevee vahel [18].



Joonis 5. Suitsugaaside kondensaator välise soojusvahetiga [19]



Joonis 6. Kondensaatorisese soojusvahetiga suitsugaaside kondensaator [20]

Soojustagastuse leidmiseks tuleb teostada kondensaatori soojusvahetuse arvutus, kus ülesandeks on leida soojusvoog, mis läheb kondensaatori keskkonnalt (suitsugaas ja kondensaatori vesi) kaugkütteveele.

Et soojusvoog läbi soojusvahetuspinda on alati ühesuunaline, siis võib öelda, et suitsugaaside kondensaatori näol on tegemist rekuperatiivse soojusvahetiga [21].

Esineb ka kondensaatorite mudeleid, mis suudavad madala niiskusega suitsugaaside puhul toimida õhu eelsoojendina ehk ökonomaiserina [22]. Samuti on olemas ka suitsugaaside kondensaatoreid, mis on samal ajal ka õhu eelsoojendid, kuna esmalt suunatakse kuumad suitsugaasid õhu eelsoojendi osasse, kus kondenseerumist ei toimu ning kasutatakse ära vaid kuivade gaaside jahtumissoojus soojendades sellega põlemisõhku. Teises astmes suunatakse jahutatud suitsugaas madalama temperatuuriga osasse, kus seda jahutatakse kaugkütte tagasivoolu veega ja toimub veeauru kondenseerumine, mis tähendab peamist soojuse eraldumist [22].

Suitsugaaside kondensaatoris kasutatavad küttepinde materjalid võivad samuti varieeruda – kasutatakse metalle, nagu näiteks alumiinium [23], kui ka klaasiga tugevdatud plastikut [24]. Materjali puhul on olulised omadused hea soojusjuhtivus ja korrosioonikindlus.

1.3.2 Erinevad soojustagastusega seotud uurimisküsimused

Soojustagastuse arvutamiseks on olemas erinevaid meetodikaid. D. Blumberga ja E. Vigants on oma teadustöö raames teostanud eksperimente olemasoleva seadme kontrollarvutuseks, kus vaadeldakse kahe soojusvahetusprotsessiga suitsugaaside kondensaatori süsteemi ning vaadeldavas protsessis on kasutatud kütusena puiduhaket [25]. Vaadeldud eksperiment on jagatud mainitud teadusartiklis kolmeks osaks:

- Kütuse põlemise ja katlaküttepindade soojusvahetuse efektiivsuse arvutus – mõõdetakse gaaside temperatuure;
- Kondensaatorit läbivate voogude sisend- ja väljud parameetrite (temperatuur, kogused) mõõtmine;
- Kaugkütte ja kondensaatori soojusvaheti temperatuuride mõõtmine ja efektiivsuse arvutus.

Soojusvahetuse protsesse suitsugaaside kondensaatoris on kirjeldatud erinevates teadusartiklites [26], [16]. Soojusvahetusprotsesse malekorras torudega suitsugaaside kondensaatorile on analüüsinud numbrilisel meetodil C. X. Lin „*Numerical modelling and simulation of condensation heat transfer of a bundle of transport membrane tubes*” ning töös on järeldatud, et suurem soojustagastus on võimalik saavutada kui gaaside voolamisrežiim on laminaarsem (madalamate Reynoldsi arvude korral) ehk gaaside kiirus on väiksem [26]. Kaheastmelist suitsugaaside kondenseerimist on analüüsinud I. Veidenbergs töös „*Heat and Mass Transfer Processes in Scrubber of Flue Gas Heat Recovery Device*”, kus esimesel astmel pihustatakse kuumadesse suitsugaasidesse vett – kõrge temperatuuri tõttu pihustunud vesi aurustub ning gaaside niiskusesisaldus tõuseb. Teisel astmel suunati niisutatud suitsugaas läbi täidisega kondensaatoritorni, kus toimub gaasides oleva niiskuse kondenseerimine [16].

Suitsugaaside kondensaatori parima töörežiimi leidmiseks on tehtud eksperimente on kirjeldatud V. Priedniece teadusartiklis „*Experimental and analytical study of the flue gas condenser - Fog unit*”, kus uuritakse parimaid lahendusi väikekatelde suitsugaaside soojuse kasutamiseks [27].

Erinevaid meetodeid koostootmisjaamas tekkiva jääksoojuse kasutamiseks on kirjeldatud ka A. Vannoni artiklis „*Heat recovery from Combined Cycle Power Plants for Heat Pumps*”, kus on vaadeldud suitsugaaside kondensaatori kombineerimist soojuspumbaga [28].

Võrdlus teoreetiliste ja praktiliste andmete erinevustega on käsitletud T. Prodanuks artiklis „*Comparison of theoretical and practical energy efficiency values in indirect contact gas condensing unit*” ning on järeldatud, et kondensaatori võimsust ei saa hinnata vaid soojuskandjate temperatuuride järgi [29].

Metoodika suitsugaaside kondensaatori projekteerimiseks koos majandusarvutustega on toodud M. Terhani artiklis „*Design and economic analysis of a flue gas condenser to*

recover latent heat from exhaust flue gas", kus on kirjeldatud üksikasjalikult kondensaatori soojusvahetuse arvutust ning toodud juhised kindla võimsusega katlale lühima tasuvusajaga kondensaatori projekteerimist [18].

Suitsugaaside kondensaatoriga puiduhakke katlamaja kulutõhusust on hinnanud G. Vigants oma artiklis „*Cost Analysis of a Wood Chip Boiler House with a Gas Condenser*“, kus on järeldatud, et on kulutõhususe poolest võiks lasta suitsugaaside kondensaatoril töötada ka madalatel koormustel, selle asemel, et seda madalate koormuste puhul välja lülitada, kuna kondensaatori töös hoidmise kulud on suhteliselt madalad [30].

Aardla katlamaja suitsugaaside kondensaatori efektiivsusnäitajate kohta on Vitali Feditsenkov Eesti Maaülikoolist 2014 aastal kirjutanud magistritöö [31] ning kirjeldanud Aardla katlamaja suitsugaaside kondensaatori ja kogu katlamaja efektiivsuse arvutust koos tasuvusarvutusega.

1.4 Installeeritud suitsugaaside kondensaatorid Eestis

Eestis on suitsugaaside kondensaatoreid installeeritud peamiselt katlamajadele. Paljude suitsugaaside kondensaatorite paigaldamise puhul on kasutatud Keskkonna Investeeringute Keskuse poolt makstavaid toetusmeetmeid.

Näiteid Eestis paigaldatud suitsugaaside kondensaatoritest on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Näiteid Eestis paigaldatud suitsugaaside kondensaatoritest

Katlamaja	operaator	Paigaldamise aasta	Kondensaatori võimsus	Kasutatav kütus
Kristiine katlamaja	Utilitas AS	2019	10 MW	Maagaas
Mustamäe Koostootmisjaam	Utilitas AS	2019	9 MW	puiduhake
Tallinna Elektriijaam 1	Utilitas AS	2009	11 MW	puiduhake
Tallinna Elektriijaam 2	Utilitas AS	2016	16 MW	puiduhake
Keila katlamaja	Utilitas AS	2016	1 MW	puiduhake
Haapsalu katlamaja	Utilitas AS	2017	1 MW	puiduhake
Aardla katlamaja	AS Fortum Tartu	2009	3,85 MW	puiduhake
Pärnu Koostootmisjaam	AS Fortum Eesti	2010	10 MW	puiduhake
Võrusoo katlamaja	Danpower Eesti AS	2018	3 MW	puiduhake
Kuressaare Koostootmisjaam	AS Kuressaare Soojus	2013	3 MW	puiduhake
Valga katlamaja	Utilitas AS	2016	1,7 MW	puiduhake
Jõgeva katlamaja	Utilitas AS	2019	1 MW	puiduhake
Rapla katlamaja	Utilitas AS	2016	1 MW	puiduhake

2 SUITSUGAASIDE KONDENSAATORI SOOJUSTAGASTUSE ARVUTUSMUDEL

Kuna suitsugaaside kondensaatori soojustagastuse suurust mõjutavad ühelt poolt suitsugaasides olev soojus ja teisalt SGK konstruktsioonist tingitud soojusvahetusprotsessid.

Vajalikud sisendandmed on järgmised:

- Kasutatav kütus ja selle kuivaine koostis;
- Kütuse ülemine kütteväärtus;
- Katla liigõhutegur;
- Suitsugaaside kondensaatori konstruktsioon;
- Soojusvahetuspindade materjal;
- Kaugkütte vooluhulk;
- Põlemisõhu koostis ja suhteline õhuniiskus.

Lisaks on olulised järgmised mõõdetavad parameetrid:

- Kütuse tarbimisaine niiskusesisaldus;
- Katla võimsus;
- Katlast väljuvate suitsugaaside temperatuur;
- Kaugkütte tagasivoolu temperatuur.

Arvutusmudeli skeem on toodud lisas 1 ja vaadeldud süsteemi skeem on toodud joonisel 7. Arvutusmudeli põhjal koostatud tabelarvutusprogramm (Exceli fail) on esitatud lisana 2.

Käesolevas töös kirjeldatav metoodika sobib nii olemasoleva katla võimaliku tagastatava soojushulga hindamiseks ehk sobiva kondensaatori projekteerimiseks kui olemasoleva kondensaatori kontrollarvutusteks.

Projekteerimisarvutuse ja kontrollarvutuse puhul on mõningad erinevused. Projekteerimise puhul leitakse kõigepealt etteantud temperatuuride ja kütuse abil võimalik kondenseeritava soojushulga suurus, mis oleks vajaliku kondensaatori võimsus. Seejärel kui võimsus on teada on võimalik konstrueerida vajalik küttepindade suurus ja konstruktsioon.

Kontrollarvutuse puhul tuleb leida nii kondenseeritav soojushulk ning teisalt teostada ka olemasolevate soojusvahetupindade parameetrite alusel soojusvaheti arvutus.

Kontrollarvutuse puhul saab määrata:

- Kas soojusvahetuspind ja kondensaatori võimsus on piisav?
- Kas soojuskandjate voolamisrežiimid on sobilikud?

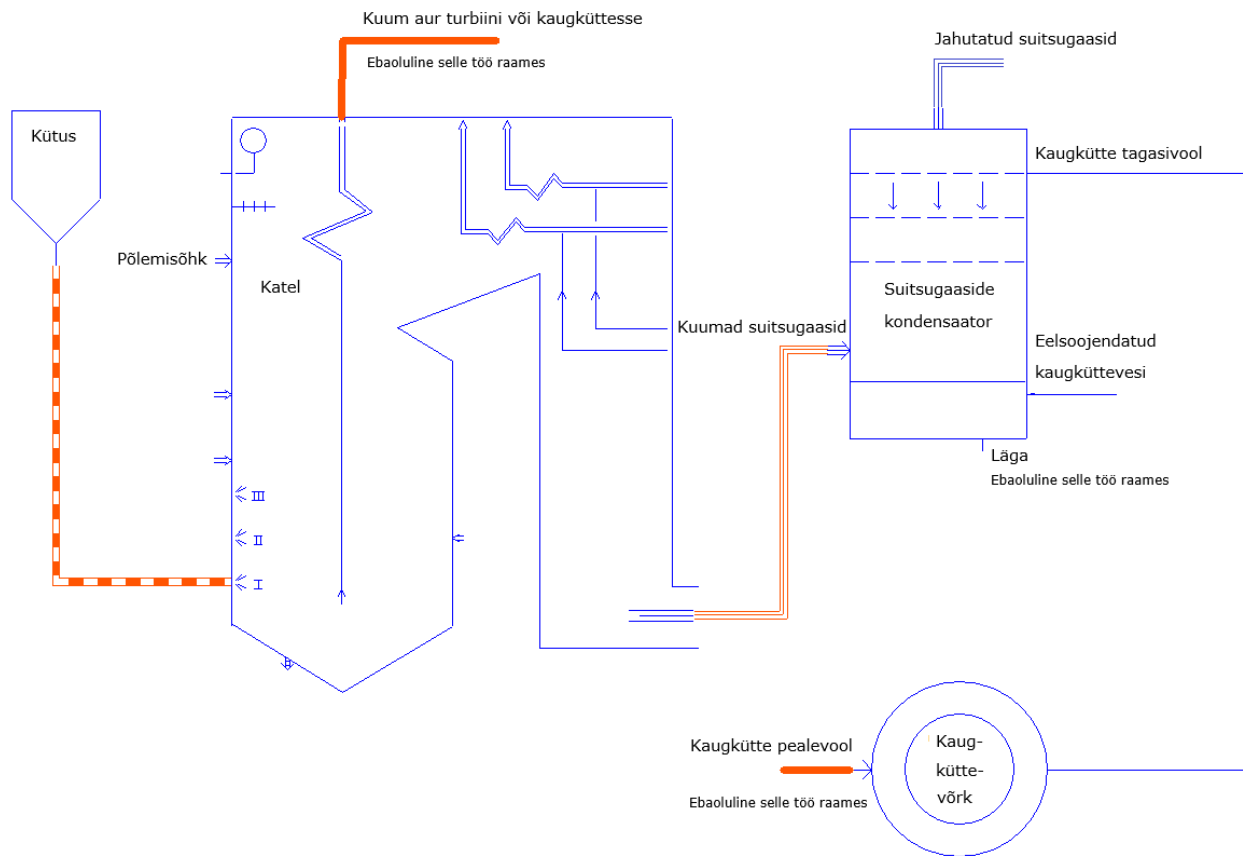
Suitsugaaside kondensaatori soojustagastuse arvutuse võib jagada üldjoontes kaheks:

1. Suitsugaasides oleva maksimaalse tagastatava soojushulga arvutus;

1.1. Suitsugaaside arvutus – DIN-EN 12952-15 või stõhhiomeetriline meetod

1.2. Soojusvoo arvutus

2. Suitsugaaside kondensaatori soojusvahetusprotsesside arvutus.



Kütuse parameetrid

Q_{NCV} – arvutuslik
 Q_{GCV}^*
 $m_{H_2O, kütus}$ – mõõdetav
 kütuse kuivaine koostis *
 kütuse tarbimisaine koostis - arvutuslik

Põlemisõhu parameetrid

Põlemisõhu koostis *
 Suhteline õhuniiskus *
 $m_{O_2, pg}$ – arvutuslik
 a^*

Katla parameetrid

Q – mõõdetav
 b – arvutuslik

Kuumade suitsugaaside parameetrid

Suitsugaaside koostis – arvutuslik
 t' – mõõdetav
 m'_{sg, H_2O} – arvutuslik
 $m_{sg, kuiv}$ – arvutuslik

* muutumatud sisendandmed

Suitsugaaside kondensaatori parameetrid

Suitsugaaside kondensaatori konstruktsioon *
 $Q_{SGK, max}$ – arvutuslik
 Q_{SGK} – arvutuslik, mõõdetav
 η_{SGK} – arvutuslik
 h – arvutuslik
 k^*
 Re – arvutuslik
 Nu – arvutuslik
 q – arvutuslik

Jahutatud suitsugaaside parameetrid

Suitsugaaside koostis - arvutuslik
 t'' – mõõdetav
 m''_{sg, H_2O} – arvutuslik
 $m_{sg, kuiv}$ – arvutuslik

Kaugküttevee parameetrid

G^*
 t'' – mõõdetav
 $t'' + \Delta t_{ikk}$ – arvutuslik

Joonis 7. Töö raames vaadeldud süsteemi skeem

2.1 SUITSUGAASIDE KOOSTISE MÄÄRAMINE

2.1.1 Vajalikud lisaandmed suitsugaaside koostise määramiseks

Olenemata sellest kas suitsugaaside koguse ja koostise määramiseks kasutatakse DIN-EN 12952-15 kirjeldatud meetodit või stõhhiomeetrilist meetodit, siis on vaja teada arvutuse läbiviimiseks algandmeid. Selles punktis on toodud vastavad vajalikud algandmed suitsugaaside arvutuse jaoks.

