



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut
Soojusjõuseadmete õppetool

MSJ40LT

Martin Maidre

Põlevkivi ja kivisöe koospõletamine tööstuskatlas

Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn

2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Tõnu Pihu juhendamisel.

“.....” 2014 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” 2014 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” 2014 a.

..... allkiri

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2014 aasta 6 semester

Üliõpilane: Martin Maidre, 103838

Õppekava: MASB02

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: juhtivteadur Tõnu Pihu

Konsultandid: -

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Põlevkivi ja kivisöe koospõletamine tööstuskatlas

The co-combustion of oil shale and coal in industrial boiler

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Balti elektrijaamas läbi viidud katsed	7-22.11.13
2.	Saadud analüüside töötlemine, tähistamine ja konserveerimine	10-30.01.14
3.	Töö ülesehituse teoreetiline püstitamine	4-10.04.14
4.	Täiendavad konsultatsioonid, lisamaterjalide töötlemine	10.05.14
5.	Töö vormistamine	29.05.14

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Selgitada välja segukütuse põletamise mõju katla tehnilistele ja keskkondlikele parameetritele.

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt: 30.04.2014

Töö esitamise tähtaeg: 03.05.2014

Üliõpilane Martin Maidre /allkiri/.....

kuupäev.....

Juhendaja Tõnu Pihu /allkiri/.....

kuupäev.....

SISUKORD

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE	3
SISUKORD.....	4
1. SISSEJUHATUS	7
2. KÜTUSED.....	8
2.1. Põlevkivi.....	8
2.2. Põlevkivi kasutamine Eestis	9
2.3. Söed	10
3. KATSETUSED.....	12
3.1. Kütuse ettevalmistus ja proovide võtmine.....	13
3.2. Tuha proovide võtmine.....	15
3.3. Gaasianalüüs	16
3.4. Temperatuuride analüüs	16
4. TULEMUSED	17
4.1. Katsete kütus.....	17
4.2. Tuhk.....	20
4.3. Suitsugaasid	21
4.3.1. NO _x -de emissioon.....	21
4.3.2. Täiendavad emissioonid	23
4.4. Eriheitmed	25
4.5. Koldetemperatuurid	26
4.6. Järeldused segukütuste põletamist.....	28
5. KOKKUVÕTE	29
6. SUMMARY	30
7. KASUTATUD KIRJANDUS	31
8. LISAD.....	32
8.1. Lisa 1 Lämmastikheitmete kontsentratsioon 05 – 08.11.2013	32
8.2. Lisa 2 Lämmastikheitmete kontsentratsioon 09 – 12.11.2013	33
8.3. Lisa 3 Lämmastikheitmete kontsentratsioon 18 – 21.11.2013	34
8.4. Lisa 4 Lämmastikheitmete kontsentratsioon 22 – 23.11.2013	35
8.5. Lisa 5 Tuhkade analüüs	36

Tabel 2.1 Venemaa kivisüte klassifikatsioon.....	11
Tabel 4.1 Kivisöe keskmine koostis.....	17
Tabel 4.2 Põlevkivi keskmine koostis.....	17
Tabel 4.3 NO _x ja CO ₂ soojuslikud ja elektrilised eriheitedmed	26
Sele 3.1 kütuse ettevalmistuse ja etteande põhimõtteskeem	13
Sele 3.2 kütuse proovivõtu seadeldis	14
Sele 3.3 Foster Wheelri CFB katla tuhavõtupunktid.....	15
Sele 4.1 lämmastiku sisalduse sõltuvus kivisöe osakaalust segukütuses	18
Sele 4.2 Segukütuse granulomeetriline koostis.....	19
Sele 4.3 Elektrifitri 1. välja tuha orgaanilise süsiniku sisaldus	20
Sele 4.4 Lämmastikheitmete sõltuvus lämmastiku sisaldusest kütuses	22
Sele 4.5 CO sisaldus suitsugaasides (põlevkivi 7,5 MJ/kg).....	23
Sele 4.6 Esimese katseseeria ülipeente lendtuha osakeste suurusejaotus	24
Sele 4.7 Teise katseseeria ülipeente lendtuha osakeste suurusejaotus	24
Sele 4.8 CFB katla kolde temperatuur paremal pool seinas.....	27
Sele 4.9 Gaaside temperatuur parempoolsesse separaatorisse sisenemisel.....	27

EESSÕNA

Töö aluseks on Eesti Energia Narva Elektriijaamad AS Balti Elektriijaama 11. energiaplokis läbiviidud katsetused kivisöe ja põlevkivi koospõletamiseks. Kuna see projekt käsitleb mitmeid teemasid, mida soojusenergeetika üliõpilased ülikoolis omandavad, tuli huvi käsitleda antud katsetusi süvitsi.

Antud töös tuuakse välja erinevused, mis tekivad kahe erineva kütuse koospõletamisel keevkihtkatlas võrreldes tavakütuse- põlevkivi põletamisega.

Antud kohal soovin tänu avaldada juhendajale Tõnu Pihule toe ja nõuannete eest töö valmimisel.

1. SISSEJUHATUS

Eesti omapäraks on suur kodumaise kütuse kasutus. Kõige tähtsamaks on põlevkivi, mida kaevandati 2012 aastal 18,7 miljonit tonni. Enamus sellest rändas elektrijaamade kateldesse elektri tootmise eesmärgil, moodustades 81% kogu elektritootmisest [1].

Põlevkivi on karbonaatse ja terrigeense koostisega settekivim, mis kuulub sapropeelkütuste liiki. Põlevkivi puhul on alati tuntud huvi seda kui energiaallikat kasutada. Energia tootmisel eristatakse põlevkivil kahte eri suunda: põletamine ja utmine. Põletamine toimub õhu keskkonnas, utmine - ilma õhu juurdepääsuta. Põletamisel saadakse soojusenergia, utmise korral on energeetilisteks produktideks õli, gaas ja poolkoks [2].

Eestis ei ole eriti väärtuslike maavarasid, kuid selgelt eristub üks - põlevkivi. Põlevkivi on juba esimesest Vabariigist saati kindlustanud Eestile energiajulgeoleku ja olnud tööstuse mootoriks. Praegu kasutatakse Eestis põlevkivi kahel eri moel: elektritootmiseks ning õli- ja keemiatööstuse toormena. Elektritootmise tuumik asub Narvas, kus on kaks maailma suurimat põlevkivielektrijaama. Algselt töötasid jaamad, kasutades ainult tolmpõletustehnikat (pulverized firing - PF) kuid seoses karmistuvate keskkonnanõuete ja tehnika vananemisega otsustati kahe energiabloki vanad katlad renoveerida uute ringlevat keevkiht tehnoloogiat (ciculating fluidized bed- CFB) kasutavate Foster Wheeler OY kateldega – 2004. aastal alustasid renoveeritud plokid tööd [3].

Seoses süveneva energiakriisiga ja kõrgustesse tõusvate kütuse hindadega otsitakse aina enam viise, kuidas saavutada võimalikult efektiivne maavarade kasutamine. Eesti põlevkivi kasutamist suuresti haldava Eesti Energia seisukoht on olnud viimasel ajal selgelt eelisarendada õlitööstust, arendades välja Enefit 280 õlithase. Kuid aina suurema õlitööstuste põlevkivi tarbega tekib küsimus, kuidas hoida käigus Narva elektrijaamu. Ühe lahendusena on välja toodud põlevkivi rikastamisel tekkivate madalama kütteväärtusega jääkide segamist mõne kõrge kütteväärtusega kütusega saades nii keevkiht katelde jaoks sobiva kütuse. Praegusel juhul leiti kõige sobivamana segada omavahel kokku kivisüsi ja põlevkivi, et saada kütus, mille kütteväärtus jääks optimaalsesse vahemikku 8 – 11 MJ/kg, mis on Foster Wheeleri katelde kütteväärtuse piirideks. Selliste segukütuste põletamise kogemus CFB kateldes puudub, mistõttu viidi läbi täiemahulised katsed Balti Elektrijaama 11. energiabloki kateldes. Antud katsetes uuriti erinevate kontsentratsioonidega segukütuste mõju katla tehnilistele parameetritele ja keskkonna heitmetele

2. KÜTUSED

2.1. Põlevkivi

Põlevkiviks nimetatakse orgaanilist ainet nimega kerogeen sisaldavat settekivimit, mille lähteaineks on erinevate organismide orgaaniline mass. Põlevkivi kuulub sapropeelkütuste tekkeritta. Kuivaine koosneb kolmest osast: orgaanilisest, liiv-savi ja karbonaatosast.

Põlevkivil puudub kindel üldtunnustatud klassifikatsioon. Põlevkivi olulisteimateks tunnusteks loetakse:

- Kõrge mineraalne koosseis (30 – 70 %)
- Alumine kütteväärtus vahemikus (5-20 MJ/kg)
- Kõrge õlisaagikus (orgaanilisest ainest üle 20 %) [6]
- Halb lahustuvus orgaanilistest lahustites
- Kõrge lendosade sisaldus (85-90 %)

Põlevkivi on meretekkeline kütus. Põlevkivi orgaanilise osa aluseks peetakse mikroorganismide, enamasti sinivetikate, settimisel merepõhja tekkinud sadet, mistõttu on põlevkivi eripäraks suur vesiniku ja hapnikurikkus. Vesiniku ja süsiniku suhe jääb vahemikku 1,2 – 1,7, mis põhjustab tema suure õlisaagikuse termilisel lagunemisel [5].

Põlevkivi on väga levinud kütus. Maailmas on teada ligi 600 erinevat põlevkivi leiukohta. Kõige suuremaid varud on Ameerika Ühendriikidel (536 900 milj. tonni). Ameerikale järgnevad Hiina (47 600 milj. tonni) ja Venemaa (35 470 milj. tonni) [7]. Kuigi Põlevkivi varud on suured, on selle kütuse aktiivseid kasutajaid vähe kuna põlevkivi peetakse raskesti põletatavaks kütuseks. Põlevkivi energeetilisel kasutamisel on tema suurimateks puudusteks madal kütteväärtus ja kõrge tuhasisaldus. Kõige suuremaks põlevkivi tarbijaks on Eesti, kasutades iga aasta ära 15 miljonit tonni põlevkivi elektri ja õli tootmiseks [7]. Peale Eesti on põlevkivi arvestatavateks kasutajateks veel Hiina, Brasiilia ja Venemaa.