Kõige tähtsam on teada kütuse analüütilist koostist. Järgevalt on toodud tabelis 2 Eestis enam kasutusel olevate tahkekütuste kuivainete ja maagaasi analüütiline koostis massiprotsentides (m%). Tabelis 2 toodud tahkekütuste (puiduhake, turvas, põlevkivi, kivisüsi) andmete puhul on kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi katselaboris mõõdetud kütuseproovide keskmisi väärtusi, vaadeldud andmed on mõõdetud aastatel 2017 – 2019. Maagaasi andmete puhul on kasutatud allikas [21] toodud andmeid.

Tabel 2. Enamlevinud tahkekütuste kuivainete ja maagaasi elementkoostised

Kütuse liik	C, m%	H, m%	N, m%	S, m%	O, m%	Tuhk, m%	Sisemine niiskus, m%
Puiduhake	49,56	6,50	0,17	0,02	43,16	0,6	3,16
Turvas	54,58	5,78	3,46	0,25	27,53	4,8	3,6
Põlevkivi	24,64	2,24	0,08	0,71	19,54	52,09	0,7
Kivisüsi	73,20	4,70	0,90	0,90	9,10	11,00	0,2
Maagaas	73,80	24,40	1,70	0	0,10	0	0

Tuha koostises on kõik kütuses leiduvad mikroelemendid – valdavalt metallioksiidid. Eestis levinumalt kasutusel olevates tahkekütustes – puiduhake, turvas ja põlevkivi – on tuha põhiliseks koostisosaks CaO, mis annab tuhale aluselised omadused [21]. Selle põhjuseks võib pidada seda, et Eesti aluspinna kivimiks on valdavalt lubjakivi.

Lisaks ülaltoodule on kütuses alati niiskus. Kütuse niiskus jaguneb sisemiseks ja välimiseks niiskuseks. Sisemine niiskus on kütuses sisalduv kristallvesi ja kolloidne niiskus, mis on seotud kütuse orgaanilise ainega. Kristallvesi eraldub kütuse kuumutamisel üle 500 °C, kolloidse niiskuse eemaldamiseks piisab kuumutamisest üle 100 °C [21]. Kütuse sisemise niiskuse puhul on tegemist üsnagi stabiilse suurusega ning

see on samuti toodud tabelis 2. Kütuse välimine niiskus ehk mehaaniline niiskus on tavaliselt kütuse pinnal, poorides ja kapillaarides ning harilikult eemaldub see õhus kuivades [21]. Kütuse välimine niiskus eemaldub kütusest kuni saavutab välise õhuga niiskuse suhtes tasakaaluoleku. Kütuse tarbimisaine niiskusesisaldus ehk välimine niiskus on varieeruv suurus.

Lisaks kütuse koostisele mõjutab suitsugaaside koostist ja kogust ka põlemisõhk ja liigõhutegur. Liigõhutegur kirjeldab mitmekordne stöhhiomeetriline hapnikukogus antakse katlasse. Oluline on ka katlasse antava õhu koostis ja selle suhteline õhuniiskus ning niiskusesisaldus [32].

Täpsema info puudumisel võib arvestada, et tavatingimustel, 20 °C juures suhtelise õhuniiskuse RH (*Relative humidity*) = 50 % on veeauru kogus õhus 0,00726 kg_{H₂O}/kg_{kuiv õhk}. Harilik õhu koostis massi järgi on toodud tabelis 3.

Tabel 3. Õhu koostis massi järgi

Koostisosa	Sisaldus 1 kg kuivas õhus, kg	Sisaldus 1 kg niiskes õhus, kg
Hapnik O ₂	0,231	0,229
Lämmastik N ₂	0,755	0,750
Argoon Ar	0,0129	0,0128
Süsihappegaas CO ₂	0,00046	0,00046
Veeaur	0	0,00726

2.1.2 Suitsugaaside koostise määramine DIN EN 12952-15 järgi

Euroopa standard DIN EN 12952-15 kirjeldab torujate küttepindadega veekatelde ja nendega kaasnevate seadmete vastuvõtukatseid [33]. Vastuvõtukatsete teostamisel vaadeldakse katla töökindlust ja koostatakse katla soojuslik bilanss ja määratakse efektiivsus ehk kasutegur. Soojusliku bilansi puhul peab kütusega katlasse antud energiahulk võrduma katlast saadava kasuliku soojuse ja soojuslike kadude summaga. Kütusega katlasse antud energia määratakse kütuse omaduste ja kütusekulu järgi. Väljuvate suitsugaasidega kaasnev soojuskadu on üks suurematest soojuskadudest katla bilansis, moodustades katla bilansist kuni 10% [21]. Väljuvate suitsugaasidega kaasnev soojuskadu leitakse standardi kohaselt väljuvate suitsugaaside entalpia kaudu [33].

Standardis DIN EN 12952-15 toodud meetodid võimaldavad hinnata nii suitsugaaside keemilist koostist kui ka niiskusesisaldust. [33] Standardis toodud meetodi eeliseks on selle lihtne rakendatavus suitsugaase kirjeldavate parameetrite leidmiseks. Puudustena võib välja tuua standardi lakoonilised seletused. Näiteks standardi valemite 8.3-58 kuni 8.3-62 on kasutusel numbrilised konstandid, mille päritolu ei ole selgitatud. Lisaks puuduvad selgitused tähistele μ_A ja y_{O_2d} . Mõnede tähiste selgitused on kirjeldatud standardi eelnevates alapunktides ning nende leidmine juhul kui vaja on kasutada näiteks vaid konkreetset osa standardist on tülikas. Selgituste lisamine valemitele ja tähistele parandaks standardi kasutusmugavust.

Kogu suitsugaaside kogus μ_G (kg/kg) 1 kg kütuse põlemisel leitakse (2):

$$\mu_G = \mu_A \cdot [1 - \gamma_{ash} \cdot (1 - v)] + \mu_{AS} \quad (2)$$

Kus

μ_A on katlasse sisenev niiske õhk (arvesse on võetud ka õhu niiskusesisaldust) 1 kg kütuse kohta (kg/kg);

γ_{ash} on kütuse tuhasisaldus (kg/kg);

v on tuha lenduvate osade sisaldus (kg/kg);

μ_{AS} on pihustunud auru kogus suitsugaasides 1 kg kütuse põlemisel (kg/kg).

Katlasse sisenev niiske õhu kogus μ_A leitakse järgnevalt (3):

$$\mu_A = \mu_{Ad} \cdot (1 + x_{H_2OAd}) \quad (3)$$

Kus

μ_{Ad} on katlasse sisenev kuiv õhk koos liigõhuga 1 kg kütuse kohta (kg/kg);

x_{H_2OAd} on katlasse siseneva õhu niiskusesisaldus (kg/kg).

Katlasse sisenev kuiva õhu kogus μ_{Ad} määratakse järgnevalt (4):

$$\mu_{Ad} = \mu_{Aod} + \rho_{nAd} \cdot V_{God} \cdot \frac{y_{O_2d}}{y_{O_2Ad} - y_{O_2d}} \quad (4)$$

Kus

μ_{Aod} on kuiva põlemisõhu kogus 1 kg kütuse kohta ilma liigõhuta (kg/kg);

ρ_{nAd} on kuiva õhu tihedus – 1,2930 kg/m³;

V_{God} on 1 kg kuiva kütuse põlemisel tekkivate suitsugaaside ruumala (m³/kg);

y_{O_2d} on liighapniku osakaal suitsugaasides (m³/m³);

y_{O_2Ad} on hapniku osakaal põlemisõhus – 0,20938 m³/m³.

Stöhhiomeetriline kuiva põlemisõhu kogus μ_{Aod} leitakse omakorda valemi (5) abil (standardis valem 8.3-58)

$$\mu_{Aod} = 11,5122 \cdot m_C + 34,2974 \cdot m_H + 4,3129 \cdot m_S - 4,3212 \cdot m_O \quad (5)$$

1 kg kuiva kütuse põlemisel tekkivate suitsugaaside ruumala V_{God} on määratav valemi (6) järgi (standardi valem 8.3-60)

$$V_{God} = 8,8930 \cdot m_C + 20,9724 \cdot m_H + 3,3190 \cdot m_S - 2,6424 \cdot m_O + 0,7997 \cdot m_N \quad (6)$$

Suitsugaaside koostise puhul on võimalik standardi abil määrata süsihappegaasi sisaldus ja veeauru sisaldus, mis käib järgnevalt, süsihappegaasi koguse μ_{CO_2o} (kg/kg)

jaoks valem 7 (standardis valem 8.3-61) ja veeauru koguse μ_{H_2O} (kg/kg) valem 8 (standardis valem 8.3-62)

$$\mu_{CO_2} = 3,6699 \cdot m_C + 0,0173 \cdot m_H + 0,0022 \cdot m_S - 0,0022 \cdot m_O \quad (7)$$

$$\mu_{H_2O} = 8,9370 \cdot m_H + 1,0 \cdot m_{H_2O} \quad (8)$$

Lämmastiku või väävlioksiidide sisaldust suitsugaasides standardi alusel otseselt ei määrata.

Väljuvate suitsugaaside niiskusesisaldus x_{H_2O} (kg_{H₂O}/kg_{kuivad gaasid}) on standardi kohaselt määratav (valem 9)

$$x_{H_2O} = \frac{\mu_{H_2O}^{OF}}{\mu_G - \mu_{H_2O}^{OF}} \quad (9)$$

2.1.3 Suitsugaaside määramine stöhhioomeetrilisel meetodil

Nagu ka eelnevalt kirjeldatud meetodi puhul, nii on ka stöhhioomeetrilise meetodi puhul vaja teada kütuse niiskusesisaldust ja analüütilist koostist. Stöhhioomeetrilise meetodi aluseks on eeldus, et toimub täielik põlemine – kõik kütuse komponendid oksüdeeruvad maksimaalselt ning põlemisõhuga katlasse läinud liigne hapnik väljub katlast. Teine eeldus on, et temperatuur koldes on piisavalt madal, et lämmastik jääb inertseks – nii kütusega kui põlemisõhuga katlasse läinud lämmastik ei hakka moodustama lämmastikuoksiide. Kuna suitsugaaside kondensaatoreid kasutatakse enamasti kõrge niiskusesisaldusega katelde juures (nagu näiteks puiduhake), siis on viimane eeldus enamasti vaikumisi täidetud, sest kütuse kõrge niiskusesisaldus toob alla kolde temperatuuri ning seetõttu ei saa lämmastikuoksiidid tekkida [34].

Stöhhioomeetrilise meetodi puhul on esimeseks sammuks kirjutada välja kütuse põlevaine komponentide oksüdeerumise reaktsioonivõrrandid. See on oluline selleks, et määrata kütuse põlemiseks vajalik õhukogus ja katlast väljuv suitsugaaside kogus.

Kütuses sisalduv süsinik, süsinikuga seotud vesinik ja püriitne väävel moodustavad kütuse põlevaine – orgaanika. Lisaks püriitsele väävlile võib kütuse koostises sisalduda ka sulfaatset väävlit, mis on lõpuni oksüdeerunud põlemisreaktsioonis ei osale [21]. Kuna kütuse koostises on väävlit kogus marginaalne, siis väävlit arvestamata jätmine ei mõjuta arvutuse tulemusi märgatavalt. Väävlit võib arvestamata jätta ka põhjusel, et see seotakse kondensaatoris vees sisalduva naatriumhüdroksiidiga ning gaasina suitsugaaside kondensaatorist ei välju. Seetõttu jääb ka selle soojus kondensaatorisse ning seda ei pea kondensaatori tagastatavast soojushulgast maha arvama.

Et leida tekkivate suitsugaaside kogust, tuleb koostada kütuse põlevaine komponentidele põlemisreaktsioonide võrrandid. Need on toodud järgmiselt (valemid 10, 11)



Kütuse koostises oleva lämmastiku puhul võib eeldada, et see eraldub inertse N₂-na koos põlemisõhuga katlasse läinud lämmastikuga.

Stõhhiomeetriline suitsugaaside koostise määramise meetod on kirjutatud etappidena järgmiselt:

1. Koostada kütuse põlevaine põlemisreaktsioonide võrrandid (valemid 10 ja 11).
2. Leida kütuses sisalduva süsiniku C, vesiniku H, lämmastiku N ja hapniku O ainehulgad n_C , n_{H_2} , n_{N_2} ja n_{O_2} (mol/kg) 1 kg niiskes kütuses (valem). Vesiniku, lämmastiku ja hapniku ainehulkade leidmisel arvestada, et kuna reaktsioonivõrrandis on need ained molekuli kujul, siis tuleb siinkohal leida nende ainete molekulide ainehulk.

$$n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad (12)$$

Kus

i on element, mille ainehulka leitakse;

m_i on kütuse tarbimisaine elemendi i sisaldus (kg/kg);

M_i on aine i molaarmass, $M_C = 0,012$ kg/mol, $M_{H_2} = 0,002$ kg/mol, $M_{O_2} = 0,032$ kg/mol, $M_{N_2} = 0,028$ kg/mol;

Kütuse tarbimisaine elementkoostise saab leida järgmiselt (13):

$$m_i = (1 - m_{H_2O, kütus} - m_{tuhk}) \cdot m_{i, kuiv} \quad (13)$$

Kus

i on element, mille sisaldust leitakse;

m_i on elemendi i sisaldus 1 kg kütuse tarbimisaines (kg/kg);

$m_{H_2O, kütus}$ on kütuse tarbimisaine niiskusesisaldus (kg/kg);

m_{tuhk} on kütuse tuha sisaldus (kg/kg);

$m_{i, kuiv}$ on elemendi i sisaldus kütuse kuivaines (kg/kg).