2.2. Põlevkivi kasutamine Eestis

Eesti on maailma kõige suurem põlevkivi kasutaja. Eestis kasutatakse Balti põlevkivibasseini leiduvat põlevkivi spetsiifilise nimetusega kukersiit, mida peetakse parimaks põlevkiviks tänu oma suhteliselt kõrgele kütteväärtusele ja õli saagikusele ning madala väävli ja niiskuse sisaldusele. Eesti põlevkivi ladestis ei ole homogeenne, vaid koosneb erineva kvaliteediga põlevkivikihtidest, mis vahelduvad erineva koostisega lubjakivi vahekihtidega. Üldine Eesti leiukoha põlevkiviladestise paksus on 2,5 - 3,2 m, millest 1,8 - 2,6 m moodustavad põlevkivi- ja 0,6 - 0,7 m lubjakivikihid [9].

Eestis saadakse põlevkivi allmaa kaevandustest ja karjääridest. Kaevandustest ja karjääridest tulevat esialgset mäemassiivi töödeldakse, eemaldades sellest lubjakivi ja seeläbi tõstes kütuse kütteväärtust. Seda protsessi nimetatakse rikastamiseks. Rikastamine põhineb põlevkivi ja lubjakivi erineval tihedusel. Kasutades raskemat magnetiidisuspensiooni, vajub eelnevalt purustatud raskem lubjakivi segu põhja samal ajal kui pinnal hulpiv põlevkivi korjatakse kokku ja suunatakse tööstustarbijani. Püstreordiga Kiviter tehnoloogiat kasutav õlitööstus vajab suuretükilist põlevkivi kütteväärtusega 11 – 11,5 MJ/kg; elektrijaamad, Enefit ning Petroter tehnoloogiad 8,2 – 8,6 MJ/kg kütteväärtusega energeetilist põlevkivi.

Põlevkivi kasutamine Eestis algas 19. sajandi lõpul, mil kukersiiti üritati kasutada vedurikolletes. Kuna esines suur küttepindade tahmumine, otsustati antud kütusest loobuda. Põlevkivi saavutas oma populaarsuse kütusena Eesti Vabariigi alguses, mil noor riik vajas sõltumatut energiakandjat. Tol ajastul kasutati restpõletustehnoloogiat ja kõige võimsamaks jaamaks jäi Tallinna elektrijaam elektrilise võimsusega 22 MW_{el} [2].

Nõukogude ajal evitati tolmpõletustehnoloogiaid, mida iseloomustavad kõrged koldetemperatuurid (1000 – 1400 °C) ja kõrge karbonaatide lagunemisaste, mistõttu on kõrged CO₂, SO₂ ja NO_x heitmed [3]. Põlevkivi tolmküttekatelde konstruktsiooni omapära ja eksploatatsioonilised raskused on seotud põlevkivi koostise ja struktuursete omadustega. Põhiprobleemideks on katla soojusvahetuspiindade tugev tuhasadestistega saastumine ja intensiivne kõrgtemperatuurne korrosioon ning erivõtete kasutamine piindade tuhasadestistest puhastamisel. Sellest johtuvalt jäävad põhi- ja vaheltauru temperatuurid madalaks, mis kajastub eelkõige elektrijaama madalas kasuteguris [4]. Kuna katelde eluiga oli lähenemas lõpule ja nende heitmed ei vastanud keskkonnanõuetele otsustati võtta kasutusele uus põletustehnoloogia ja ehitada täiesti uued katlad.

Kõige sobivamaks peeti keevkiht tehnoloogiat, milles on võimalik hästi põletada madalakvaliteetset kütust madalatel koldetemperatuuridel. Seoses põlevkivi hästi suure tuha osakaaluga tunnistati katseseadmete peal sooritatud katsete põhjal kõige sobivamaks ringlev keevkiht tehnoloogia. Ringleva keevkihi puhul on resti läbiva õhu kiirus kaks ja enam korda suurem kui mullilise keevkihi puhul. Vajalik resti pind aga sama arv kordi väiksem. Ringleva keevkihi puhul on gaaside kiirus kihis ja kolde ristlõikes enamiku kütuseosakest puhul suurem kui teine kriitiline kiirus, osakesed kanduvad kihist välja ja täidavad kogu kolde mahu. Neile lisanduvad ka tuha ja koksi osakesed mis uuesti koldesse satuvad. Tsirkuleeriva keevkihi puhul kasutatakse paremini ära kogu kolde mahtu kütuse osakeste põletamiseks ja väävliühendite sidumine kütuse mineraalosas leiduvate karbonaatsete ühenditega.

Enne uute energiablokkide konstrueerimist sooritati katsepõletusi Hans Ahlstromi 1 MW_{th} CFB katseseadmel Karhulas Soomes. Lisakatsed sooritati LLB Lurgi (Saksamaa) ja Briti Kolumbia ülikooli (Kanada) katsestendidel. Katsetuste põhjal selgus, et seoses madalate kolde temperatuuridega, mis jäävad 800 °C juurde, on põlevkivi karbonaatide lagunemisaste uutes CFB kateldes ~0,7. Kuna põlevkivis on hästi suur lubja osakaal: kaltsium-väävel moolsuhe on 8-10 siis seotakse praktiliselt kogu kütuse väävel lubjakivi poolt minimeerides väävelheitmed [4].

2.3. Söed

Söeks nimetatakse maismaataimedest tekkinuid tahket fossiilset kütust. Süte aluseks on sootaimede anaeroobsel humifitseerumisel tekkiv turvas, mis aja möödudes laguneb aina enam, rikastudes süsinikuga, pannes sellega aluse huumuskütustele turbast antratsiidini. Söed on väga levinud kütuse liik - 29,9 % maailmas kasutatavast primaarenergiast ning 41 % elektrienergiast toodetakse kasutades sütt. [8]

Kaevandatavate süte koostis on küllaltki keeruline ja seepärast pole olemas ka ühtset kõiki kütuseid hõlmavat klassifikatsiooni. Süte klassifitseerimise alusteks võib kasutada vitriiniidi tagasipeegelduse keskmist näitajat, niiske tuhavaba massi kütteväärtust või lendosade sisaldust kuivale tuhavabale massile. Söed liigitatakse lendosade sisalduse järgi üldkujul: pruunsüteks, kivisüteks ja antratsiidideks.

Kivisütt iseloomustab:

- Tarbimisaine kütteväärtus 20 - 30 MJ/kg
- Lendosade sisaldus üle 9 %
- Tuhasisaldus 5 – 30 %

Venemaal ja Ukrainas kasutatakse kivisütte liigitust lendosade sisalduse ja paakuvus omaduste järgi. Tabelis 2.1 on toodud Venemaa kivisütte klassifikatsiooni tabel.

Tabel 2.1 Venemaa kivisütte klassifikatsioon

Kivisöe liik	Tähistus	Lendosade sisaldus	Mittelenduva osa iseloomustus
Pikaleegiline	Д	36 ja enam	pulbrilisest, kuni kergelt paakuvani
Gaasisüsi	Г	35 ja enam	paakuv
Rasvane gaasisüsi	Г Ж	enam kui 31 (kuni 37)	paakuv
Rasvane	Ж	24...37	paakuv
Rasvane koksisüsi	К	25...33	paakuv
Koksisüsi	К	17...33	paakuv
Paakuv	OC	14...27	paakuv
Lahja	Т	9...17	pulbrilisest, kuni kergelt paakuvani
Kergelt paakuv	CC	17...37	pulbrilisest, kuni kergelt paakuvani

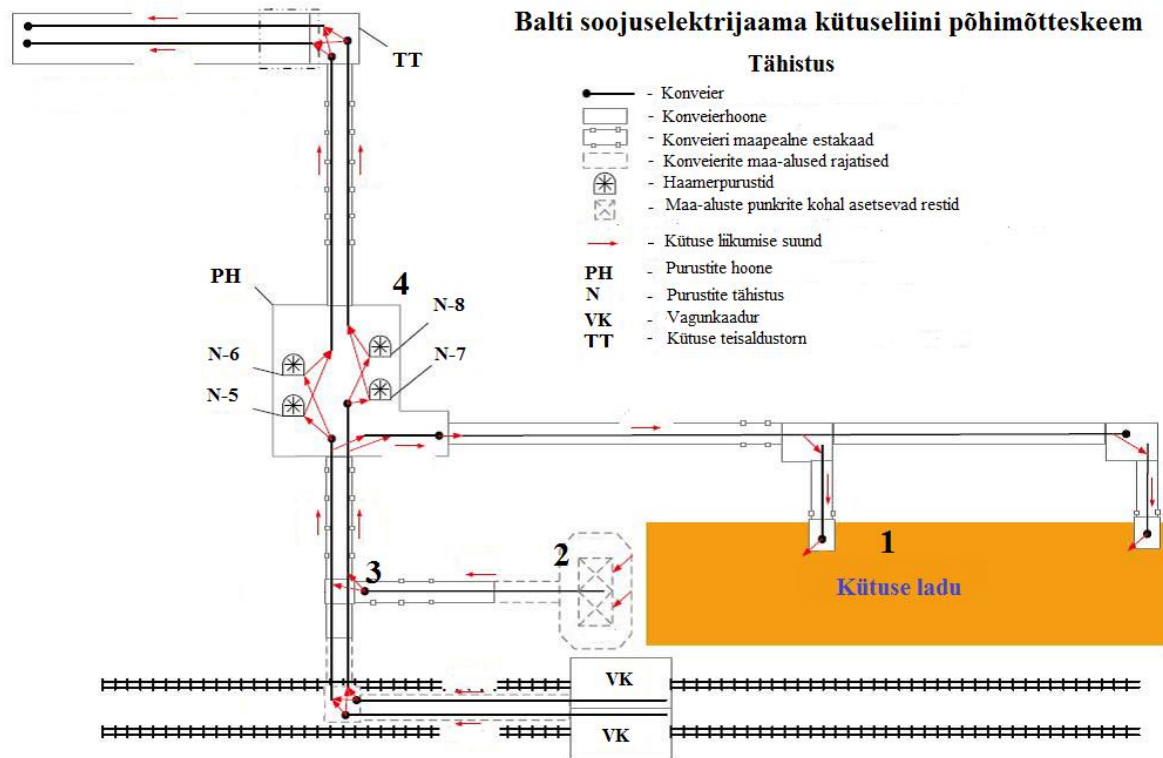
3. KATSETUSED

Põlevkivi ja kivisöe segukütuste põletamise mõju uuringuteks viidi Narva Elektriijaamades 2013. a. novembri ja detsembri kuus läbi katsepõletused Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituudi osalusel. Katsed toimusid Balti Elektriijaama 11. energiabloki ringleva keevkihiga kateldes. Segukütustega katsed jagunesid 7 eri faasi, kus põlevkivi kütteväärtus muutus 8,4 MJ/kg kuni 5,1 MJ/kg ning põlevkivi kivisöe segukütuse kontsentratsioon massi järgi vastavalt 95/5-lt kuni 80/20-ni. 7. katse, kus plaaniti põletada segukütust, kus põlevkivi kütteväärtus oli 5,1 MJ/kg ebaõnnestus, mistõttu puuduvad analüüsivad andmed sellest seeriast ja tulemuste osas seda katseseeriat ei käsitleta.