3. Leida kütusekomponentide ainehulkade n_C , n_{H_2} , eelnevalt koostatud reaktsioonivõrrandite (valemid 9, 10) kaudu põlemiseks vajalik hapniku O₂ ainehulk $n_{O_2, 0}$ (mol/kg) ja tekkivate suitsugaaside ainehulgad n_{CO_2} ja n_{H_2O} (mol/kg). Põlemiseks vajaliku hapniku ainehulga puhul tuleb arvesse võtta ka kütuses sisalduvat hapnikku n_{O_2} (mol/kg), mis tuleb leida reaktsioonivõrrandite (valemid 10, 11) järgi ning vajalikust hapnikukogusest maha võtta, kuna see on juba kütuses olemas.
4. Leida põlemiseks vajaliku hapniku ainehulga $n_{O_2, 0}$ kaudu põlemiseks vajaliku hapniku mass $m_{O_2, 0}$ (kg/kg) ehk stõhhiomeetriline hapnikukogus (valem 14) ning võttes arvesse liigõhutegurit α ka kogu katlasse antav hapniku kogus $m_{O_2, pg}$ (kg/kg) (valem 15).

$$m_{O_2, 0} = n_{O_2, 0} \cdot M_{O_2} \quad (14)$$

$$m_{O_2,pg} = m_{O_2,0} \cdot \alpha \quad (15)$$

5. Õhu hapniku-lämmastiku massisuhte abil (punkt 2.1.1. tabel 3) leida põlemisõhuga katlasse siseneva lämmastiku mass $m_{N_2,pg}$ (kg/kg) (valem 16). Samal moodusel leida ka teiste katlasse minevate õhukomponentide massid - argoon $m_{Ar,pg}$ (kg/kg) (valem 18), põlemisõhus sisalduv süsihappegaas $m_{CO_2,pg}$ (kg/kg) (valem 19) ja põlemisõhus sisalduv veeaur $m_{H_2O,pg}$ (kg/kg) (valem 20).

$$m_{N_2,pg} = \frac{0,750}{0,229} m_{O_2} \quad (16)$$

$$m_{Ar,pg} = \frac{0,0128}{0,229} m_{O_2} \quad (17)$$

$$m_{CO_2,pg} = \frac{0,00046}{0,229} m_{O_2} \quad (18)$$

$$m_{H_2O,pg} = \frac{0,00720}{0,229} m_{O_2} \quad (19)$$

6. Eeldades, et katlasse antud liigne hapnik väljub katlast koos suitsugaasidega leida liighapniku kogus $m_{O_2,sg}$ (kg/kg) lahutades katlasse antud hapnikukogusest $m_{O_2,pg}$ stöhhiomeetriline hapnikukogus $m_{O_2,0}$ (valem 20).

$$m_{O_2,sg} = m_{O_2,pg} - m_{O_2,0} \quad (20)$$

7. Kuivad suitsugaasid moodustavad süsihappegaas CO_2 , lämmastik N_2 ja katlast väljuv liighapnik O_2 . Lämmastiku puhul tuleb arvestada, et ka kütuses sisalduv lämmastik m_{N_2} lisandub mitte kondenseeruvatele suitsugaasidele. Kuna meetodi eelduseks on täielik põlemine, siis vingugaasi CO -d arvutuslikult ei teki. Reaalsuses määratakse CO hulk suitsugaasides mõõtmise teel. Kuivade suitsugaaside massivoo $m_{sg,kuiv}$ (kg/kg) leidmiseks teisendada ainehulkadena leitud süsihappegaasi kogus n_{CO_2} massiks m_{CO_2} ning summeerida kuivade komponentide massivood (valem 21).

$$m_{sg,kuiv} = m_{CO_2} + m_{O_2,sg} + m_{N_2} + m_{N_2,pg} + m_{Ar,pg} + m_{CO_2,pg} \quad (21)$$

8. Veeaur katlast väljuvates suitsugaasides m'_{sg,H_2O} (kg/kg) tuleb kütuse niiskusest $m_{H_2O,kütus}$ - nii sisemisest kui välimisest, põlemisõhuga katlasse sisenenud õhuniiskusest $m_{H_2O,pg}$ ning kütuse orgaanikas sisalduva vesiniku m_H oksüdeerumisest veeauruks. Suitsugaaside veeaurisalduse m_{sg,H_2O} leidmiseks teisendada kütuse orgaanikas sisalduvast H_2 -st tekkinud veeauru ainehulk x_{H_2O} massiks $m_{H_2O,0}$ ning summeerida veeauru massivoog (valem 22).

$$m'_{sg,H_2O} = m_{H_2O,kütus} + m_{H_2O,pg} + m_{H_2O,0} \quad (22)$$

9. Leida katlast väljuvate suitsugaaside niiskusesisaldus x' ($kg_{H_2O}/kg_{kuivad\ gaasid}$) jagades veeauru massivoo kuivade suitsugaaside summaarse massivooga (valem 23).

$$x' = \frac{m'_{sg,H_2O}}{m_{sg,kuiv}} \quad (23)$$

Väävlirikkamate kütuste puhul on vaja arvesse võtta ka väävlit, kui tegemist on süsteemidega, kus väävlioksiide ei eraldata süsteemist (mitte suitsugaaside kondensaatorid).

2.2 SUITSUGAASIDE SOOJUSVOO ARVUTUS

Suitsugaaside soojusvoo ehk maksimaalse tagastatava soojushulga $Q_{SGK,max}$ (kW) võib tinglikult jagada veeauru jahtumisest ja kondenseerumisest vabanevaks soojuseks ehk latentseks soojuseks Q_{H_2O} (kW) ning kuivade suitsugaaside jahtumisest vabanevaks soojuseks Q_{kuiv} (kW) (valem 24).

$$Q_{SGK,max} = Q_{H_2O} + Q_{kuiv} \quad (24)$$

Mõlema suuruse puhul on määravaks suitsugaaside temperatuur kondensaatorisse sisenedes t' (°C) – see sõltub kolde temperatuurist, mis on omakorda määratud kütuse koostisest ja niiskusesisaldusest, ja katla ehitusest. Sama oluline on ka suitsugaaside temperatuur kondensaatorist väljudes t'' (°C) – see on ligikaudu võrdne kaugkütte tagasivoolu temperatuuriga, kuna kaugkütte tagasivoolu vett kasutatakse suitsugaaside kondensaatoris jahutusveena.

Suitsugaasides oleva maksimaalse tagastatava soojushulga puhul on olulisteks teguriteks suitsugaaside koostis ja suitsugaaside niiskusesisaldus x (kg_{H2O}/kg_{kuivad gaasid}) (punkt 2.1.2 valem 9 – standardi DIN EN 12952-15 järgi, punkt 2.1.3. valem 23 – stöhhiomeetrilise valemi järgi).

2.2.1 Latentne soojus

Kondensaatorisse sisenedes on gaasisegu veeaurust küllastmata olekus ehk suhteline õhuniiskus RH on alla 100%. Temperatuuri langedes, gaasisegu küllastav veeauru kogus langeb – osa veeaurust kondenseerub, teine osa veeaurust, mis vastab küllastavale veeauru kogusele jahutuse temperatuuril, väljub kondensaatorist. Mida suurem kogus veeauru on võimalik kondenseerida, seda suurem on tagastatava soojushulga suurus. Veeaurust tagastatav soojus Q_{H_2O} on leitav järgmiselt (valem 25)

$$Q_{H_2O} = [m'_{sg,H_2O} \cdot (c'_{p,H_2O} \cdot t' + r) - m''_{sg,H_2O} \cdot (c''_{p,H_2O} \cdot t'' + r_{t''})] \cdot b \quad (25)$$

Kus

m'_{sg,H_2O} on veeauru kogus kondensaatorisse sisenevates (katlast väljuvates) suitsugaasides 1 kg kütuse tarbimisaine kohta (kg/kg);

c'_{p,H_2O} on veeauru erisoojus jääval rõhul kondensaatorisse sisenevate (katlast väljuvate) suitsugaaside temperatuuril [kJ/(kg·°C)];

t' on kondensaatorisse sisenevate (katlast väljuvate) suitsugaaside temperatuur (°C);

r on veeauru kondensatsioonisoosus sisenevate suitsugaaside kastepunkti temperatuuril (kJ/kg);

m''_{sg,H_2O} on veeauru kogus kondensaatorist väljuvates suitsugaasides 1 kg kütuse tarbimisaine kohta (kg/kg);

c''_{p,H_2O} on veeauru erisoojus jääval rõhul kondensaatorist väljuvate suitsugaaside temperatuuril [kJ/(kg·°C)];

t'' on kondensaatorist väljuvate suitsugaaside temperatuur, ligikaudu võrdne kaugkütte tagasivoolu temperatuuriga (°C);

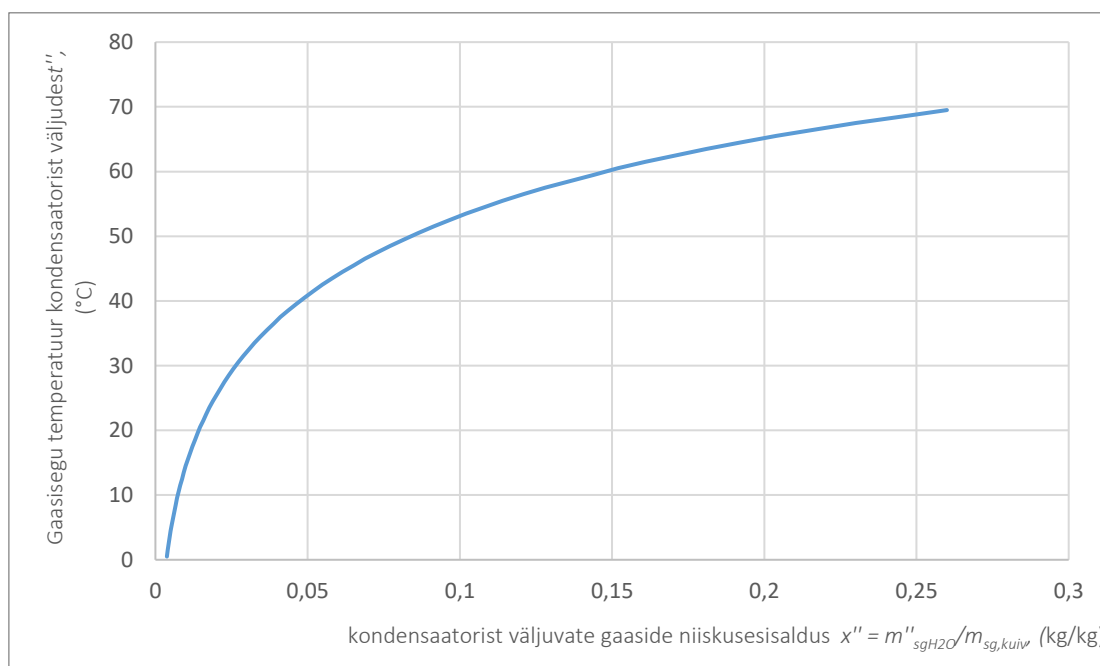
r_t'' on veeauru kondensatsioonisoojus väljuvate suitsugaaside temperatuuril (kJ/kg).

Katla kütusekulu b on leitav valemist 26

$$b = \frac{Q_{katel}}{Q_{NCV}}, \quad (26)$$

kus Q_{katel} (kW) on katla võimsus ja Q_{NCV} (kJ/kg) on kütuse alumine kütteväärtus.

Kondensaatorist väljuv veeauru kogus on määratud jahutava vee ehk kaugkütte tagasivoolu temperatuuriga t'' – mida madalam on jahutustemperatuur, seda vähem veeauru väljub kondensaatorist ja seda rohkem veeauru on võimalik kondenseerida. Kehtib eeldus, et kondensaatorist väljuvad gaasid on veeaurust küllastunud olekus ehk suhteline õhuniiskus RH kondensaatorist väljuvates suitsugaasides on 100%. Jahutustemperatuuri ja kondensaatorist väljuvate gaaside niiskusesisalduse x'' vahelist seost kirjeldab joonis 8.



Joonis 8. Küllastav veeauru niiskusesisaldus kondensaatorist väljuvates suitsugaasides normaalarõhul

Kondensaatorist väljuvate suitsugaaside niiskusesisaldus x'' määratakse joonisel 8 kujutatud graafiku abil valides graafiku y-teljelt kaugkütte tagasivoolu temperatuurile t'' vastava temperatuuri ning leides graafikult sellele vastava niiskusesisalduse x'' .

Veeauru kogus 1 kg kütuse tarbimisaine kohta kondensaatorist väljuvates suitsugaasides m''_{sg,H_2O} on leitav niiskusesisalduse x'' ja kuivade suitsugaaside koguse $m_{sg,kuiv}$ abil (valem 27).

$$m''_{sg,H_2O} = x'' \cdot m_{sg,kuiv} \quad (27)$$

Joonis 8 kujutab põhjust, miks kaugkütte tagasivoolu langetamine suurendab soojustagastust. Kui kaugkütte tagasivoolu temperatuur väheneb, siis väheneb ka kondensaatorist lahkuva veeauru kogus ning suurem kogus veeauru kondenseerub ning jätab oma soojuse kondensaatorisse. Oluline on et veeaur kondenseeruks, sest kondensatsioonisoojus on oluliselt suurem kui vee või auru erisoojus, keskmiselt moodustab veeauru kondenseerumisest tulenev soojustagastus 75% kogu soojustagastusest.

2.2.2 Mittekondenseeruvate suitsugaaside soojus

Mittekondenseeruvate, kuivade suitsugaaside jahtumisest tagastatav soojus Q_{kuiv} (W) on määratav valemi 28 abil.

$$Q_{kuiv} = [\sum m_i \cdot (c'_{p,i} \cdot t' - c''_{p,i} \cdot t'')] \cdot b \quad (28)$$

kus

- i on valemis 20 toodud suitsugaaside komponent;
- m_i on 1 kg kütuse tarbimisaine puhul tekkiv suitsugaaside komponendi i kogus (kg/kg);
- $c'_{p,i}$ on suitsugaaside komponendi i erisoojus jääval rõhul kondensaatorisse sisenemise temperatuuril t' [kJ/(kg·°C)];
- $c''_{p,i}$ on suitsugaaside komponendi i erisoojus jääval rõhul kondensaatorist väljumise temperatuuril t'' [kJ/(kg·°C)].

2.3 SUITSUGAASIDE KONDENSAATORI SOOJUSVAHETUSE ARVUTUS

Käesolevas magistritöös kirjeldatav soojusvahetuse arvutus eeldab, et tegemist on suitsugaaside kondensaatoriga, kus toimub soojusvahetus kuumade suitsugaaside ja kaugküttevee vahel kondensaatorisiseselt läbi soojusvahetuspinna, ilma et süsteemi oleks lisatud eraldi soojusvaheti – see tähendab et kirjeldatav mudel vastab punktis 1.3.1. joonisel 6 kujutatud suitsugaaside kondensaatori tüübile. Soojusvahetuspindade kuju puhul on võetud eelduseks, et tegemist on torujate, ribideta soojusvahetuspindadega. Ribitatud pindade puhul võivad valemid kehtida parandusteguritega, mida ei ole käesolevas töös käsitletud. On oluline, et suitsugaaside kondensaator töötaks vastavalt projekteeritud tingimustele – suitsugaaside ja kaugküttevee massivood ja temperatuurid. Kõrvalekalded projekteeritud tingimustest võivad põhjustada kadusid soojustagastuses.

Soojusülekannet mõjutavad voolava soojuskandja erinevad dimensiooniga füüsikaliste suuruste kompleksid, mida on võimalik asendada ekvivalentsete dimensioonita suuruste kompleksidega. Määratavatest suurustest dimensioonide kompleksid on sarnasusarvud ehk sarnasuskriteeriumid [35]. Peamised sarnasusarvud, mis on vajalikud soojusülekande määramiseks on Nusselti arv (Nu), Reynoldsi arv (Re), Prandtli arv (Pr) ja Grashoffi arv (Gr).

Nusselti arv kirjeldab konvektiivse soojuslevi ja soojusjuhtivuse suhet ning väljendab dimensioonita soojusülekandetegurit voolavale keskkonnale [36].

Reynoldsi arv kirjeldab voolamisrežiimi lähtudes inertsijõudude ja hõõrdejõudude vahekorra [36]. Kehtib seaduspära, et kui Reynoldsi arv on väiksem kui 2000, siis prevalveerivad voolus hõõrdejõud ja voolamine toimub vedelikukihtidena. See tähendab, et tegemist on laminaarse vooluga. Reynoldsi arvu suurenedes kasvab inertsijõudude osakaal ning voolu tekivad keerised ehk tegemist on turbulentse vooluga. Prandtli arv kirjeldab massi- ja soojuslevi suhet voolavas keskkonnas [36]. Enim mõjutab Prandtli arvu konkreetse keskkonna puhul temperatuur.

Grashoffi arv kirjeldab temperatuurigradiendist põhjustatud tiheduse erinevusest tingitud tõstejõudude ja molekulaarse hõõrdumise suhet [36]. Käesoleva töö kontekstis omandab Grashoffi arv tähenduse kombineerituna Reynoldsi arvuga, kuna Reynoldsi ja Grashoffi arvu korrutise abil on võimalik määrata, kas laminaarse voolu puhul on tegemist viskoosse või gravitatsioonilise viskoosse voolamisega. Gravitatsioonilise viskoosse voolamise puhul tuleb voolus lisaks hõõrde- ja inertsijõududele arvestada ka raskusjõude. Juhul kui $Re \cdot Gr < 80\,000$, siis on tegemist viskoosse voolamisega ning kui $Re \cdot Gr > 80\,000$, siis on tegemist gravitatsioonilise viskoosse voolamisega [35].

Võttes arvesse kadusid võib kirjutada suitsugaaside kondensaatori kui soojusvaheti bilansi koos maksimaalse võimaliku soojustagatuse $Q_{SGK,max}$ ja tegeliku suitsugaaside kondensaatori soojustagatuse Q_{SGK} (kW) järgnevalt (valem 29)

$$Q_{SGK,max} = Q_{SGK} + Q_{kaod} \quad (29)$$

Samuti arvestades et tegemist on soojusvahetiga võib Q_{SGK} väljendada valemi 30 abil

$$Q_{SGK} = A \cdot q \quad (30)$$

Kus

A on kondensaatori soojusvahetuspind (m^2);

q on soojusvoog läbi soojusvahetuspinna (kW/m^2).

Kuna kondensaatoriseste soojusvahetuspindade puhul saab olla tegemist torujate soojusvahetuspindadega, siis võib avaldada soojusvoo läbi pinna järgmiselt (valem 31):

$$q = \frac{\Delta t_{log}}{R} \quad (31)$$

Kus

Δt_{log} on logaritmiline temperatuuride vahe (K);

R on soojusvahetuspinna termiline takistus [$(m^2 \cdot K)/kW$].

Termilise takistuse R võib torujate pindade puhul avaldada järgmiselt (valem 33) [21]

$$R = d_k \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{2 \cdot k} \ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right) + \frac{1}{h_2 \cdot d_2} \right) \quad (32)$$

Kus

h_1 on soojusülekannetegur suitsugaasilt soojusvahetuspinnale [$kW/(m^2 \cdot K)$];

d_1 on toruja soojusvahetuspinna välimine diameeter (m);

k on soojusvahetuspinna soojusjuhtivustegur [$kW/(m \cdot K)$];

d_2 on toruja soojusvahetuspinna sisemine diameeter (m);

h_2 on soojusülekannetegur soojusvahetuspinnalt kaugkütteveele [$kW/(m^2 \cdot K)$];

d_k on iseloomustav diameeter, kui $h_1 > h_2$, siis $d_k = d_1$ ja vastupidi (m).

Valemis 32 ei ole h_1 vastava diameetriga läbi korrutatud, sest silindrilisust võetakse arvesse juba h_1 arvutamisel.

Logaritmiline temperatuuride vahe Δt_{log} on leitav järgmiselt (valem 33) [35]:

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_{sg} - \Delta t_{kk}}{\ln \frac{\Delta t_{sg}}{\Delta t_{kk}}} \quad (33)$$

Kus

Δt_{sg} on suitsugaaside temperatuuri muutus protsessi jooksul, $\Delta t_{sg} = t' - t''$ (K);

Δt_{kk} on kaugkütte vee temperatuuri muutus protsessi jooksul (K).

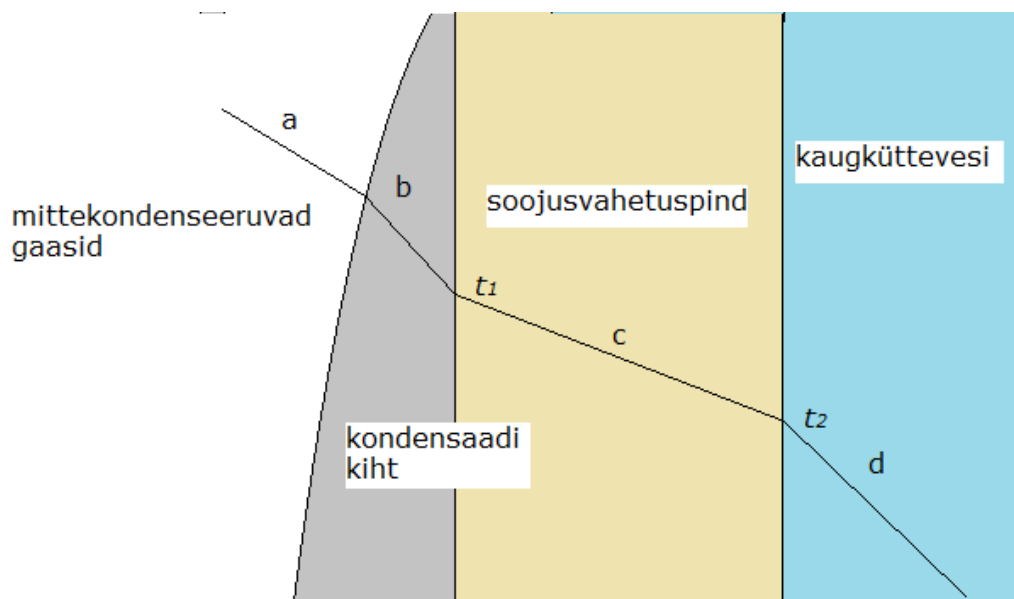
Kaugkütte vee temperatuuri muutus avaldub kondensaatori soojusvoo $Q_{SGK,max}$ ja kondensaatorit läbiva kaugküttevee vooluhulga G (kg/s) abil (valem 34).

$$\Delta t_{kk} = \frac{Q_{SGK,max}}{c''_{p,H_2O} \cdot G} \quad (34)$$

Termilise takistuse R saab sisuliselt jagada kolmeks osaks, kus valemi 32 esimene liidetav $\frac{1}{h_1}$ kirjeldab soojuse levimist kuumadelt suitsugaasidelt soojusvahetuspinnale,

teine liidetav $\frac{1}{2 \cdot k} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$ kirjeldab soojuste levimist läbi soojusvahetuspinna ning viimane liidetav $\frac{1}{h_2 \cdot d_2}$ kirjeldab soojuste levikut soojusvahetuspinnalt kaugkütteveele. Kuna iga liidetava poolt kirjeldatav soojuslevi protsess on erinev, siis tuleb neid erinevalt käsitleda.

Soojuste levikul kuumadelt gaasidelt soojusvahetuspinnale tuleb arvesse võtta, et protsessi vältel toimub faasimuutus - gaasides olev veeaur kondenseerub, kuna soojusvahetuspind on gaasidest jahedam. Kondenseerudes moodustab veeaur soojusvahetuspinnale kondensaadikihi ning sellega lisandub veel üks kiht, läbi mille soojus peab levima [37]. Soojuslevi protsess suitsugaaside kondensaatoris on kujutatud joonisel 9, arvestatud on, et tegemist on kelmelise kondensatsiooniga.



Joonis 9. Soojuslevi suitsugaaside kondensaatoris.

a – soojuslevi kuumadelt suitsugaasidelt kondensaadikihi;

b – soojuslevi kondensaadikihilt soojusvahetuspinnale;

c – soojuslevi läbi soojusvahetuspinna;

d – soojuslevi soojusvahetuspinnalt kaugkütteveele;

t_1 – soojusvahetuspinna välimine temperatuur (°C);

t_2 – soojusvahetuspinna sisemine temperatuur (°C).

Soojusülekandevorgu h_1 valemist 32 saab lahti kirjutada järgmiselt (valem 35) [38]

$$h_1 = \frac{1}{d_1 \cdot \left(\frac{1}{h_{Nu}} + \frac{1}{h_D} + \frac{1}{h_k} \right)} \quad (35)$$

Kus

h_{Nu} on soojusülekandevorgu, mis kirjeldab soojuslevi kuumade gaaside voolamisest läbi torukimbu [kW/(m²·K)];

h_D on soojusülekandevorgu, mis kirjeldab soojuslevi suitsugaasidelt kondensaadikihi [kW/(m²·K)];

h_k on soojusülekandevegur, mis kirjeldab soojuslevi kondensaadikiht soojusvahetuspinnale [kW/(m²·K)];

Gaaside voolamisel läbi torukimbu on oluline silmas pidada torude paiknemist – koridoorne või malekorras, ning gaaside voolamise režiimi ja temperatuuri. Soojusülekandeveguri h_{Nu} leidmiseks on vaja leida suitsugaasude Nusselti arv, mille abil on võimalik avaldada soovitud soojusülekandevegur (valem 36) [37].

$$h_{Nu} = \frac{k_{sg} \cdot Nu_{sg}}{s} \quad (36)$$

Kus

k_{sg} on suitsugaaside soojusjuhtivustegur temperatuuril $\bar{t} = \frac{t'' + t'}{2}$ [kW/(m²·K)];

s on horisontaalne torusamm (m).

Suitsugaaside Nusselti arv (Nu_{sg}) on leitav valemi 37 abil [21]

$$Nu_{sg} = C \cdot Re_{sg}^{n_1} \cdot Pr_{sg}^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{t'}}{Pr_t} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\psi \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_n \quad (37)$$

Kus

Re_{sg} on suitsugaaside voolu Reynoldsi arv;

Pr_{sg} on suitsugaaside Prandtl'i arv temperatuuril $\bar{t} = \frac{t'' + t'}{2}$ ning $Pr_{t'}$ ja $Pr_{t''}$ on suitsugaaside Prandtl'i arvud vastavatel temperatuuridel;

ε_ψ on parandustegur voolusuuna arvestamiseks (valem 38);

ε_s on parandustegur torusammu arvestamiseks (valem 39, 40);

ε_n on parandustegur toruridade arvu arvestamiseks (joonis 15).

Parandustegurite leidmise valemid on toodud järgnevalt (valemid 38 – 40) [21]

$$\varepsilon_\psi = 1 - 0,54 \cdot \cos^2 \psi \quad (38)$$

Kus

ψ on nurk toru telje ja gaaside voolusuuna vahel.

Torusammu parandustegur ε_s erineb malekorras ja koridoorse torukimbu juhul. Malekorras torukimbule puhul kehtib valem 39 ja koridoorsele valem 40 [21].

$$\varepsilon_s = \begin{cases} \sqrt[6]{\frac{s_1}{s_2}}, & \text{kui } \frac{s_1}{s_2} < 2 \\ 1,12, & \text{kui } \frac{s_1}{s_2} \geq 2 \end{cases} \quad (39)$$

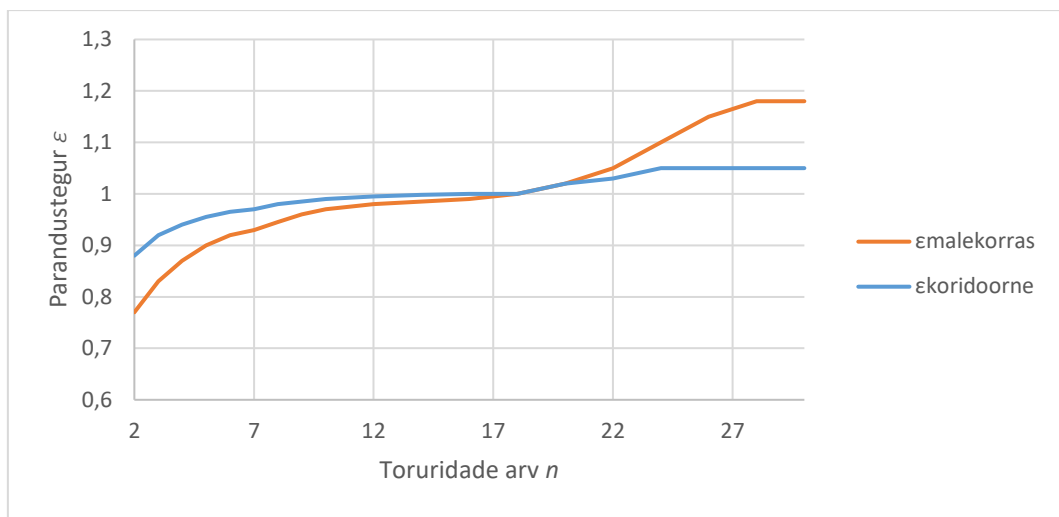
$$\varepsilon_s = \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{-0,15} \quad (40)$$

Kus

s_1 on torutelgede vertikaalne kaugus (m);

s_2 on torutelgede horisontaalne kaugus (m).

Toruridade arvu parandustegur on leitav nii koridoorsele kui malekorras torukimbule jooniselt 10 [21].



Joonis 10. Toruridade arvu parandustegur [21]

Valemis 37 vajalikud konstandid on leitavad tabelist 4 [21].

Tabel 4. Valemi 37 konstandid

Torude asetus	C	n_1
Koridoorne	0,26	0,65
Malekorras	0,41	0,60

Soojuslevi suitsugaasidelt kondensaadikihi peale on tegemist auru difundeerumisega läbi gaasi ning soojusülekandevõime h_D avaldub (valem 41) [38]. Difusiivse soojusülekandevõime h_D ja välise soojusülekandevõime h_1 leidmiseks on iteratiivse meetodi kasutamine vajalik.

$$h_D = \frac{t' - t_k}{h_1 \cdot (t' - t_k) + r \cdot j} \quad (41)$$

Kus

t_k on suitsugaaside kastepunkti temperatuur (°C);

j on kondensaadi juurdevool [kg/(m²·s)].

Soojusülekandevõime kondensaadikihi soojusvahetuspinnale h_k on leitav Nusselti valemiga, mida on kohandatud torudele ning avaldub järgmiselt (valem 42) [35]

$$h_k = 0,728 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot r \cdot \rho \cdot k_{vesi}^3}{v \cdot d_1 \cdot (t_k - t_1)}} \quad (42)$$

Kus

g on raskuskiirendus (m/s²):

k_{vesi} on vee soojusjuhtivustegur temperatuuril $\bar{t} = \frac{t_k + t_1}{2}$ [kW/(m²·K)];

v on vee kinemaatiline viskoossus temperatuuril $\bar{t}$ (m²/s).

Soojusülekangeteguri, mis kirjeldab soojusülekannet torujalt soojusvahetuspinnalt kaugkütteveele, leidmiseks on taas vaja leida soojusülekannet kirjeldav Nusselti arv, mille kaudu on võimalik leida sisemine soojusülekangetegur h_2 valemi 43 kohaselt [36].

$$h_2 = \frac{k_{vesi} \cdot Nu}{d_2} \quad (43)$$

Kus

k_{vesi} on vee soojusjuhtivustegur temperatuuril $\bar{t} = \frac{t_2 + t''}{2}$ [kW/(m²·K)].

Leitav Nusselti arv (Nu) on sõltub tugevalt voolamise režiimist, mida kirjeldab Reynoldsi arv. Laminaarse voolamise puhul on omakorda eristatavad viskoosne voolamine ja viskoosne gravitatsiooniline voolamine. Viskoosse voolamise puhul Nusselti arv leitav järgmiselt (valem 44) [35]

$$Nu = 1,55 \cdot \left(Pr \cdot Re \cdot \frac{d_2}{L} \right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{-0,14} \cdot \varepsilon \quad (44)$$

Kus

μ_1 on vee dünaamiline viskoossus temperatuuril t_2 (Pa·s);

μ_2 on vee dünaamiline viskoossus temperatuuril t'' (Pa·s);

ε on parandustegur voolu algosale, $\varepsilon \approx 1$.

Viskoosse gravitatsioonilise voolamise puhul (laminaarne vool) on Nusselti arv aga leitav valemiga 45 [35].

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_2} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon \quad (45)$$

Kus

Pr_1 on vee Prandtl'i arv temperatuuril t_2 ;

Pr_2 on vee Prandtl'i arv temperatuuril t'' ;

Gr on Grashoffi arv.

Turbulentse voolamise puhul on kõige täpsem kasutada Petuhhovi-Kirillovi valemit (valem 46) [35], mida on hea kasutada, kui on teada toru pinna kareduse iseloom, ning voolamise ja pindade parameetrid (vooluhulk G (kg/s), voolu kiirus v (m/s), toru sisemine diameeter d_2 (m) ja pinna karedus Δ (m)).

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} Re \cdot Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \cdot (Pr^{0,67} - 1) \sqrt{\frac{\xi}{8}}} \quad (46)$$

Kus

ξ on hüdrodünaamiline takistustegur.

Kui tegemist on sirge toruga, siis sõltub ξ vaid Reynoldsi arvust Re , toru karedusest Δ ja toru parameetritest (L , d_2).