Iga katse käigus viidi läbi proovide kogumine kõikidest tuha väljalaadimise avadest, tehti gaasianalüüsid enne elektrifiltrit, võeti kütuseproovid enne purustit ning teostati mõõtmised peale elektrifiltrit, et saada teada ülipeente osakeste kontsentratsioon. Tuha ja kuivatatud kütuse granulomeetrised uuringud viidi läbi katse päeval jaama enda aparatuuri peal. Tuha ja kütuse keemilised ning elementaaranalüüsid viidi läbi peale katseid TTÜ STI keemialaboris ning XRD ja XRF analüüsid TTÜ Geoloogia Instituudis Litosfääruuringute osakonnas.

3.1. Kütuse ettevalmistus ja proovide võtmine

Tehnoloogilise protsessi põhimõtteline skeem on toodud joonisel Sele 3.1



Sele 3.1 kütuse ettevalmistuse ja etteande põhimõtteskeem

Põlevkivi ja kivisüsi jõuavad elektrijaama raudteetranspordiga, kus nad kaalutakse ning seejärel kas suunatakse konveieril kateldesse või ladustatakse üksteisest eraldi osaliselt lahtises laos (joonisel 1). Kivisöe ja põlevkivi suunamiseks konveierile, lükatakse neid eraldi buldooseri maapealsete restide kohale, kust need kukuvad maa-alusesse punkrisse ja lintkonveieri peale. Punktis 3 ühinevad erinevatelt konveieritelt tulevad kütused. Kütuste massisuhet reguleeritakse kohaletoimetavate konveierite kiirustega. Edasi liigub segukütus kahel autonoomsel konveieril, lindi laiusega 1400 mm ja kulgiirusega 2,2 m/s, maapealsesse purustite hoonesse (joonisel 4). Purustussõlmes on 4 otsevoolulist haamerpurustit, mis peenendavad segukütust. Purustussõlmedest liigub kütus edasi teisaldustorni, kus asub proovivõtja, millega võetakse kütuseproov, selle kütteväärtuse, niiskuse ja koostise määramiseks. Teisaldustornist siirdub kütus mööda konveiereid edasi katlapunkritesse.

CFB kateldes paikneb enne kütuse koldesse sisenemist veel lõppastme purustusseade, et tagada katlale vajaliku granulomeetriaga kütus. Selleks, et hinnata katlasse mineva kütuse granulomeetriat on peale ühte purustit katlal neli proovivõtu punkti, kust on võimalik võtta kütuse näidis. Kütuse proovide saamiseks peatati kütuse etteanne ja purusti. Sisestati kaks silindri kujulist proovivõtu seadeldist (Sele 3.2) suletud asendis ning taaskäivitati kütusesöötja ja purusti. Peale optimaalse töörežiimi saavutamist, avatakse proovivõtu seadeldise luugid ligikaudu 40 sekundiks, kogudes prooviseadmesse kütust. Proovi võtmise lõpetamiseks peatatakse uuesti kütusesöötja ja purusti töö, eemaldatakse proovivõtu seadeldis ning suletakse kasutatud avad.

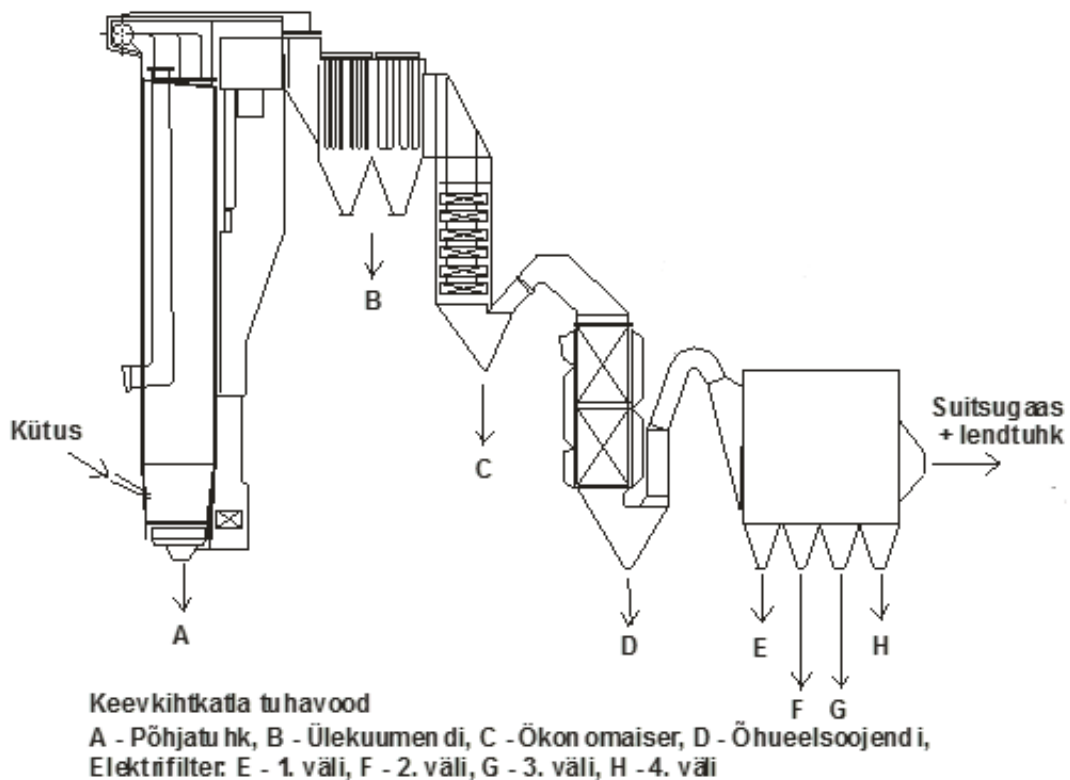


Sele 3.2 kütuse proovivõtu seadeldis

Saadud kütuse proovidele tehti sõelanalüüs kasutades selleks sõelumismasinat Fritsch Analysette 18 (sõelad avadega 0,090 – 14,000 mm) ja kaalusid Precisa 24000D SCS.

3.2. Tuha proovide võtmine

Põlemise efektiivsuse ja segukütuse mineraalosade käitumise hindamiseks võeti igal katsel tekkinud tuha proove (Sele 3.3). Proove võeti kaheksast punktist: põhjatuha kraapkonveierilt (A), ülekuumendi transportööridel (B), ökonomaiseril (C), õhuelsoojendi tuhapunkritest (D) ja elektrifiltri nelja erineva välja tuhapunkrist (E, F, G, H).



Sele 3.3 Foster Wheelri CFB katla tuhavõtupunktid

Saadud põhjatuha proovidele tehti sõelanalüüs kasutades selleks sõelumismasinat Fritsch Analysette 18 (sõelad avadega 0,090 – 14,000 mm) ja kaalusid Precisa 24000D SCS.

3.3. Gaasianalüüs

Tekkinud gaasilisi heitmeid mõõdeti suitsugaaside käigus õhuelsoojendi järel. Gaasianalüüsil registreeriti suitsugaasis sisalduvate O₂, CO₂, H₂O, CO, NO, NO₂, N₂O ja SO₂ sisaldused. Andmeid koguti iga minuti järel kasutades FTIR gaasianalüsaatorit GASMET DX4000N.

Ülipleene lendtuha osakeste suurusjaotuse hindamiseks teostati PM_{2,5/10} mõõtmised. Ülipleene lendtuha kontsentratsioone saamiseks viidi läbi mõõtmised mõlema katla filtrite järgses ühises gaasikäigus. Tuhaosakeste granulomeetria määramiseks kasutati HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950 mõõtevahendit.

3.4. Temperatuuride analüüs

Temperatuuride mõõtmine ja salvestamine jaama infosüsteemi toimus iga 10 minuti tagant. Kokku saadi temperatuuride andmeid kaheksakümne kaheksast erinevast kohast. Temperatuure mõõdeti erinevates punktides siseneval õhul, koldes, ülekuumendis, ökonomaiseris, õhuelsoojendis, elektrifiltrites ning lahkuvates gaasides.

4. TULEMUSED

Läbiviidud katsete tulemusel saadi andmeid CFB katla tööparameetrite kohta millest peale analüüsi võib teha järeldusi kõige optimaalsemate režiimide kohta ja segukütuse sobivusest antud katlatüübile. Tulemuste osas vaadeldakse suitsugaaside, tuha ja koldetemperatuuridega seotud efekte ning tuakse välja ilmnenud puudused katsete käigus.