Suitsugaaside kondensaatori kasutegur η_{SGK} väljendab kui suure osa maksimaalsest soojustagastusest suudab kondensaator tagastada. Kasutegur η_{SGK} on väljendatav valemi 47 abil

$$\eta_{SGK} = \frac{Q_{SGK}}{Q_{SGK,max}} \quad (47)$$

Suitsugaaside kondensaatori efektiivsus ε_{SGK} väljendab kui suure osa moodustab suitsugaaside kondensaatori poolt tagastatud soojus Q_{SGK} kondensaatori nimivõimsusest $Q_{SGK,nimi}$ (MW) (valem 48)

$$\varepsilon_{SGK} = \frac{Q_{SGK}}{Q_{SGK,nimi}} \quad (48)$$

3 TULEMUSTE ANALÜÜS

3.1.1 Mustamäe Koostootmisjaama andmed

Käesolevas töös koostatud mudeli õigsust on kontrollitud võrreldes mudeli poolt arvutatud tulemusi Mustamäe Koostootmisjaamas mõõdetud tulemustega, mis on mõõdetud ajaperioodil 16. september 2019 – 31. märts 2020. Mõõdetud andmed on vaadeldavad Lisas 2.

Mustamäe koostootmisjaam (joonis 11) rajati 2019 aastal ning selle soojuslik võimsus on 47 MW ja elektriline võimsus 10 MW. Jaam kuulub ettevõttele AS Utilitas. Jaamas on ka 9 MW nimivõimsusega Scheuch GmbH suitsugaaside kondensaator. Jaam kasutab kütusena puiduhaket.



Joonis 11. Mustamäe koostootmisjaam. Foto: Maris Tomba-Large

Puiduhaket tarnitakse jaama tööpäeviti ning harilikult kehtib seaduspära, et katlasse läheb eelmisel päeval toodud puiduhake, erandiks on siis seega pühapäevad ja esmaspäevad, kuna nädalavahetusel jaama haket juurde ei tooda ning nendel päevadel põletatakse varem toodud kütust.

Puiduhakke niiskusesisaldust mõõdetakse igas tarnitud koormas jaamas kohapeal. Niiskusesisalduse mõõtmine kohapeal on tarvilik, kuna see mõjutab puiduhakke eest makstavat hinda. Puiduhakke puhul makstakse kütuses sisalduva energia eest – koorem

kaalutakse ning mõõdetakse selle niiskusesisaldus, et leida koorma energeetiline väärtus.

3.1.2 Mudeli kontrollimine

Mudeli kontrollimise puhul olid vaadeldavateks andmeteks:

- Jaama võimsus, MW;
- Suitsugaaside temperatuur enne kondensaatorit, °C;
- Suitsugaaside temperatuur peale kondensaatorit, °C;
- Kaugkütte tagasivoolu temperatuur, °C;
- Kütuse niiskusesisaldus, %;
- Suitsugaaside kondensaatori võimsus, MW;
- Vee kulu läbi kondensaatori, m³/h;
- Vee temperatuur peale kondensaatorit, °C.

Mõõdetud andmete miinuseks on see, et vaadeldud perioodil ei esinenud Eesti talvele omast külma ilma, mis oleks tinginud kõrgemad temperatuurid kaugküttevõrgus. Kogu vaadeldava perioodi jooksul ei langenud kuu keskmine õhutemperatuur Tallinnas alla 2 °C ning temperatuurid kaugküttevõrgus ei tõusnud märgatavalt. Seega on vaadeldav temperatuurivahemik väike ning mudeli kehtivust on võimalik hinnata vaid väga kitsas vahemikus – 40 ... 49 °C.

Teiseks miinuseks see, et kuigi jaamas mõõdetakse kütuse niiskusesisaldust, siis ei ole võimalik kindlalt määrata kondensaatorisse siseneva suitsugaasi niiskusesisaldust, kuna jaama töö puhul ei ole eristatav milline koormatäis kütust täpselt millisel ajahetkel katlasse läks, seega ei ole eristatav, milline oli konkreetse kütuse niiskusesisaldus vastaval kondensaatori võimsuse mõõtmise ajahetkel. Seetõttu on tulemuste kontrollimisel tehtud järgmised üldistused:

- Katlasse läheb eelmisel päeval toodud kütus, seetõttu ei ole kasutatud pühapäeva ja esmaspäeva andmeid kuna nende päevade puhul pole teada, millise niiskusesisaldusega kütust kasutatakse;
- Kõikide andmete puhul kasutatakse päeva keskmisi tulemusi. Kütuse niiskuse puhul võetakse kõikide eelmisel päeval toodud koormate niiskusesisalduse keskmine. Kasutatud ei ole päevi, mil niiskusesisaldus koormate lõikes varieerus üle 5%, et vältida ebatäpsusi arvutustes.

3.1.3 Kütuse andmed

Vaadeldud ajaperioodil kasutati Mustamäe Koostootmisjaamas kütusena puiduhaket, mille keskmine niiskusesisaldus oli 40,5%. Jaamas kasutatava kütuse kuivaine ja valemi 14 alusel leitud kütuse tarbimisaine koostis on toodud tabelis 5.

Tabel 5. Jaamas kasutatava kütuse koostis

	C (kg/kg)	H (kg/kg)	N (kg/kg)	S (kg/kg)	O (kg/kg)	Tuhk (kg/kg)	Niiskus (kg/kg)
Sisaldus kuivaines	0,496	0,065	0,002	0,000	0,432	0,006	0,032
Sisaldus tarbimisaines	0,295	0,039	0,001	0,000	0,257	0,004	0,405

3.1.4 Suitsugaaside arvutus

Suitsugaaside koguse ja koostise määramiseks on võimalik kasutada nii punktis 2.1.2 kirjeldatud standardi DIN EN 12952-15 meetodikat kui ka punktis 2.1.3 kirjeldatud stöhhiomeetrilist meetodit. Üksikasjalikud arvutused mõlema meetodika järgi on toodud lisas 2. Järgnevalt on pikemalt kirjeldatud suitsugaaside näitearvutust stöhhiomeetrilisel meetodil kasutades vaadeldud perioodil esinenud keskmist puiduhakke niiskusesisaldust.

Stöhhiomeetrilise meetodi aluseks on kütuse põlevaine põlemisreaktsioonide (valemid 10, 11) põhjal teostatud arvutused. Nende arvutuste teostamiseks on esmalt vaja teisendada kütuse tarbimisaines olevad ainekogused (kg/kg) ainehulkadeks (mol/kg) (punkt 2.1.3 samm 2, valemid 12, 13). Puiduhakke puhul on tulemused toodud tabelis 6, kütuse niiskusesisaldus on 40,5 %.

Tabel 6. Ainehulgad kütuse tarbimisaines.

	Süsinik C	Vesinik H ₂	Lämmastik N ₂	Hapnik O ₂
1 kg kütuses sisalduv aine kogus, kg/kg	0,292	0,038	0,001	0,254
1 kg kütuses sisalduv ainehulk, mol/kg	24,327	19,151	0,036	7,945

Järgmiseks on vaja leida põlemiseks vajaliku hapniku ainehulk (punkt 2.1.3 samm 3). Selleks on vaja kasutada reaktsioonivõrrandites (valemid 10 ja 11) leitud hapniku ees olevaid kordajaid. Kütuse põlevaine täielikuks oksüdeerumiseks vajaliku hapniku ainehulga leidmine on toodud tabelis 7.

Tabel 7. Põlemiseks vajaliku hapniku O₂ koguse leidmine

Kütuse põlevaine koostisosa	Vajalik hapniku O ₂ ainehulk (mol/kg)
Süsinik C	24,327
Vesinik H ₂	9,575
Vajalik hapnik kokku, maha arvestatud kütuses sisalduv hapnik, $n_{O_2,0}$	25,958

Punktis 2.1.3 samm 4 kohaselt on põlemiseks vajalik hapniku kogus $m_{O_2,pg}$ on leitud valemi 14 ja 15 abil (valemid 57, 58). Liigõhutegur $\alpha = 1,05$.

Põlemisõhu koostisosade kogused punkti 2.1.3 samm 5 järgi valemite 16 – 19 kohaselt on toodud tabelis 8. Kasutatud on tabelis 3 toodud õhu koostise andmeid.

Tabel 8. Põlemisõhu koguse leidmine

Põlemiõhu koostisosa	Koostisosa kogus (kg/kg)
Hapnik, $m_{O_2,pg}$	0,831
Lämmastik, $m_{N_2,pg}$	2,857
Argoon, $m_{Ar,pg}$	0,049
Süsihappegaas, $m_{CO_2,pg}$	0,002
Veeaur, $m_{H_2O,pg}$	0,028
Põlemisõhu kogus, m_{pg}	3,807

Kuivade suitsugaaside koostis ja koostisosade kogused on toodud tabelis 9.

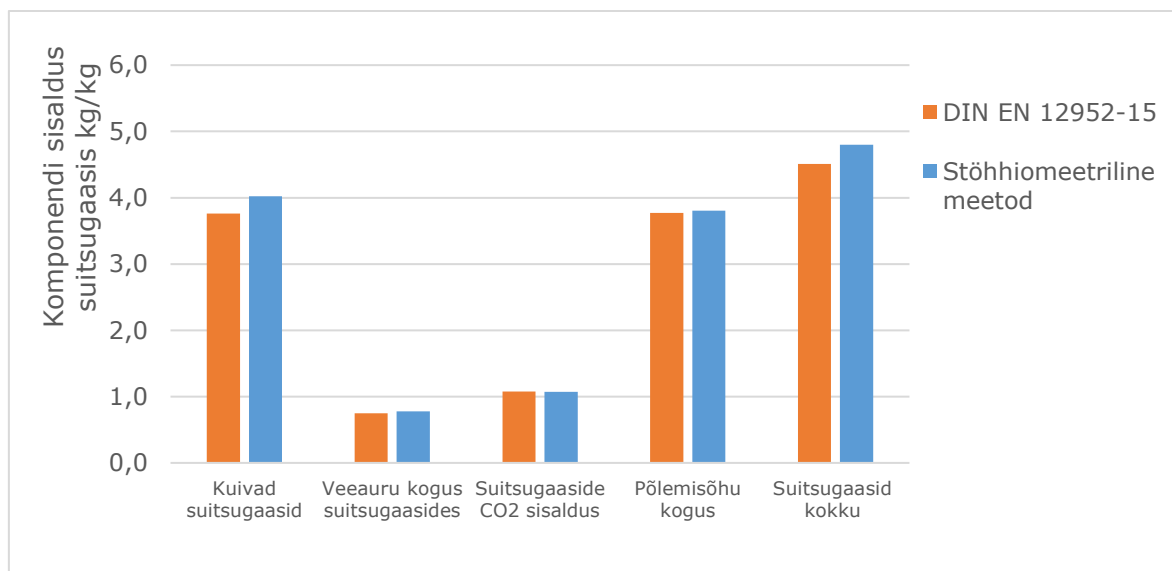
Tabel 9. Kuivad suitsugaasid

Suitsugaasi komponent i	Ainehulk n_i (mol/kg)	Kogus m_i (kg/kg)
Põlevaine oksüdeerumisest tekkiv CO_2 , n_{CO_2} , m_{CO_2}	24,327	1,07
Põlemisõhuga kaasnev CO_2 , $m_{\text{CO}_2,pg}$	-	0,002
Kütuses sisalduv lämmastik, n_{N_2} , m_{N_2}	0,037	0,001
Põlemisõhuga kaasnev lämmastik, $m_{\text{N}_2,pg}$	-	2,857
Põlemisõhuga kaasnev argoon, $m_{\text{Ar},pg}$	-	0,049
Suitsugaasidega väljuv liighapnik, $m_{\text{O}_2,sg}$	-	0,041
Kuivad suitsugaasid kokku, $m_{sg,kuiv}$	-	4,020

Järgnevalt on tabelis 10 toodud kahe eelneva suitsugaaside arvutamise meetodi võrdlus koos suhtelise erinevusega, suhtelise erinevuse leidmiseks on võetud tugiväärtuseks standardi DIN EN 12952-15 järgi leitud tulemused. Tabelis 10 toodud tulemused on kujutatud graafiliselt ka joonisel 12.

Tabel 10. Suitsugaaside arvutuse meetodite võrdlus

Komponent	DIN EN 12952-15	Stõhhiomeetriline meetod	Suhteline erinevus, %
Suitsugaasid kokku: μ_G, m_{sg}	4,510 kg/kg	4,797 kg/kg	6,4
Kuivad suitsugaasid: $(\mu_G - \mu_{H_2O}), m_{sg,kuiv}$	3,759 kg/kg	4,020 kg/kg	6,9
Veeauru kogus suitsugaasides: μ_{H_2O}, m'_{H_2O}	0,751 kg/kg	0,777 kg/kg	3,5
Suitsugaaside CO ₂ sisaldus: $\mu_{CO_2,o}, m_{CO_2,sg}$	1,077 kg/kg	1,072 kg/kg	0,5
Põlemisõhu kogus: μ_A, m_{pg}	3,773 kg/kg	3,807 kg/kg	0,9
Suitsugaaside niiskusesisaldus: X_{H_2O}, X'	0,166 kg _{H2O} /kg _{kuivad gaasid}	0,193 kg _{H2O} /kg _{kuivad gaasid}	16,2



Joonis 12. Suitsugaaside koostise hindamise meetodite võrdlus

Tabelis 10 esitatud tulemustest on näha, et mõningane erinevus tulemuste vahel esineb, seda põhiliselt just kuivade suitsugaaside koguse määramisel, mis toob vea sisse ka suitsugaaside niiskusesisalduse määramisse. Üheks põhjuseks võib tuua näiteks seda,

et stõhhiomeetrilises meetodis on arvesse võetud ka põlemisõhuga katelt läbivat argooni, mis lisab näiteks 1 kg puiduhakke põlemisel suitsugaasidele 0,05 kg, samuti võib põhjustada erinevust õhu lämmastiku sisalduse erinev hindamine. Põlemisreaktsioonidest sõltuvad arvutused ühtivad – seda näitab ka vähene erinevus põlemisõhu ja suitsugaaside CO₂ sisalduse arvutamisel.

Kuna edasistes arvutustes on täpsuste jaoks vaja teada ka suitsugaaside koostist lisaks summaarsele kogusele, siis edasised arvutused on tehtud stõhhiomeetrilise arvutuse tulemuste järgi.

3.1.5 Soojustagastuse arvutus puiduhakke näitel

Soojustagastuse arvutuse näite puhul on kasutatud mõõtmiste keskmisi andmeid, mis on koos mõõtmiste jooksul esinenud varieeruvustega toodud tabelis 11.

Tabel 11. Soojustagastuse näidisarvutuses kasutatud mõõdetud andmed

	Keskmine väärtus	Minimaalne väärtus	Suurim väärtus
Katla võimsus Q_{katel} (MW)	44,40	37,34	47,56
Kondensaatorisse sisenevate suitsugaaside temperatuur t' (°C)	160,31	151,00	164,30
Kaugkütte tagasivoolu temperatuur t'' (°C)	43,77	40,00	48,80
Kütuse niiskusesisaldus m_{H_2O} (kg/kg)	0,405	0,299	0,462

Kaugkütte tagasivoolu temperatuuri ja kondensaatorist väljuvate suitsugaaside temperatuuri suurim erinevus vaadeldava perioodi jooksul oli 5,9 °C, keskmine temperatuuride erinevus perioodi jooksul oli 0,63 °C erinedes ühtlaselt mõlemas suunas.

Tabelites 12 ja 13 on toodud tabelis 11 esitatud keskmiste väärtuste ja suitsugaaside arvutuste tulemuste põhjal leitud maksimaalse soojustagastuse tulemused. Tulemused tabelis 12 on latentse soojuse kohta ning tabelis 13 mittekontendseeruvate gaaside soojuse kohta. Arvutuste puhul on arvestatud, et kütusekulu on 4,415 kg/s (leitnud valemi 26 põhjal).