4.1. Katsete kütus

Katsete käigus kasutatud kütus koosnes erinevates vahekordades ja erineva kütteväärtusega põlevkivi ja kivisöe segust. Katseseeriade eesmärgiks oli uurida põlevkivi rikastusjääkide põletamist, mille alumine kütteväärtus on 5,1 - 7,5 MJ/kg. Tavaliselt kasutatakse elektrijaamas kütusena põlevkivi alumise kütteväärtusega 8,2 - 8,6 MJ/kg. Antud katseseeriates kasutati Estonia kaevanduse poolt tarnitud põlevkivi alumise kütteväärtusega 8,4 ja 7,5 MJ/kg. Kivisöe tarnijaks oli Hakassia Söekaevandusettevõtte ja selle keskmine koostis on toodud tabelis 4.1. Keskmise põlevkivi koostis on toodud tabelis 4.2

Tabel 4.1 Kivisöe keskmine koostis

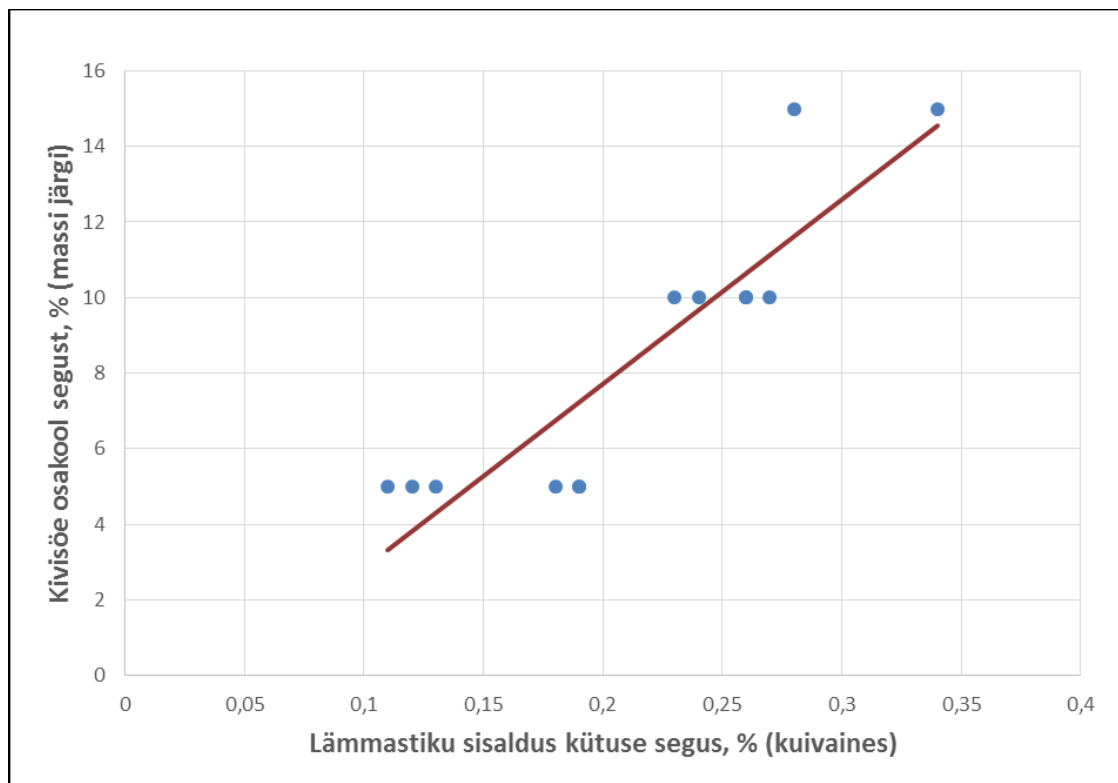
Kivisüsi Balti elektrijaamas (04.11.13-22.11.13)				
Parameeter	Liik	Tähis	Väärtus	Ühik
kütteväärtus	Tarbimisaine	Qi	19,44	MJ/kg
Tuhk	Kuivaine	A	19,0	%
Niiskus	Kuivaine	W	19,0	%
Süsinik	Kuivaine	C	62,7	%
Vesinik	Kuivaine	H	*	%
Väävel	Kuivaine	S	0,59	%
Lämmastik	Kuivaine	N	1,74	%

* Vesiniku koostist pole määratud

Tabel 4.2 Põlevkivi keskmine koostis

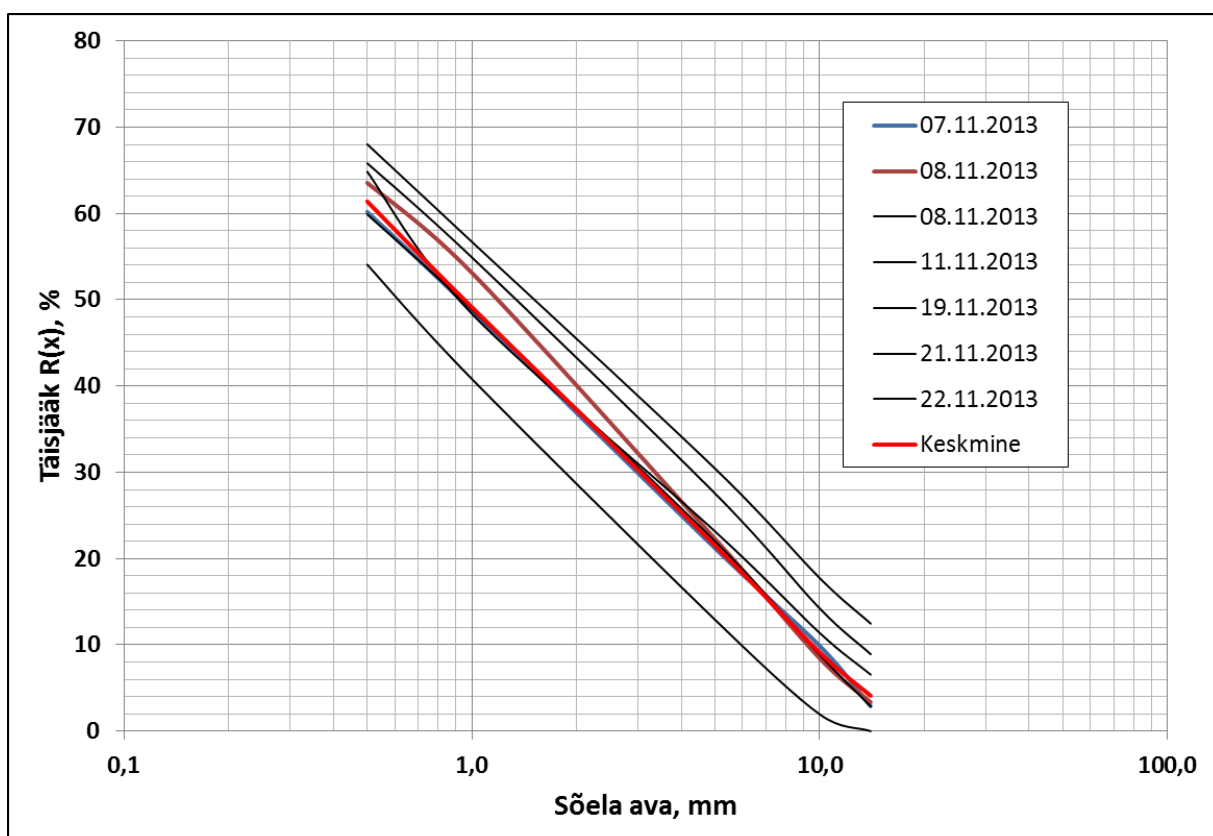
Põlevkivi proov 492-07 Katse H4				
Parameeter	Liik	Tähis	Väärtus	Ühik
kütteväärtus	Tarbimisaine	Q _i	8,69	MJ/kg
Tuhk	Kuivaine	A	48,8	%
Niiskus	Kuivaine	W	12,2	%
Süsinik	Kuivaine	C	29,59	%
Vesinik	Kuivaine	H	2,75	%
Väävel	Kuivaine	S	1,61	%
Lämmastik	Kuivaine	N	0,06	%

Põlevkivi ja kivisöe segukütuse põletamisel on probleemseks kohaks kivisöes leiduv suur lämmastiku osakaal. Graafikult Sele 4.1 on selgelt näha, et suurendades kivisöe osakaalu 5-lt protsendilt 15-le, suureneb lämmastiku sisaldus segukütuses peaaegu 3 korda.



Sele 4.1 lämmastiku sisalduse sõltuvus kivisöe osakaalust segukütuses

Koldesse jõudmiseks peab kütus läbima tee peal esimese astme haamerpurustid ning enne kollet ka veel lõppastme purusti, mis peab kindlustama kütuse mõõtmed alla 10 mm. Kuigi kivisöe jahvatatavustegur HGI (Hard Groove Index) on väiksem põlevkivist selgub graafikult Sele 4.2, et segukütuste granulomeetria jääb normide piiridesse, vastavalt mediaaniga 0,6 – 1,5 mm. Küll on aga märgatav suurematükilisuse kütuse (>10 mm) osakaalu kasv.



Sele 4.2 Segukütuse granulomeetriline koostis

4.2. Tuhk

Katsetest saadud tuhkadele viidi läbi keemilised ning elementaaranalüüsid TTÜ STI keemialaboris ning XRD ja XRF analüüsid TTÜ Geoloogia Instituudis Litosfääruringute osakonnas. Tuha analüüside puhul oli kõige suurem huvi määrata orgaanilise süsiniku hulk tuhka. Orgaanilise süsiniku sisalduse tõus näitab põlemise ebaefektiivsust, sest süsinik jääb põlemata ja väljub koos tuhaga. Põlevkivi sisaldab endas karbonaatühendeid, mistõttu erineb tema tuha orgaanilise süsiniku leidmine teistest fossiilsetest kütustest. Põlevkivi puhul leitakse elementaaranalüüsiga tuhas leiduv kogu süsinik ning eraldi karbonaatses CO₂-s sisalduv süsinik. Lahutades kogu süsinikust karbonaatses süsiniku, leitaksegi põlemata jäänud orgaaniline süsinik. Sele 4.3 on toodud elektrifiltri 1. väljas registreeritud orgaanilise süsiniku sisaldus.



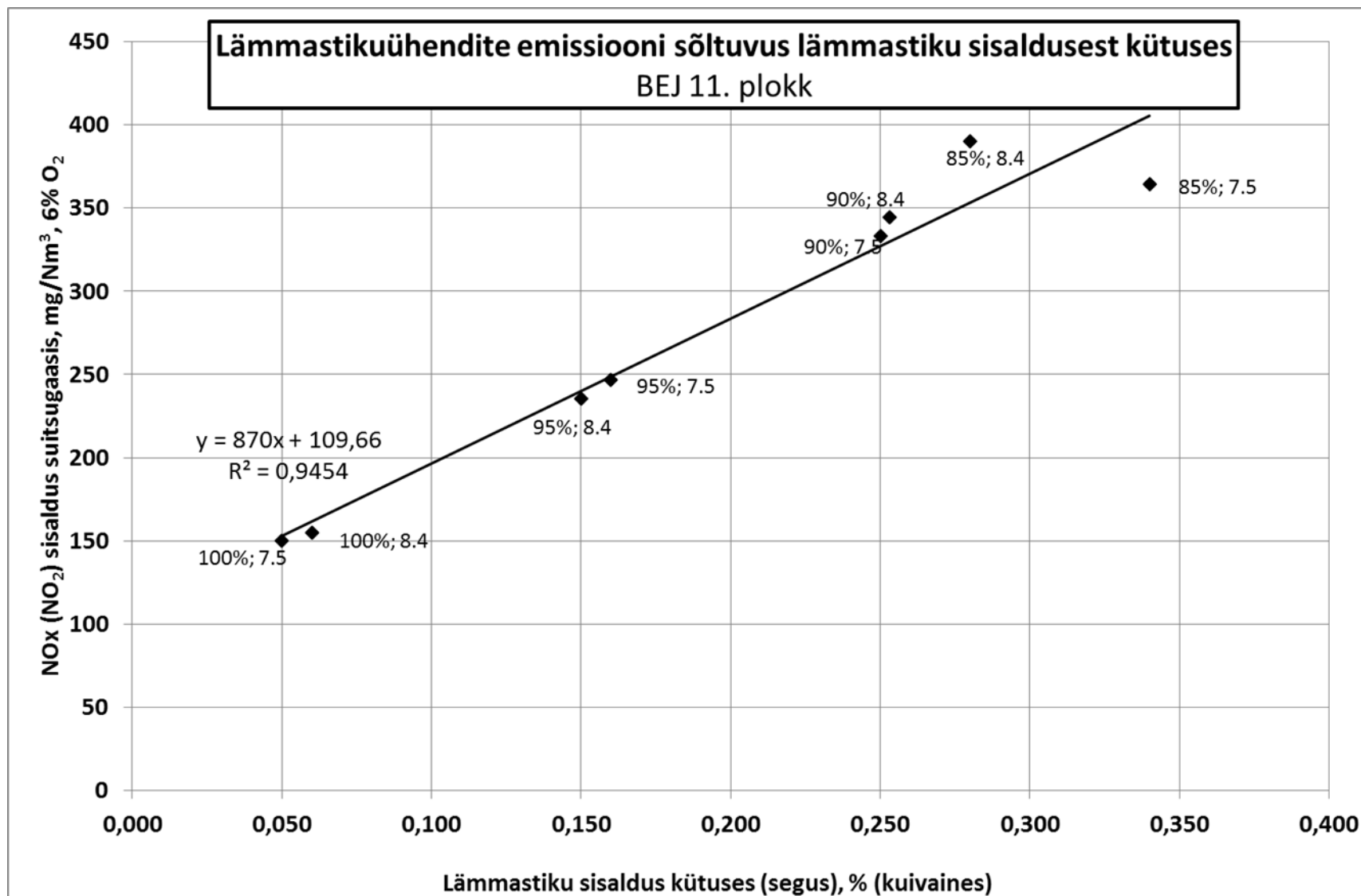
Sele 4.3 Elektrifiltri 1. välja tuha orgaanilise süsiniku sisaldus

Sele 4.3 näitab selgelt, et mida enam suureneb kivisöe hulk tuhas, seda enam jääb põlemata süsinikku tuhka. Katsete käigus paistis silma, et põhjatuhas leidus palju suuri poolpõlenud söe tükke. Suurte põlemata tükide leidmist võib põhjendada kivisöe madalama jahvatatavusteguriga, mistõttu ei jõua purustid alati kogu kütust vajalik määral purustada ning kütusesse satub suurematükilist kivisütt, mis siis kihist põhjatuha satub. Lisaks võib välja tuua kivisöe ja põlevkivi erineva lendosade sisalduse, mistõttu aeglasemalt süttiva kivisöe osakesed ei viibi piisavalt kihis enne kui kantakse tuha poolt koldest välja.

4.3. Suitsugaasid

4.3.1. NO_x-de emissioon

Segukütuste põletamisel toimus kõige suurem muutus gaasianalüüsis lämmastikheitmete osas. Keskkonnanõuetele vastavalt on praegusel hetkel lämmastik heitmete piiriks 200 mg/Nm³. Põletades CFB-s põlevkivi, jäävad NO_x heitmed vahemikku 45 – 55 mg/Nm³ [4]. Lisades aga ainult 5 % kivisütt, tõusevad lämmastikheitmed juba üle piirnormi. Heitmete drastilise suurenemise põhjuseks on kivisöes leiduva orgaanilise lämmastiku suur osakaal (kuivaines 1,5 – 1,9 %, võrdluseks põlevkivi kuivaines 0,04 – 0,06%). NO_x-de sisaldus erinevate katsefaaside puhul on toodud Lisades 1-4. Kivisöe osakaalu suurenemise ja lämmastikheitmete sõltuvus on toodud Sele 4.4-1.



Sele 4.4 Lämmastikheitmete sõltuvus lämmastiku sisaldusest kütuses

4.3.2. Täiendavad emissioonid

CO₂

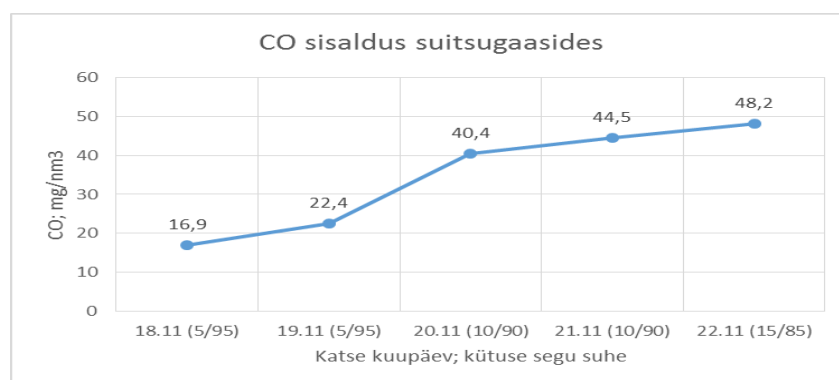
Atmosfääri paisatav CO₂ kogus sõltub põlevkivi sisaldava kütuse puhul kahest faktorist: orgaanilisest süsiniku hulgast ning karbonaatide lagunemise astmest.. Katse tulemustest selgub, et välja paisatava CO₂ kogus jääb samadesse piiridesse võrreldes ainult põlevkivi põletusega.

SO₂

Katsete käigus ei registreeritud üheski faasis SO₂ näitu üle 15 mg/Nm³, mis on gaasi analüsaatori veapiiriks ehk enamuse väävlis oli seotud tuhka. Selle põhjuseks on põlevkivi kütuses leiduva vaba aktiveeritud lubja suur osakaal (Ca/S=8-10), mis seob kütustes leiduva väävli. Katse tulemustest selgub, et antud kateldes võib kasutada veelgi suurema väävlisisaldusega kivisütt kui antud katses (keskmine kuivaine puhul 0,97%).

CO

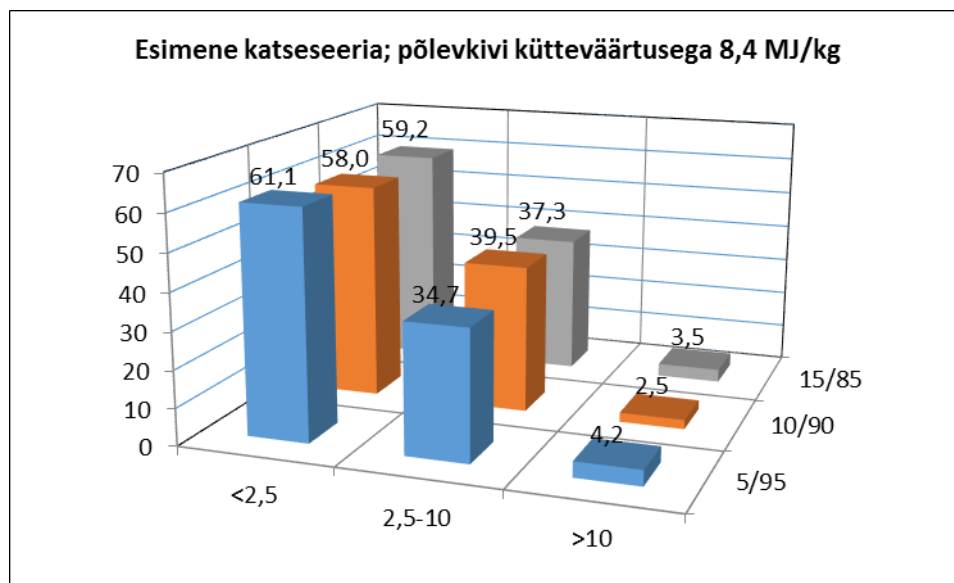
Vingugaasi sisaldus suitsugaasides näitab põlemisprotsesside täiuslikkust. Juhul kui hapniku juurdepääs kütuseni on koldes takistatud, tekib vingugaas. Katsetuste käigus selgus, et mida enam oli kütuses kivisütt, seda suurem oli CO sisaldus suitsugaasides. Sele 4.5 näitab, et kivisöe sisalduse tõusuga tõuseb ka CO sisaldus. Seda võib seletada kütuste erinevate lendosade sisaldusega, mistõttu kivisöe kütus põleb rohkem resti pealses ruumis. Kuigi tõus on selgelt seostatav kivisöe osakaalu suurenemisega ei ole tõus märkimisväärne, mistõttu tuleb täiustada õhu etteande süsteeme ainult juhul kui tekib vajadus pikemalt ja suurema kontsentratsiooniga segukütuseid põletada.