Tabel 12. Latentne soojus

	Kondensaatorisse sisenev voog	Kondensaatorist väljuv voog
Gaaside niiskusesisaldus x (kg _{H2O} /kg _{kuiivad gaasid})	0,777	0,247
Veeauru erisoojus c_p [kJ/(kg·K)]	1,980	4,180
Veeauru kondensatsioonisoosus r (kJ/kg)	2357,6	2406,0
Soojusvoog $Q_{H2O'}$, $Q_{H2O''}$ (kW)	9 179	2 824
Latentne soojus kokku Q_{H2O} (kW)	6 355	

Mittekondenseeruvate suitsugaaside jahtumisest eralduva soojuse hindamiseks on vaja teada nende gaaside erisoojusi kondensaatori temperatuuridel. Mittekondenseeruvate gaaside jahtumisest eralduva soojusvoo arvutus vastavalt valemile 28 koos vajalike suurustega on toodud tabelis 13.

Tabel 13. Mittekondenseeruvate gaaside soojusvoog

Gaasikomponent	Erisoojus t' [kJ/(kg·K)]	Erisoojus t'' [kJ/(kg·K)]	Gaasikomponendi kogus, $m_i \cdot b$ (kg/s)	Soojusvoog Q_i (kW)
Lämmastik	1,048	1,042	12,615	1541
Süsihappegaas	0,968	0,869	4,733	553
Hapnik	0,951	0,923	0,183	21
Argoon	0,521	0,521	0,215	13
Kokku	-	-	17,747	2128

Summaarne suitsugaaside kondensaatori soojusvoog Q_{SGKmax} vaatlusperioodi keskmistel parameetritel on valemi 24 alusel 8,483 MW.

3.1.6 Soojusvahetuse arvutus Mustamäe Koostootmisjaama suitsugaaside kondensaatori näitel

Soojusvahetuse arvutus on teostatud Mustamäe Koostootmisjaama suitsugaaside kondensaatori parameetrite põhjal kasutades punktis 2.3 kirjeldatud meetodikat. Mustamäe Koostootmisjaama suitsugaaside kondensaatori soojusvaheti joonised on toodud Lisas 3. Arvutamisel on kasutatud mõõdetud väärtuste keskmisi väärtusi, mis on esitatud tabelis 11.

Soojusvahetusprotsesside arvutused koos kõikide vajalike vahearvutustega (suitsugaase kirjeldavad samasusarvud Nu_{sg} , Re_{sg} , Pr_{sg} , Pr_t' , Pr_t'' ja kaugküttevett kirjeldavad samasusarvud Nu , Re , Gr , Pr ning temperatuurid t_k , t_1 , t_2) ja füüsikaliste parameetritega on toodud pikalt Lisas 2. Siinkohal on märgitud vaid termilise takistuse R leidmiseks vajalikud soojusülekandevegurid h_1 , h_2 ja soojusvahetuspinna termiline takistus ning soojusülekandeveguri h_1 leidmiseks vajalikud soojusülekandevegurid h_{Nu} , h_D ja h_k , mis on toodud tabelis 14.

Tabel 14. Soojusülekandevegurid ja termilised takistused

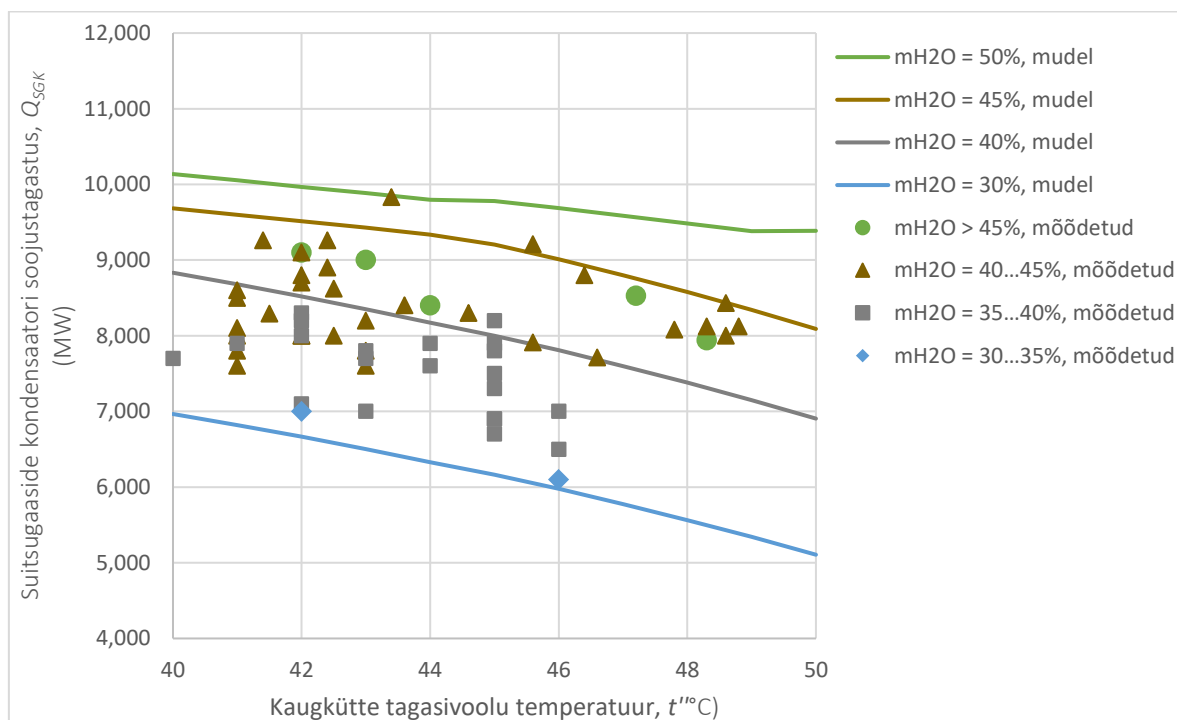
Suitsugaaside voolamise soojusülekandevegur h_{Nu} [kW/(m ² ·K)]	0,021
Difusiivne soojusülekandevegur h_D [kW/(m ² ·K)]	0,754
Kondensaadi soojusülekandevegur h_k [kW/(m ² ·K)]	9,648
Soojusülekandevegur gaasilt torupinnale h_1 [kW/(m ² ·K)]	1,112
Termiline takistus gaasilt torupinnale [(m ² ·K)/kW]	0,016
Soojusülekandevegur soojusvahetuspinna kaugkütteveele h_2 [kW/(m ² ·K)]	3,315
Termiline takistus torupinnalt kaugkütteveele [(m ² ·K)/kW]	0,302
Soojusvahetuspinna termiline takistus [(m ² ·K)/kW]	0,002
Termiline takistus R [(m ² ·K)/kW]	0,319

Keskmete andmete puhul on logaritmiline temperatuuride vahe Δt_{log} 42,4 K ning selle kohaselt on soojusvoog läbi pinna 132,78 kW/m².

Kondensaatoris on ühes torureas 76 toru ning toruridade arv on 13. Seega on kondensaatoris kokku 988 toru. Toru pikkus on 5500 mm. Kogu kondensaatori soojusvahetupind on kokku 60,4 m². Sellele vastavalt on kondensaatori tegelik soojustagastus Q_{SGK} 8,021 MW. Keskmiste parameetrite puhul on suitsugaaside kondensaatori efektiivsus ε 89% ja kasutegur η 95%.

3.2 Mustamäe koostootmisjaama mõõtmistulemused

Kõik vaadeldava perioodi jooksul mõõdetud tulemused on nähtavad tabeli kujul Lisas 4. Siinkohal on toodud mõõdetud tulemused joonisel 13. Võrdluseks on toodud ka mudeli poolt arvutatud tulemused erinevate kütuse niiskuse väärtuste korral. Mõõdetud andmed on grupeeritud niiskuse alusel, kuna soojustagastuse suurus sõltub palju ka kütuse niiskusesisaldusest.



Joonis 13. Mustamäe Koostootmisjaama suitsugaaside kondensaatori soojustagastus, mõõdetud andmed ja mudeli andmed, m_{H_2O} tähistab kütuse niiskusesisaldust (%)

Keskmine suhteline erinevus mudeli poolt leitud tulemuste vahel ja mõõdetud tulemuste vahel on 5,2% ning keskmine absoluutne erinevus on 0,431 MW. Järgnevalt on vaadeldud erinevusi kütuse niiskusesisalduse (tabel 15) ja kaugkütte tagasivoolu temperatuuri lõikes (tabel 16).

Tabel 15. Mudeli ja mõõdetud tulemuste võrdlus erinevate kütuse niiskusesisalduste lõikes keskmise tagasivoolu temperatuuri korral

	Kütuse niiskusesisaldus $m_{H_2O} = 30...35 \%$	Kütuse niiskusesisaldus $m_{H_2O} = 35...40 \%$	Kütuse niiskusesisaldus $m_{H_2O} = 40...45 \%$
Keskmine soojustagastus, mudeli arvutatud (MW)	6,056	7,373	8,435
Keskmine soojustagastus, mõõdetud (MW)	6,550	7,519	8,406
Keskmine suhteline erinevus (%)	7,5	1,9	5,8

Tabelitest 15 ja 16 võib järeldada, et mudel toimib kõige täpsemalt keskmiste tulemuste lähedastel tingimustel – tagasivoolu temperatuur 44 °C ja kütuse niiskusesisaldus 40%. Mudeli täpsust hinnates tuleb kindlasti ka täheldada, et soojustagastus sõltub oluliselt kahest parameetrist – kaugkütte tagasivoolu temperatuur ja kütuse niiskus. Kuna valim ei ole piisavalt suur, et vaadeldes vaid ühe parameetri lõikes teise parameetri suurused ühtlaselt jaotuks, siis on tabelites 15 ja 16 toodud võrdlused head pigem üldise hinnangu andmiseks, kuid mitte põhjalike järelduste tegemiseks. Parema ülevaate vaadeldud tulemuste võrdlusest saab jooniselt 13.

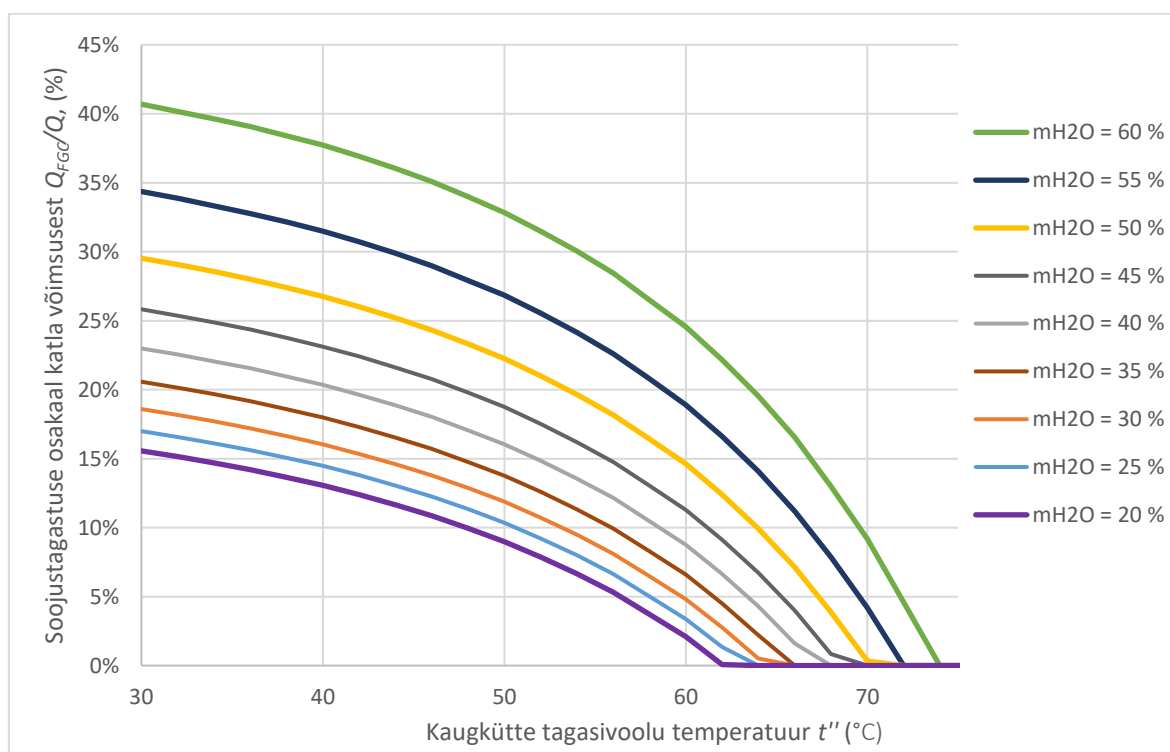
Tabel 16. Mudeli ja mõõdetud tulemuste võrdlus tagasivoolu temperatuuri alusel keskmise kütuse niiskuse korral

Kaugkütte tagasivoolu temperatuur t'' (°C)	41 °C	42 °C	43 °C	44 °C	45 °C	46 °C	47 °C	48 °C
Keskmine soojustagastus, mudeli arvutatud (MW)	8,074	8,078	8,135	8,204	7,478	7,343	8,693	8,396
Keskmine soojustagastus, mõõdetud (MW)	8,162	8,339	8,155	8,075	7,500	7,587	8,120	8,115
Keskmine suhteline erinevus (%)	5,2	6,5	4,7	4,3	4,8	5,0	7,1	4,2

3.3 Kaugkütte tagasivoolu ja soojustagastuse sõltuvus

3.3.1 Soojustagastuse osakaal katla võimsusest

Nagu on ka eelnevalt välja toodud, siis sõltub suitsugaaside kondensaatori soojustagastuse suurus kahest parameetrist – kütuse niiskuse sisaldusest ja jahutusvee (käesolevas töös kaugkütte tagasivoolu) temperatuurist. Joonisel 14 on näidatud kuidas mõjutavad mõlemad mainitud parameetrid soojustagastuse osakaalu katla võimsusest mudeli kohaselt.



Joonis 14. Modelleeritud soojustagastuse Q_{SGK} osakaal katla võimusest Q_{katel} erinevate kütuse niiskusesisalduste m_{H_2O} ja kaugkütte tagasivoolu temperatuuride t'' puhul.

Jooniselt 14 on näha, et soojustagastuse ja kaugkütte tagasivoolu temperatuuri vaheline sõltuvus ei ole lineaarne ning iga kütuse niiskusesisalduse puhul eksisteerib jahutamise temperatuur, mille puhul suitsugaaside kondensaatori kasutamine on mõttetu, kuna soojustagastus langeb nulli. Selle põhjuseks on see, et jahutustemperatuur on kõrgem kui suitsugaaside kastepunkt. See tähendab seda, et suitsugaasid ei kondenseeru ja soojustagastust ei toimu. Kõrgema niiskusesisalduse (50% ja kõrgem) puhul on see temperatuur kõrgem, madalate niiskusesisalduste (30% ja madalam) on see temperatuur madalam. Kõige levinuma kütuse niiskusesisalduse – 40%, on mainitud temperatuuriks 67 °C.