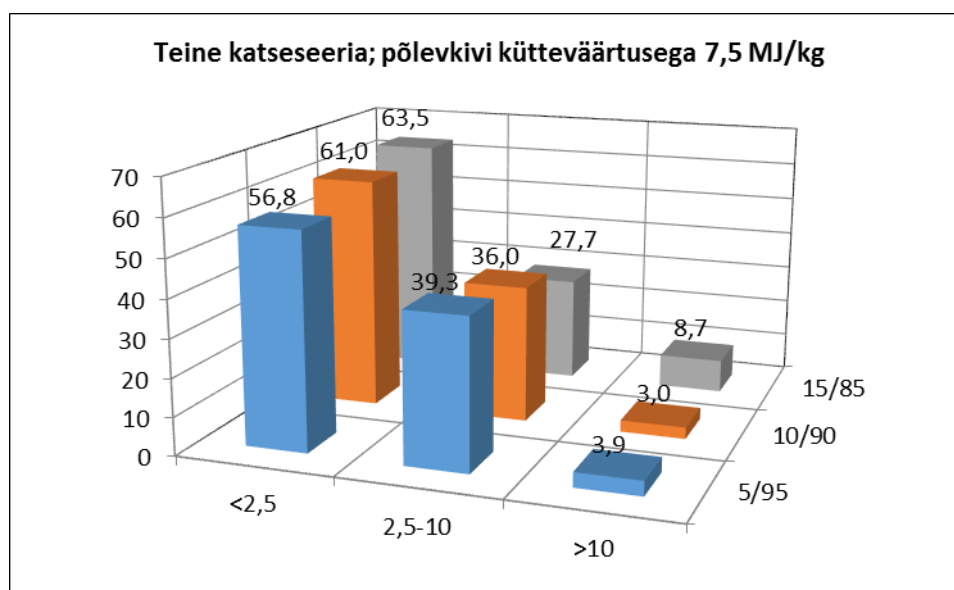
Sele 4.5 CO sisaldus suitsugaasides (põlevkivi 7,5 MJ/kg)

Ülpeene lendtuha osakeste suurusjaotus ja emissioon

Viidi läbi katsemõõtmised, et selgitada ülpeente lendtuha osakeste suurusejaotus ja emissioon. Katse tulemusel mõõdeti ülpeente tuhaosakeste absoluutkoguseks 47 mg/Nm³. Tuhaosakeste suhteline jagunemine on sarnane puhta põlevkivi põletamisel saadud tuha jagunemisele (Sele 4.6 ja Sele 4.7). Selge sõltuvus tingituna söe osakaalu suurenemisest kütusesegus puudub.



Sele 4.6 Esimese katseseeria ülpeente lendtuha osakeste suurusejaotus



Sele 4.7 Teise katseseeria ülpeente lendtuha osakeste suurusejaotus

4.4. Eriheitmed

Elektrijaamade töö planeerimise jaoks on tähtsad eriheitmed. Antud juhul on arvatud NO_x ja CO₂ emissioon ühe ühiku soojuse (kg/MJ) ja elektri (t/GWh) tootmisel.

CO₂ eriheide soojusühiku kohta arvutatakse valemiga:

$$CO_2 \left(\frac{kg}{MJ} \right) = \frac{CO_2(\%) \cdot 44,01}{22,26 / 100 \cdot 0,27 \cdot 1,4 \cdot 1,01} \quad (4.1)$$

CO₂ (%) – 6% O₂-le taandatud süsihappegaasi kontsentratsioon [%];

44,01 – CO₂ moolmass [g/mol];

22,26 – CO₂ moolmaht [dm³/mol];

0,27 - kuivade suitsugaaside maht [Nm³/MJ];

1,01 – suitsugaaside niiskuse tegur;

1,4 – tegur, arvestamiseks CO₂ teisendust 6% O₂-le;

CO₂ elektriühikule taandatud eriheide arvutatakse vastavalt:

$$CO_2 \left(\frac{t}{GWh} \right) = \frac{CO_2 \left(\frac{kg}{MJ} \right) \cdot 3600}{\eta} \quad (4.2)$$

CO₂ (kg/MJ) – CO₂ soojusühiku eriheide [kg/MJ];

3600 – üks tund sekundites [s];

η- energiabloki kasutegur [0,35];

NO_x eriheide soojusühiku kohta arvutatakse valemiga:

$$NO_x \left(\frac{mg}{MJ} \right) = NO_x \left(\frac{mg}{Nm^3} \right) \cdot 0,27 \cdot 1,4 \quad (4.3)$$

NO_x(mg/Nm³) – NO_x mõõdetuna [mg/Nm³];

0,27 - kuivade suitsugaaside maht [Nm³/MJ];

1,4 – tegur, arvestamiseks CO₂ teisendust 6% O₂-le;

NO_x elektriühikule taandatud eriheide arvutatakse vastavalt:

$$\text{NO}_x \left(\frac{\text{t}}{\text{GWh}} \right) = \frac{\text{NO}_x \left(\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right) \cdot 0,27 \cdot 1,4 \cdot 3600}{10^6 / \eta} \quad (4.4)$$

0,27 - kuivade suitsugaaside erimaht $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{MJ}} \right)$;

1,4 – tegur, arvestamaks CO₂ teisendust 6% O₂-le;

3600 – üks tund sekundites [s];

η – energiaploki kasutegur [0,35];

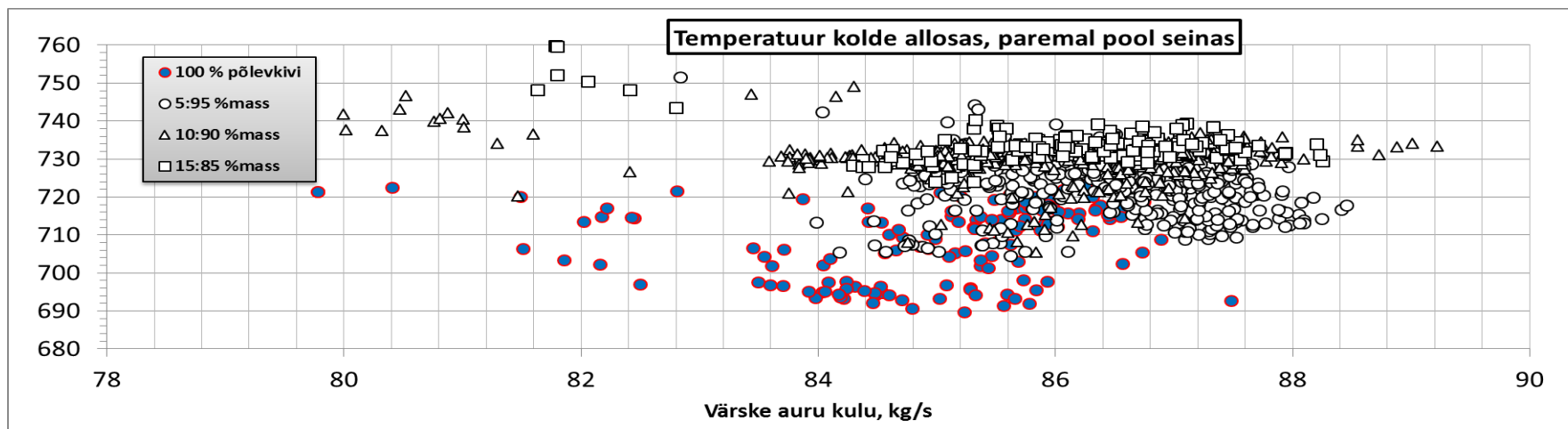
Katsete käigus saadud andmed ja eriheitmed on toodud tabelis 4.3

Tabel 4.3 NO_x ja CO₂ soojuslikud ja elektrilised eriheitmed

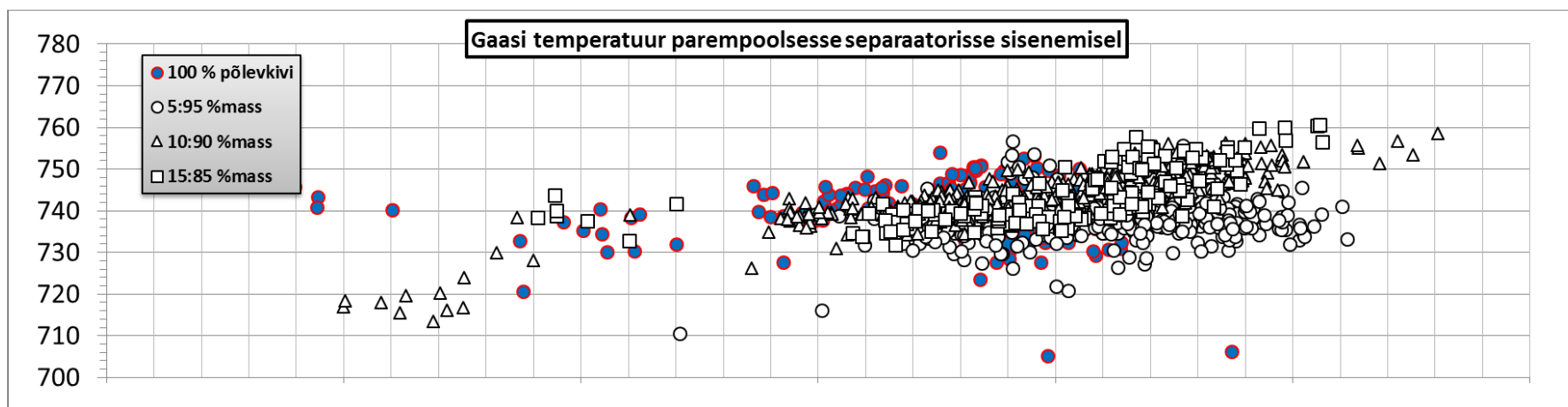
Kuupäev	Kütus	Kellaeg	NO _x	CO ₂ möödet	O ₂	CO ₂	NO _x eriheide		CO ₂ eriheide	
			mg/Nm ³	%	%	(6% O ₂) kg/MJ	mg/MJ	t/GWh, (0,35)	kg/MJ	t/GWh, (0,35)
5.11.2013	5/95 8,4	10:45-24:00	255	11,9	7,5	13,23	96,3	0,991	0,100	1 027
6.11.2013	5/95 8,4	2:30-19:30	263	11,9	7,8	13,54	99,4	1,022	0,102	1 051
7.-8.11.2013	5/95 8,4	10:30 - 01:30	249	12,0	7,2	13,05	94,1	0,968	0,099	1 013
8.-10.11.2013	10/90 8,4	15:30 - 24:00	355	12,2	7,2	13,27	134,4	1,382	0,100	1 030
11.-12.11.2013	15/85 8,4	2:30 - 1:30	405	12,2	7,2	13,27	153,1	1,574	0,100	1 030
18.11.2013	5/95 7,5	3:00-24:00	296	12,5	7,6	14,00	111,9	1,151	0,106	1 087
20.11.2013	10/90 7,5	4:30-24:00	372	12,3	7,4	13,58	140,6	1,446	0,102	1 054
22.-23.11.2013	15/85 7,5	2:30 -1:30	419	12,5	7,5	13,90	158,4	1,629	0,105	1 079

4.5. Koldetemperatuurid

Analüüsides elektri jaama andmesüsteemist saadud temperatuuride registreerimisi selgub, et põlemistemperatuurid tõusevad kõikjal - nii kihis kui ka koldes. Temperatuuri tõus ei ole eriti suur, tõustes kuni 30 °C, kuid selges sõltuvuses kivisöe osakaalust kütuses. Antud nähtus tuleneb kivisöe ja põlevkivi erinevustest. Tahkekütuse orgaaniline aine jagatakse kaheks – lendosaks ja koksiks [3]. Põlemisel eralduvad lendosad soodustavad süttimist ning intensiivistavad põlemist. Kivisöe lendosa hulk on tunduvalt väiksem põlevkivist, mistõttu väheneb ümbritsevas ruumis põlemise hulk ja suureneb aeglasema heterogeense põlemise osakaal, mistõttu viibivad osakesed koldes pikemalt ja põhjustavad temperatuuri tõusu. Sele 4.8 ja 4.9 on toodud koldetemperatuuride võrdlus erinevate kontsentratsioonidega segukütuse põletamise puhul.



Sele 4.8 CFB katla kolde temperatuur paremal pool seinas



Sele 4.9 Gaaside temperatuur parempoolsesse separaatorisse sisenemisel

4.6. Järeldused segukütuste põletamist

Katsetused tõid välja kitsaskohad, mis võivad tekkida kivisöe ja põlevkivi koospõletamisel. Antud alapunktis tuuakse välja täiendused, mis oleksid vajalikud, juhul kui antud kütuseid kavatsetakse hakata pidevalt elektrijaamas põletama.

Kütuste erinev kõvadus

Kuna antud katsetuste eesmärk oli põletada madala jahvatatavusteguriga lubjarikast põlevkivi ja kivisütt on selge, et antud jahvatamisvõimsustest ei piisa. 7. Katseseeria puhul, kus sooviti põletada põlevkivi kütteväärtusega 5,1 MJ/kg ületas suure paesisaldusega kütuse jahvatamine lõppastme veski võimekust, mis seiskus ja lasi suuretükilise kütuse otse koldesse, mis põhjustas peaaegu katla töö seiskumise. Seetõttu on kindlasti vaja tulevikus, kui on soovi antud kütuseid edasi põletada, rekonstrueerida vanad purustid või paigaldada lõppastme purusti ette täiendav purustusaste, et kindlustada katla töö jaoks sobiv kütuse granulomeetria.

DeNOx

Katsetulemustest selgus, et kivisöe lisamisel põlevkivile ei olda võimalised täitma lämmastikheitmete piirnorme. Selleks, et CFB tehnoloogias saaks konkreetset segukütust põletada on vajalik katelde juurde installeerida DeNOx süsteemid. DeNOx-i kasutamise eesmärgiks on siduda koldes tekkivad lämmastikühendid, pritsides selleks karbamiidi tsüklonisse, kus see läbi katalüsaatori muutub lämmastikuks ja veeks. Antud süsteeme on võimalik paigaldada CFB kateldele, kuid tegu oleks märkimisväärse investeringuga, mis vajab kindlasti lähemat analüüsi.

Tuha muutunud aluselisis

Põletades põlevkivi tekib tugevalt aluseline tuhk. Antud töös on jäänud käsitlemata nähtused, mis võivad tekkida kui lisaks aluselisele põlevkivi tuhale hakkab lisanduma happeline kivisöe põletamisel tekkiv tuhk kuna need on nende efektide mõju avaldumine ilmneb alles pikema aja vältel. Kindlasti on vaja viia läbi täiendavad uuringuid, uue vähenenud aluselisusega tuhale seoses sadestumisohu tõttu tuhatorustikes ning kivistumiskarakteristikutele tuha ladestusaladel.

5. KOKKUVÕTE

Käesolev töö põhineb Eesti Energia Narva Elektriijaamad AS Balti Elektriijaama 11. energiaplokis läbiviidud katsetustel kivisöe ja põlevkivi koospõletamiseks. Katsetuste aluseks oli soov arendada välja uus segukütus elektriijaamadele eesmärgiga hoida kokku kõrge kütteväärtusega põlevkivi, mida oleks võimalik kateldes põletamise asemel kasutada õli tootmisel.

Katsepõletused viidi läbi 2013. a. novembri ja detsembri kuus Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituudi osalusel. Segukütustega katsed jagunesid 7 eri faasi, kus põlevkivi kütteväärtus muutus 8,4 MJ/kg kuni 5,1 MJ/kg ning põlevkivi ja kivisöe segukütuse kontsentratsiooni muudeti massi järgi, vastavalt 95/5-lt kuni 80/20-ni. Katsete käigus võeti mitmeid tuha ja kütuseproove keemilise ja fraktsioonikoostise määramiseks, teostati suitsugaaside analüüs ja koguti andmeid katla andmehõiveseadmest.

Segukütuste põletamisel toimus kõige suurem muutus gaasianalüüsis NO_x heitmete osas. Lisades kütusele kivisütt ületati koheselt lämmastikheitmete piirnorm 200 mg/Nm³. NO_x heitmete suurenemise põhjuseks on kivisöes olev suurem lämmastiku osakaal (1,5 – 1,9 %, võrdluseks põlevkivis 0,04 – 0,06 %). Gaasianalüüsis uuriti lisaks CO_2 , SO_2 , CO ja ülipeente tuhaosakeste kontsentratsioone. Tulemustest selgus, et kogu kivisöes olev väävel seotakse põlevkivis oleva lubjakivi poolt. Ülejäänud uuritavates gaasides ei leitud mingeid märkimisväärseid muutusi võrreldes tavapõletusega.

Tuhka uurides ilmnes selgelt tuhas oleva orgaanilise süsiniku tõus, mis viitab põlemise ebatäiuslikkusele. Orgaanilise süsiniku tõusu on võimalik põhjendada kivisöe ja lubjarikkama põlevkivi madalamate jahvatatavusteguritega, mistõttu võib kütusesse sattuda suuri tükke ning kivisöe madalama lendosade sisaldusega, mistõttu ei ole kivisöe reageerimisaeg piisavalt pikk koldes viibimiseks.

Andmehõive temperatuure analüüsides selgub, et koldetemperatuurides toimub tõus. See on põhjendatav madalama lendosade hulga kivitõus, mistõttu väheneb ümbritsevas ruumis põlemise hulk ja suureneb aeglasema heterogeense põlemise osakaal.

Katsete tulemustena selgus, et põlevkivi ja kivisöe segukütuste põletamiseks on vajalik paigaldada DeNO_x süsteemid; rekonstrueerida vanad purustid või paigalda täiendav purustusaste, et kindlustada kõvema kütusesegu korral vajalik granulomeetria.

6. SUMMARY

This thesis is based on the test firings of coal and oil shale. The tests were carried out in the AS Eesti Energia Narva Elektriijaamad at the Balti power plant 11th energy unit. The goal of the tests was to develop for the power plants a new fuel mix, which uses oil shale with lower calorific value. It is necessary to spare high calorific oil shale in order to produce more shale oil instead of burning it in the boilers.

The test firings were carried out in November and December 2013 by the participation of Tallinn University of Technology, Department of Thermal Engineering. The firing experiments were divided into seven different phases, in which the heating value of oil shale was changed from 8.4 MJ/kg to 5.1 MJ/kg and the mixture of oil shale and coal from 95/5 up to 80/20 according to the mass concentration. During each test run regular samplings were gathered in order to determine the chemical and granular composition of the test fuel and ash. Flue gas analyses were carried out and data from boilers data acquisition systems were gathered.

The biggest change in composition of flue gas appeared to be the extensive rise of NO_x emission. By adding coal to the fuel mix, NO_x emissions immediately exceed the limit value of 200 mg/Nm^3 due to the excessive content of nitrogen in coal (1.5 to 1.9 %; to compare with oil shale, it is in the range of 0.04 to 0.06 %).

Gas analyses also covered CO_2 , SO_2 and CO emissions, also the concentrations of ultrafine particles in flue gas. The results showed that all of the sulfur of coal is bound by the limestone from oil shale, during the combustion process. All the other flue gases showed no significant changes compared to firing only oil shale.

The ash research revealed a rise of organic carbon in the ash, which refers to the burning imperfections.

Tests showed that in order to co-combustion oil shale and coal the installation of DeNOx systems is necessary. Due to lower grinding factors of limestone and coal, reconstruction of the old crushers or building new units is necessary to ensure the proper granular composition of the fuel.

7. KASUTATUD KIRJANDUS

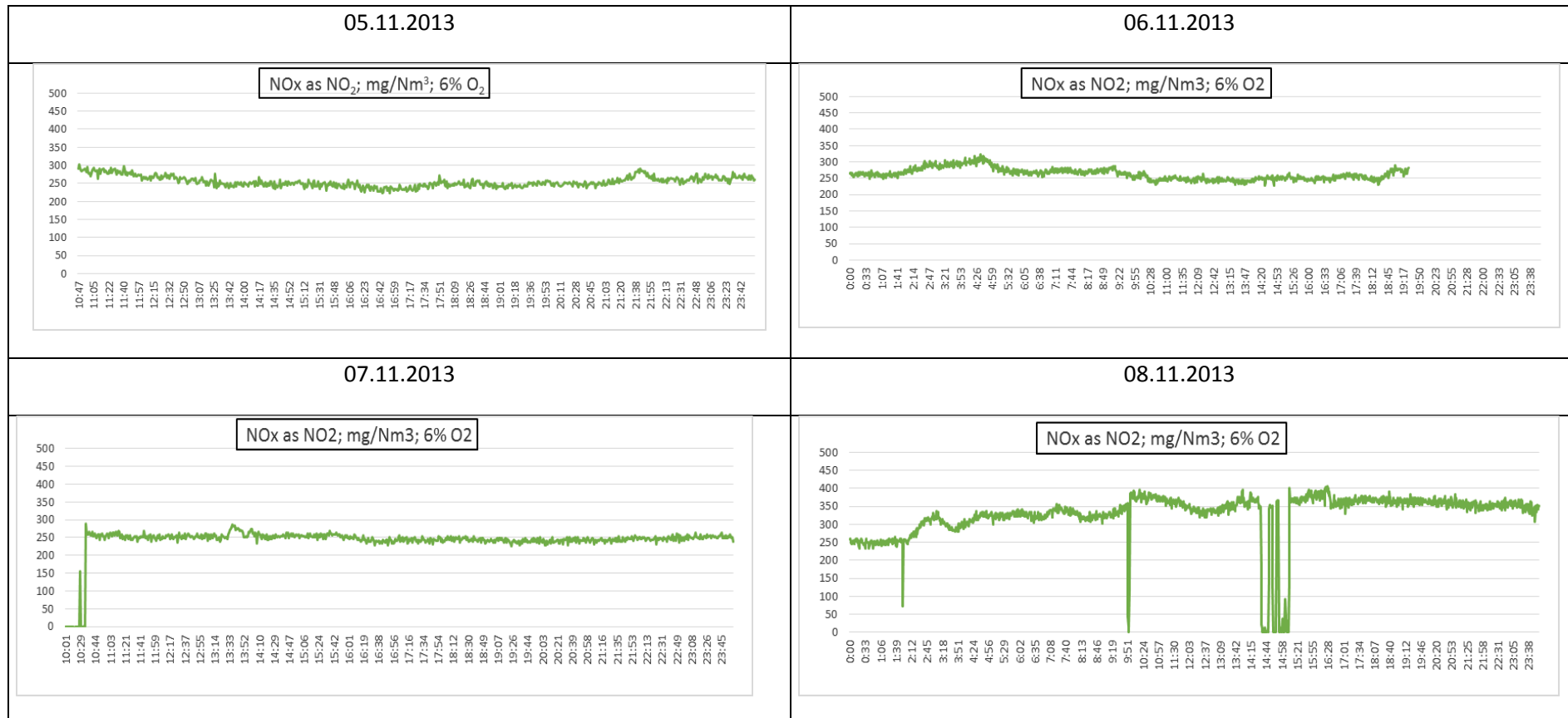
1. Eesti statistika aastaraamat 2013. Tallinn 2013.