3.3.2 Primaarenergia säästupotentsiaal

Suitsugaaside kondensaatori kasutamise puhul ilmneb ka primaarenergia sääst, sest osa vajalikust soojusest tuleb kondensaatorist. Suitsugaaside kondensaatori kasutamisest tulenev primaarenergia sääst PES_{MWh} (MWh) 1 MWh katlaga toodetud energia kohta on leitav järgmiselt (valem 49)

$$PES_{MWh} = \frac{Q_{SGK} - Q_{\delta hk} - Q_{kaod}}{Q_{katel}} \quad (49)$$

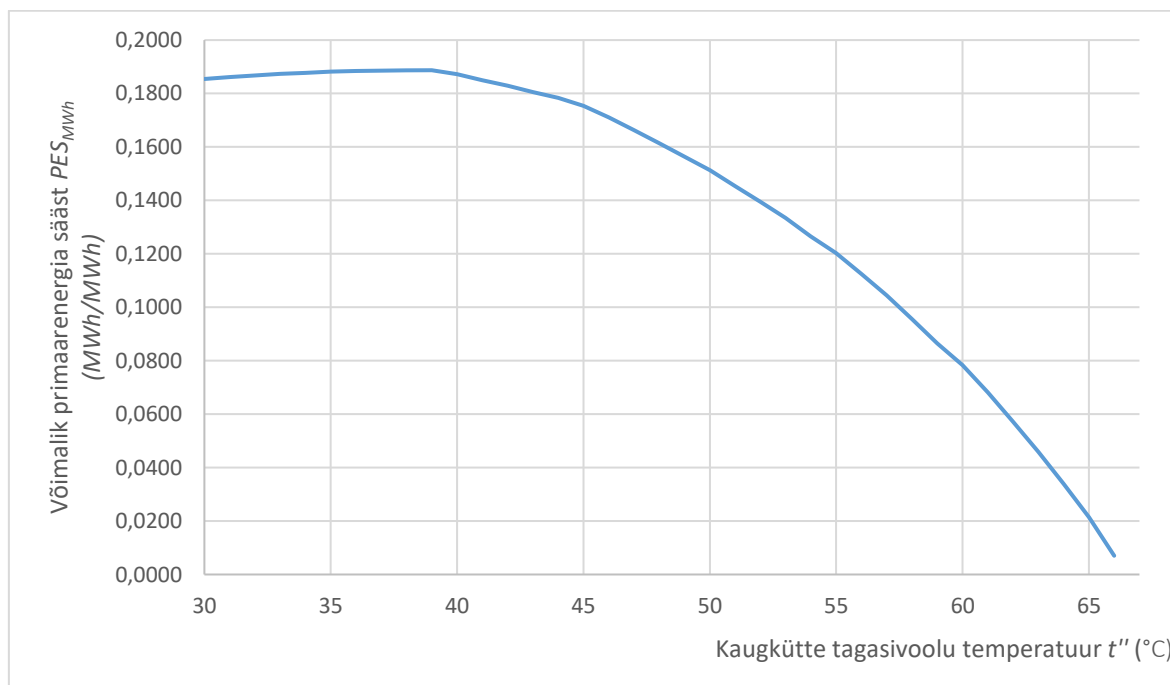
Kus

$Q_{\delta hk}$ on koos põlemisõhuga katlasse antud soojus (MW);

Q_{kaod} on katla soojuskaod, mis ei ole seotud suitsugaasidega (katla välisjahtumine, mittetäielikust põlemisest tulenevad kaod, tuha ja räbuga eemalduv soojus) (MW).

Suurus PES_{MWh} näitab mitu MWh primaarenergiat jäi kasutamata tänu suitsugaaside kondensaatori kasutamisele 1 MWh soojusenergia tootmiseks.

Joonisel 15 on toodud võimalik primaarenergia sääst 1 MWh soojusenergia tootmise kohta erinevatel kaugkütte tagasivoolu temperatuuridel keskmise kütuse niiskusesisalduse korral (40,5%). Graafiku kuju ühtib joonisel 14 toodud graafiku kujuga. 44 °C kaugkütte tagasivoolu korral on primaarenergia sääst 1 MWh kohta 0,18 MWh.



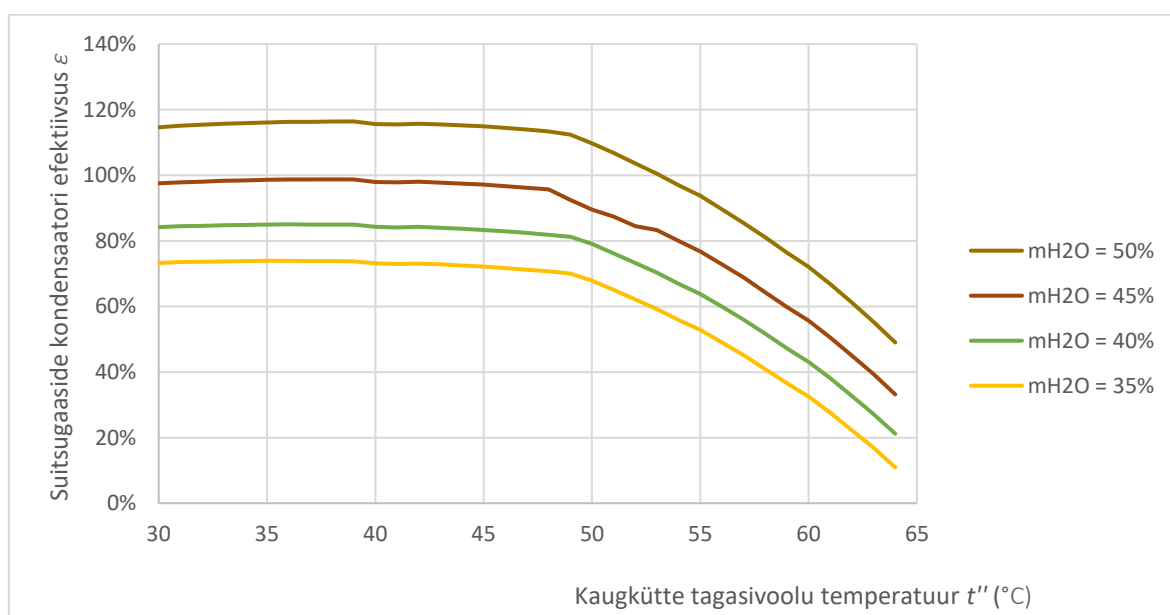
Joonis 15. Suitsugaaside kondensaatori poolne primaarenergia sääst 1 MWh soojusenergia tootmise kohta

3.3.3 Suitsugaaside kondensaatori kasutegur ja efektiivsus

Kuna käesoleva töö kontekstis on suitsugaaside kondensaatori puhul tegemist soojusvahetiga, siis sõltub selle kasutegur töörežiimist, mille määravad soojuskandjate alg- ja lõpptemperatuurid ning nende vooluhulgad. Suitsugaaside kondensaatori puhul esineb soojusülekanne protsessis ka faasimuutus, veeauru kondenseerumine, mis annab keskmiselt 75% kogu ülekantavast soojusest.

Modelleerimise tulemusena tuleb hästi välja asjaolu, et kõige optimaalsem on töötada keskmistel tingimustel, mille jaoks vaadeldav soojusvaheti on projekteeritud.

Joonisel 16 on esitatud suitsugaaside kondensaatori efektiivsus ε erinevate kütuse niiskusesisalduste $m_{H_2O, kütus}$ ja kaugkütte tagasivoolu temperatuuride t'' korral. Suitsugaaside kondensaatori efektiivsus ε on leitud punktis 2.3 toodud valemi 48 alusel.



Joonis 16. Suitsugaaside kondensaatori efektiivsus ε

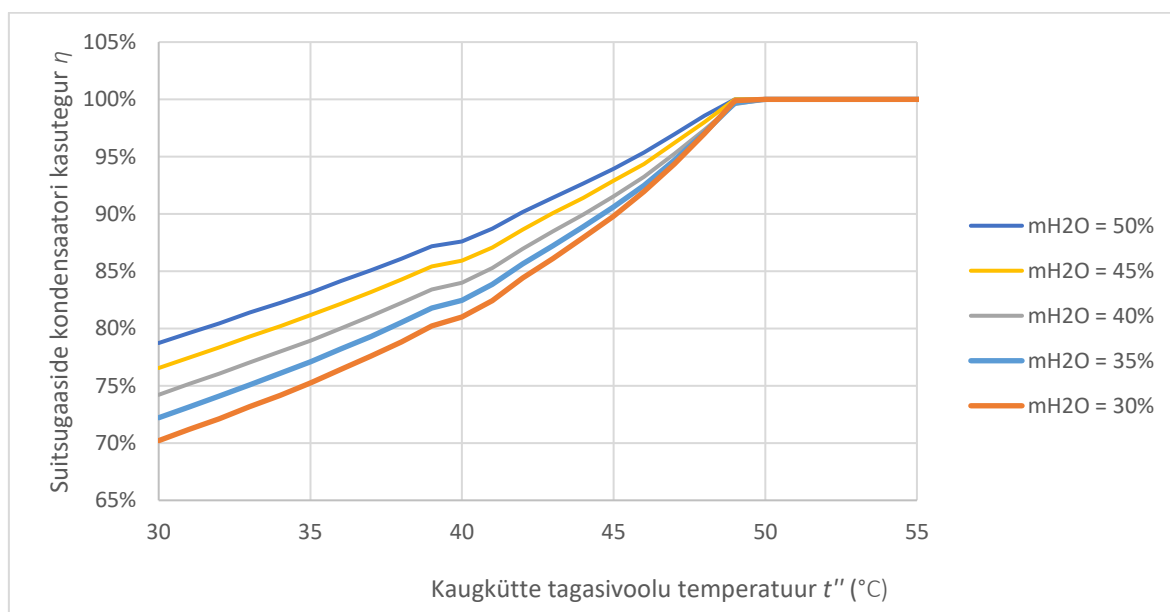
Efektiivsuse korral on suurte niiskusesisalduste korral võimalik saada üle 100% väärtusi, ka mõõdetud andmetes esines kohati nimiväärtusest suuremaid soojustagastuse väärtusi. Samas on üle 100% efektiivsused võimalikud vaid väga suure niiskusesisaldusega kütuse puhul, mis ei ole tavapärane. Suurema niiskusesisalduse korral on kondensaatorit läbiv suitsugaaside kogus suurem, kuid samas ei mõjuta see märkimisväärselt soojusülekanne mõjutavat voolamise režiimi, kuna 1% kütuse niiskuse $m_{H_2O, kütus}$ tõusu tõstab suitsugaaside mahulist kogust V_{sg} vaid 0,3%. Seega ei mõju kõrgema niiskusesisaldusega kütuse kasutamine suitsugaaside kondensaatorile tööle halvasti, kuid sellel ei ole sisulist mõtet, sest liiga suure niiskusesisaldusega kütuse põletamine võib mõjutada katla tööd ja kasutegurit.

Joonisel 16 on selgelt näha ka asjaolu, et kui kaugkütte tagasivoolu temperatuur ületab 49 °C, siis hakkab kondensaatori efektiivsus märgatavalt langema, kuna jahutava soojuskandja temperatuur hakkab lähenema kastepunkti temperatuurile ning

kondenseeruva veeauru hulk hakkab langema, kuna kõrgema kaugkütte tagasivoolu temperatuuri korral väljub rohkem veeauru kondensaatorist ning ei kondenseeru. Kui suitsugaaside kastepunkt t_k võrdub kaugkütte tagasivoolu temperatuuriga t'' , siis suitsugaaside kondensaatori soojustagastus võimalik ei ole.

Vaadeldava kondensaatori mudeli puhul on sellist olukorda ennetatud kondensaatori automaatika abil, mis lülitab sisse suitsugaaside eelniisutuse režiimi (*quench*) kui kaugkütte tagasivool tõuseb üle 49 °C. See tähendab et suitsugaasid on kondensaatorisse sisenedes juba peaaegu kondenseerud olekus – suhteline õhuniiskus on peaaegu 100% - ning veeaur kondenseerub kuna kastepunkti temperatuur t_k on suurema gaaside niiskusesisalduse korral kõrgem.

Suitsugaaside kondensaatori kasutegur η ehk tegeliku soojustagastuse Q_{SGK} ja maksimaalse soojustagastuse $Q_{SGK,max}$ suhe. Käesoleva töö kontekstis näitab kasutegur kui hästi sobivad soojuskandjate parameetrid – temperatuurid ja voolamise režiimid – soojusvaheti konstruktsiooniga. Joonisel 17 on esitatud suitsugaaside kondensaatori kasutegur erinevate kütuse niiskusesisalduste $m_{H_2O,kütus}$ ja kaugkütte tagasivoolu temperatuuride t'' korral. Suitsugaaside kondensaatori kasutegur on leitud punktis 2.3 toodud valemi 47 abil.



Joonis 17. Suitsugaaside kondensaatori kasutegur η

Madalat kasutegurit madalate kaugkütte tagasivoolu temperatuuride korral põhjendab termilise takistuse R (punkt 2.3 valem 32) suurenemine kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langemise korral. Termiline takistus R suureneb kuna soojusülekanne intensiivsus väheneb. Kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langemine mõjutab enim soojusülekanne soojusvahetuspinnalt kaugkütteveele h_2 . Soojusülekanne tegur h_2 hakkab kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langedes langema, kuna muutuvad vee voolamise režiimi mõjutavad parameetrid – langeb viskoossus ν (mõjutab Reynoldsi

arvu) ja tõuseb Prandtl'i arv (sõltub dünaamilisest viskoossusest μ , erisoojusest c_p ja soojusjuhtivusest k_{vesi}). Nende parameetrite muutumine kaugkütte tagasivoolu langemisel mõjutab soojusülekanne tegurit h_2 mõjutavat Nusselti arvu, mis hakkab langema.

Kütuse niiskusesisalduse $m_{H_2O, kütus}$ muutus mõjutab soojusülekanne kuumadelt suitsugaasidelt soojusvahetuspindadele h_1 , mis hakkab kütuse niiskusesisalduse $m_{H_2O, kütus}$ tõusmise korral langema ja tõstab kergelt termilise takistuse R väärtust. Samas on tegemist väga väikese muutusega, mis on tingitud kondensaadikihi paksuse suurenemisest ja mida ei ole joonisel 15 näha kuna kasutegurit mõjutab lisaks soojusülekanne intensiivsusele ka kondenseeritav soojushulk Q_{SGK} . Soojusülekanne teguri h_1 langus kütuse niiskusesisalduse m_{H_2O} tõusu tõttu ei kajastu joonisel 15 kuna suurema kütuse niiskusesisalduse $m_{H_2O, kütus}$ tõttu tõuseb märgatavalt ka tagastatav soojushulk Q_{SGK} ning see tõus ületab ka termilise takistuse R tõusu. Kütuse niiskusesisalduse tõus ei mõjuta soojusülekanne soojusvahetuspinnalt kaugkütteveele.

Maksimaalne kasutegur (100%) saavutatakse vaadeldava suitsugaaside kondensaatori puhul 49 °C juures, mis tähistab punkti, kus kogu suitsugaasidelt võimalik saadav soojus antakse üle kaugkütteveele. Seda on võimalik seletada termilisest takistuse R kaugküttevee poolse vähenemisega, mis sõltub vee füüsikalistest omadustest (viskoossus, soojusjuhtivus, erisoojus). Sisuliselt tähistab see olukorda, kus termiline takistus R on antud vooluhulga G korral piisavalt väike, et kogu soojus jõuab soojusvahetuspindadelt kaugkütteveele üle kanduda.

3.4 Järeldused

Käesolevas magistritöös koostatud mudeli põhjal arvatud tulemuste põhjal võib väita, et kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langus mõjutab positiivselt suitsugaaside kondensaatori efektiivsust (joonis 16). Kaugkütte tagasivoolu languse puhul tõuseb suitsugaaside kondensaatori soojustagastus (joonis 14) ja suureneb võimalik primaarenergia sääst (joonis 15). Soojustagastust mõjutab ka tugevalt kütuse niiskusesisaldus, samas on suure kütuse niiskusesisalduse puhul tegemist „null-soojustagastusega“, kuna kogu kütuse niiskus, mis kondensaatoris kondenseeritakse on eelnevalt katlas aurustatud ning kondensaator lihtsalt võtab katlas aurustamisele kulutatud energia tagasi. Kaugkütte tagasivoolu langusest tingitud soojustagastuse tõus aga katla tööd ei mõjuta, pigem võimaldab kaugkütte tagasivoolu langus suurendada kondenseeritava veeauru kogust ja seeläbi suurendada soojustagastust.

Magistritöö raames koostatud mudeli õigsust on kontrollitud Mustamäe Koostootmisjaamas mõõdetud suitsugaaside kondensaatori soojustagastuse põhjal. Mõõdetud andmed sobituvad koostatud mudelisse hästi ning keskmine suhteline erinevus mudeli poolt arvatud tulemuste ja tegelike tulemuste vahel on 5%. Erinevus mudeli poolt arvatud tulemustes ja tegelikes andmetes võib olla tingitud ebatäpsusest suitsugaaside niiskusesisalduse hindamisel, kuna suitsugaaside niiskusesisaldus sõltub kütuse niiskusesisaldusest, mis ei ole koostootmisjaama töö jälgimissüsteemis (SCADA) seotud kondensaatori tööga ning seetõttu ei ole võimalik eristada, milline kütusekoorem konkreetselt tekitab millised suitsugaasid. Suitsugaaside niiskusesisalduse hindamise aluseks on võetud seaduspära, et eelmisel päeval toodud kütus läheb järgmisel päeval põletamisele.

Teostatud soojusvahetuse arvutuste põhjal võib väita ka seda, et kõige efektiivsemalt töötab suitsugaaside kondensaator keskmistel parameetritel ning alates kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langemisest alla 39 °C võimalik primaarenergia sääst 1 MWh soojusenergia tootmise kohta ei suurene (joonis 15) ning soojustagastuse Q_{SGK} suurenemine 1 °C kaugkütte tagasivoolu languse korral on väiksem (joonis 14).

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös on hinnatud kaugkütte tagasivoolu temperatuuri languse mõju suitsugaaside kondensaatori efektiivsusele ja soojustagastusele.

Töös on keskendutud suitsugaaside kondensaatori võimaliku soojustagastuse mudeli loomisele, mille abil on võimalik hinnata soojustagastust mõjutavaid protsesse kondensaatoris. Mudeli puhul on hinnatud maksimaalse soojustagastuse suurust ja kondensaatoris toimuvaid soojusvahetusprotsesse. Koostatud mudelit on võimalik kasutada olemasolevale katlale sobiva nimivõimsusega suitsugaaside kondensaatori valimiseks ning olemasoleva suitsugaaside kondensaatori töö analüüsimiseks ja kontrollimiseks – näiteks on võimalik koostatud mudeli abil kontrollida, kas kasutatavad soojuskandjate voolamise režiimid võimaldavad suitsugaaside kondensaatori efektiivseima töö.

Koostatud mudeli põhjal on hinnatud suitsugaaside kondensaatori soojustagastuse osakaalu katla võimsusest, kondensaatori efektiivsust ja kasutegurit erinevate suitsugaaside niiskusesisalduste ja kaugkütte tagasivoolu temperatuuri korral. Hinnatud on ka võimalikku primaarenergia säästupotentsiaal 1 MWh soojusenergia tootmise korral. Tulemusena võib väita, et kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langetamine tõstab suitsugaaside kondensaatori efektiivsust ja suurendab soojustagastust.

Töö esimeses osas on kirjeldatud erinevaid suitsugaaside kondensaatoreid ning selgitatud lühidalt nende tööpõhimõtet. Selgitatud on ka suitsugaaside kondensaatori vajalikkust ning toodud on näiteid Eestis olemasolevatest suitsugaaside kondensaatoritest. Töö esimeses osas on antud ka lühike ülevaade samas valdkonnas tehtud uurimistöödest ja põhiprobleemidest.

Töö teises osas on kirjeldatud suitsugaaside kondensaatori töö analüüsimiseks koostatud matemaatilist mudelit. Loodud matemaatiline mudel koosneb kahest osast - võimaliku soojustagastuse suuruse hindamisest ja kondensaatori soojusvahetusprotsesside analüüsimisest. Matemaatilise mudeli kontrollimise käigus on võrreldud ka töö käigus loodud stöhhiomeetrilist suitsugaaside koostise määramise metoodikat olemasoleva katelde vastuvõtukatseid määravas standardis DIN EN 12952-15 toodud suitsugaaside koostise määramise metoodikaga ning leitud võimalikud erinevuste allikad. Lisaks kondensaatorisse sisenevale suitsugaaside koostisele on oluline määrata ka kondensaatorist väljuvate suitsugaaside niiskusesisaldus, mille leidmine on samuti kirjeldatud käesoleva töö teises osas. Teise osa lõpus on toodud ka soojusvahetuse arvutus. Töö käigus koostatud matemaatilise mudeliga tabelarvutusprogramm on lisatud tööle Lisa 2-na.

Töö kolmandas osas on kontrollitud koostatud mudelit Mustamäe Koostootmisjaama suitsugaaside kondensaatori töö andmete põhjal ning leitud, et mudeli poolt arvutatud tulemused on kooskõlas tegelike tulemustega. Analüüsitud on ka mudeli põhjal arvutatud tulemusi, mille põhjal võib väita, et kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langetamine mõjutab positiivselt suitsugaaside kondensaatori soojustagastust ja efektiivsust.

Kuigi soojustagastust mõjutab ka kütuse niiskusesisaldus, siis kaugkütte tagasivoolu temperatuuri langusest tingitud soojustagastuse tõus on suurema väärtusega, sest madalama kaugkütte tagasivoolu temperatuuri korral on võimalik tagastada rohkem kütuses sisalduva niiskuse aurustamisele kulutatud energiat. Kõrgema niiskusesisalduse korral on soojustagastus küll suurem, aga samamoodi on suurem ka katlas niiskuse aurustamiseks kulunud energia hulk. Kaugkütte tagasivoolu temperatuur aga katla tööd ei mõjuta ning seetõttu on sellest tingitud soojustagastus suurema väärtusega.

Töö tulemusena võib ka väita, et suitsugaaside kondensaatori näol on tegemist tehnoloogiaga, mille abil on võimalik märgatavalt tõsta suure niiskusesisaldusega kütust põletavate katelde efektiivsust ning sellega on võimalik tõhustada biomassil töötavate katlamajade ja koostootmisjaamade tööd.

Autori hinnangul on töös püstitatud hüpoteesid leidnud kinnitust.

Autor soovib tänada AS Utilitast vastutulelikkuse ja koostöö eest.

Autor on pälvinud käesoleva magistritöö kirjutamise eest Tallinna Raestipendiumi.

SUMMARY

This master thesis is focused on district heating return temperature influence on flue gas condenser efficiency and heat recovery.

The aim of this thesis is to create a mathematical tool for evaluation of possible heat recovery and heat and mass transfer processes in flue gas condenser. The created mathematical model can be used to estimate the nominal capacity for a boiler and to analyse existing flue gas condensers operation – for example the model can be used to check if the heat carriers' flow regimes are correct and temperatures are optimal to ensure that the condenser work efficiently.

The created model can also calculate heat recovery share of total boiler output, condenser efficiency in case of different fuel moisture content and district heating return temperature. It can also estimate potential primary energy savings due to heat recovery per 1 MWh produced energy. As a result can be stated that reduction of district heating return temperature will increase flue gas condenser heat recovery and primary energy savings potential.

In the first part of the thesis different scrubbers and flue gas condensers are described. There is also explained why using flue gas condensers is necessary and several examples of installed flue gas condensers in Estonia are given. There is also given a short overview of research main problems in the field

In the second part of the thesis the mathematical model is described. The created model consists of two main parts – the evaluation of maximum recoverable heat in flue cases and calculation of heat transfer processes in flue gas condenser. The model approbation includes comparison of two different flue gases composition evaluation methods – DIN EN 12952-15 and stoichiometric method, which was created within this thesis. There main differences of these methods are pointed out and explained.

In addition to evaluation of entering flue gases composition it is also important to evaluate the composition of leaving flue gases, which is also done in the second part of this thesis. In the end of second part there is heat transfer calculations. A calculation programme created within this thesis is added to the thesis in Annex 2.

In the third part of this thesis is model approbation and analysis of results. The model approbation is done by comparing the calculated results to data measures in Mustamäe Combined Heat and Power Plant. The approbation shows that the model is accurate. The analysis of the results shows that reduction of district heating return temperature increases flue gas condenser heat recovery and efficiency.

Fuel moisture content also increases heat recovery but increase of heat recovery due to district heating return temperature reduction is more important because when the return temperature is lower then it is possible to recover more energy. With higher

moisture content fuel the heat recovery is bigger but also is bigger the heat that is used in the boiler to evaporate the moisture in the fuel. The return temperature does not have any effect on boiler operation, so this is more important for heat recovery.

As a result can be also stated that flue gas condenser is an efficient technology for improving energy efficiency for combined heat and power plants and boilerhouses and it can significantly increase the efficiency of biomass boilers and combined heat and power plants.

According to the authors opinion all stated hypothesis are confirmed.

The author would like to thank AS Utilitas for good cooperation and data providing.

The author has been granted with Tallinn Raestipendium for this thesis.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Volkova A., Mašatin V., Siirde A. Methodology for evaluating the transition process dynamics towards 4th generation district heating networks. *Energy* 2018;150:253–61. doi:10.1016/j.energy.2018.02.123.
- [2] Köfinger M., Basciotti D., Schmidt R.R. Reduction of return temperatures in urban district heating systems by the implementation of energy-cascades. *Energy Procedia* 2017;116:438–51. doi:10.1016/j.egypro.2017.05.091.
- [3] Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 2014;68:1–11. doi:10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [4] Euroopa Liidu Teataja. Energiatõhususe direktiiv 2012/27/EL. 2012.
- [5] Euroopa Liidu Teataja. Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL, 19. mai 2010, hoonete energiatõhususe kohta. 2010.
- [6] Eesti Kaugkütte ja Jõujaamade Ühing. Kaugküttesüsteemi tõhususe määrgise statuut. 2018.
- [7] Sedlmayer I., Arshadi M., Haslinger W., Hofbauer H., Larsson I., Lönnermark A. Determination of off-gassing and self-heating potential of wood pellets – Method comparison and correlation analysis. *Fuel* 2018;234:894–903. doi:10.1016/j.fuel.2018.07.117.
- [8] Shi H., Wang Y., Chen J., Huisingh D. Preventing smog crises in China and globally. *Journal of Clean Production* 2016;112:1261–71. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.068.
- [9] UNECE. The convention on long-range transboundary air pollution. 1979. doi:10.1017/CBO9780511494345.009.
- [10] Euroopa Liidu Teataja. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv (EL) 2015/2193, - 25. november 2015, - keskmise võimsusega põletusseadmetest õhku eralduvate teatavate saasteainete heite piiramise kohta. 2016.
- [11] Euroopa Liidu Teataja. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv (EL) 2016/2284. 2020.

- [12] Woodard & Curran Inc. Treatment of Air Discharges from Industry. Industrial Waste Treatment Handbook, 2006, p. 335–61.
doi:<https://doi.org/10.1016/B978-075067963-3/50010-2>.
- [13] Miller B.G. Emissions Control strategies for power plants. Coal energy Systems, Academic Press; 2005, p. 283–392. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-012497451-7/50006-1>.
- [14] Afework B., Hanania J., Stenhouse K., Donev J. Dry scrubber 2018.
- [15] Crystec Technology Trading GmbH. Dry Exhaust Gas Scrubber 2020.
<https://www.crystec.com/ksicate.htm>. [15.05.2020]
- [16] Veidenbergs I., Blumberga D., Vigants E., Kozuhars G. Heat and Mass Transfer Processes in Scrubber of Flue Gas Heat Recovery Device. Environmental and Climate Technologies 2010;4:109–15. doi:10.2478/v10145-010-0025-4.
- [17] Carbo-tech Environmental Group Inc. Tray scrubber type TS n.d.
<https://www.carbo-tech.com/tray.htm>. [15.05.2020]
- [18] Terhan M., Comakli K. Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas. Applied Thermal Engineering 2016;100:1007–15. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.12.122.
- [19] Bionomic Industries Inc. Steam Drive - Waste Heat Recovery Systems 2020.
- [20] Envibat AB. Flue gas condensation 2020. <http://www.envibat.se/products/flue-gas-condensation/?lang=en#prettyPhoto>. [15.05.2020]
- [21] Paist A., Poobus A. Soojusgeneraatorid. Tallinn: TTÜ Kirjastus; 2009.
- [22] Scheuch. Energy and Heat Recovery With Eracs Maximum Energy Gain From Flue Gases 2019.
https://www.scheuch.com/uploads/tx_ecxbaseext/News/Scheuch_Folder_ERCS_E_Web.pdf. [15.05.2020]
- [23] Thermeta Service BV. Flue gas condenser 2020:3–4.
http://www.thermeta.nl/documents/FLDR_EKA0705.03-EN.pdf. [15.05.2020]
- [24] Babcock & Wilcox Vølund AB. Condensing scrubbers n.d.
<http://www.gmab.se/flue-gas-condensation/condensing-scrubbers/>. [15.05.2020]

- [25] Blumberga D., Vigants E., Veidenbergs I. Analysis of flue gas condenser operation. *Latvian Journal of Physics Technology and Science* 2011;48:58–65. doi:10.2478/v10047-011-0028-3.
- [26] Lin C.X., Wang D., Bao A. Numerical modeling and simulation of condensation heat transfer of a flue gas in a bundle of transport membrane tubes. *International Journal of Heat Mass Transfer* 2013;60:41–50. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.12.053.
- [27] Priedniece V., Kirsanovs V., Dzikēvičs M., Vīgants Ģ., Veidenbergs I., Blumberga D. Experimental and analytical study of the flue gas condenser - Fog unit. *Energy Procedia* 2019;158:822–7. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.215.
- [28] Vannoni A., Sorce A., Bosser S., Buddenberg T. Heat recovery from Combined Cycle Power Plants for Heat Pumps. *E3S Web Conference* 2019;113:1–9. doi:10.1051/e3sconf/201911301011.
- [29] Prodanuks T., Vitolins V., Veidenbergs I., Blumberga D. Comparison of theoretical and practical energy efficiency values in indirect contact gas condensing unit. *Energy Procedia* 2017;128:520–4. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.072.
- [30] Vigants G., Veidenbergs I., Vigants E., Blumberga D. Cost Analysis of a Wood Chip Boiler House with a Gas Condenser. *Energy Procedia* 2015;75:1214–20. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.159.
- [31] Vitali Feditsenkov. AARDLA KATLAMAJA SUITSUGAASIDE KONDENSAATORI EFEKTIIVSUSNÄITAJAD. Eesti Maaülikool, 2014.
- [32] Paraschiv L.S., Serban A., Paraschiv S. Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition. *Energy Reports* 2019. doi:10.1016/j.egyr.2019.10.016.
- [33] European Standards. DIN EN 12952-15:2003. 2003.
- [34] Schluckner C., Gaber C., Landfahner M., Demuth M., Hochenauer C. Fast and accurate CFD-model for NO_x emission prediction during oxy-fuel combustion of natural gas using detailed chemical kinetics. *Fuel* 2020;264:116841. doi:10.1016/j.fuel.2019.116841.
- [35] Käär H., Paist A., Mikk I., Poobus A., Tiikma T. Soojus- ja massilevi. I osa. Põhikursus. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool; 1998.

- [36] Arro H., Koni A., Kull A., Mikk I., Ots A., Poobus A. Soojustehnika käsiraamat. Tallinn: Valgus; 1977.
- [37] Colburn A.P., Hougen O.A. Design of Cooler Condensers for Mixtures of Vapors with Noncondensing Gases. Industrial Engineering and Chemistry 1934;26:1178–82. doi:10.1021/ie50299a011.
- [38] Poobus A., Tiikma T. Soojus- ja massilevi II. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool; 2000.

LISAD

Lisa 1 – Matemaatilise mudeli skeem.jpg

Lisa 2 – Matemaatilise mudeli tabelarvutusprogramm.xlsx

Lisa 3 – Suitsugaaside kondensaatori soojusvaheti joonised.pdf