<http://www.slideshare.net/Statistikaamet/eesti-staistika-aastaraamat-2013> (20.04.2014)

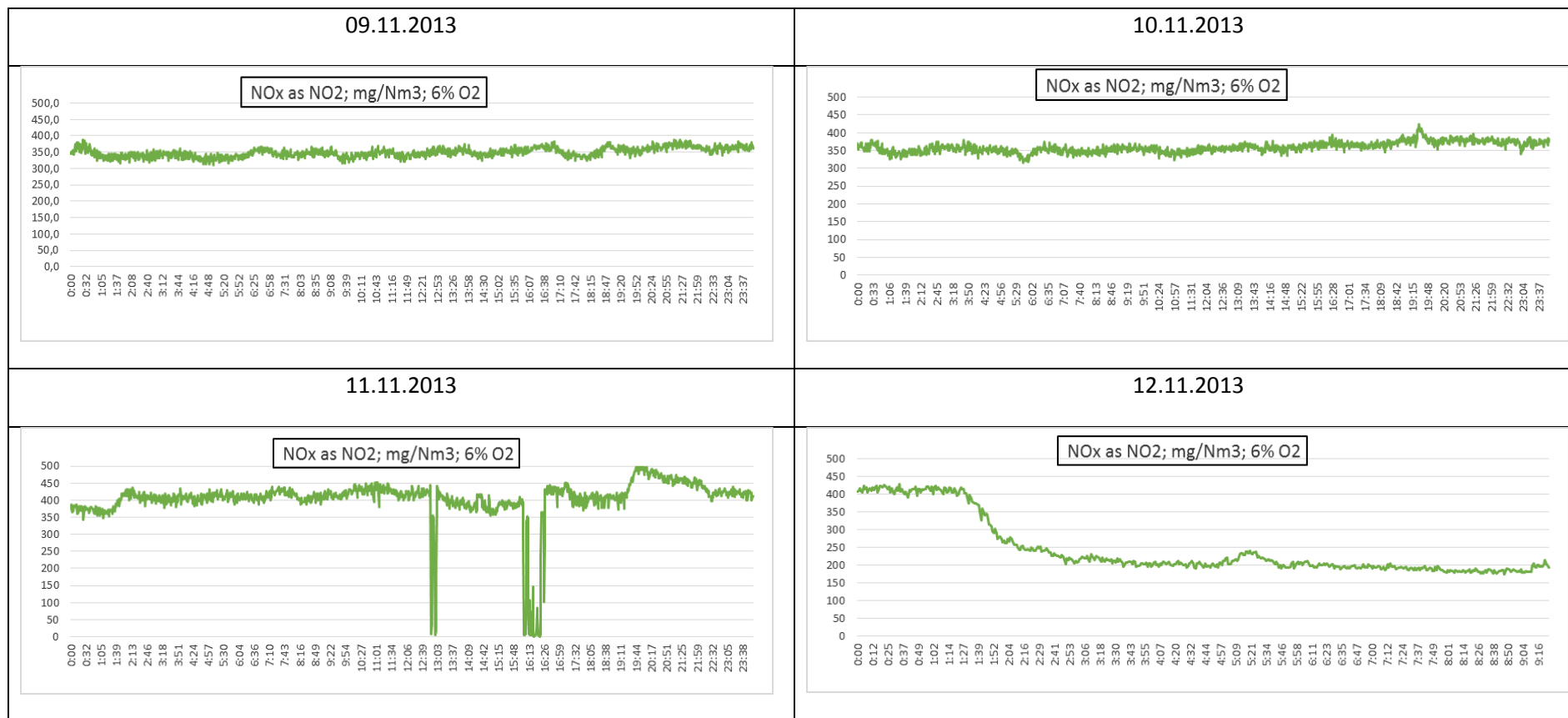
2. A. Siirde, „Energeetika: juhtmeid pidi põlevkivi küljes“. Horisont, 2011, 2
3. A. Ots, „Põlevkivi põletustehnika“, Tallinn, Tallinna Raamatutrükikoda, 2004, 768 lk.
4. A. Paist, „New epoch in Estonian oil shale combustion technology“. Oil Shale, 2004, V.21 N.3
5. V. Kattai, „Põlevkivi – õlikivi“, Tallinn, Eesti Geoloogiakeskus, 2003, 162 lk.
6. V. Kattai, T. Saarde, L. Savitski, „Eesti põlevkivi: geoloogia, ressurs, kaevandamistingimused“, Tallinn, Eesti Geoloogiakeskus, 2000, 226 lk.
7. J. R. Dyni, „Geology and resources of some world oil-shale deposits“. Oil Shale, 2003, 20/3
8. World coal association, „Coal Facts 2013“
http://www.google.ee/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.worldcoal.org%2Fbin%2Fpdf%2Foriginal_pdf_file%2Fcoal_facts_2013%2811_09_2013%29.pdf&ei=xCKNU5PkM-zZ4QSrm4G4Aw&usg=AFQjCNH5oMRcGKyN-QiFKUKaZkdHdGmLEQ&bvm=bv.68191837,d.bGE (20.04.2014)
9. A. Paist, A. Poobus, „Soojusgeneraatorid“, Tallinn, TTÜ kirjastus, 2008, 147 lk.

8. LISAD

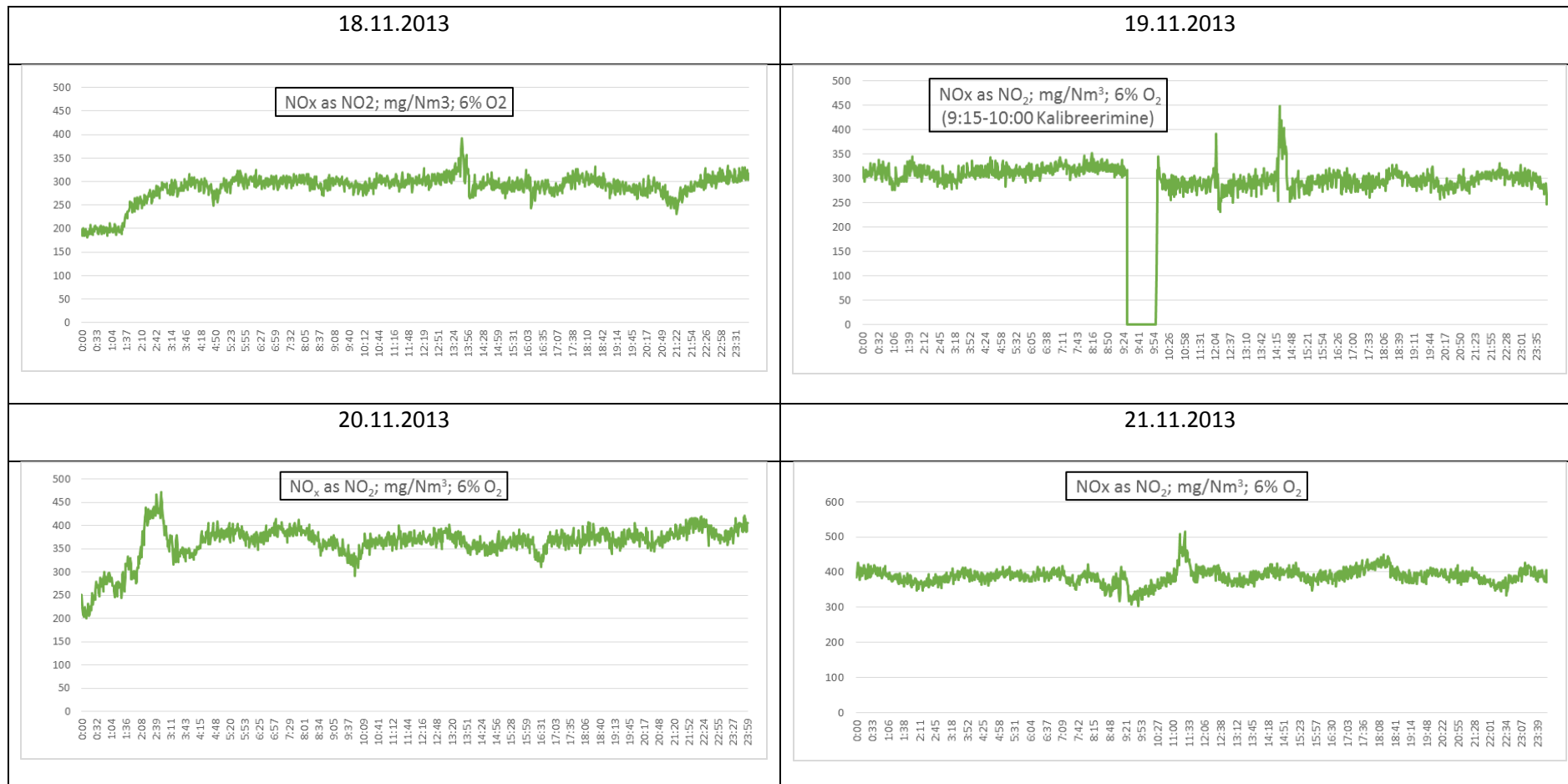
8.1. Lisa 1 Lämmastikheitmete kontsentratsioon 05 – 08.11.2013



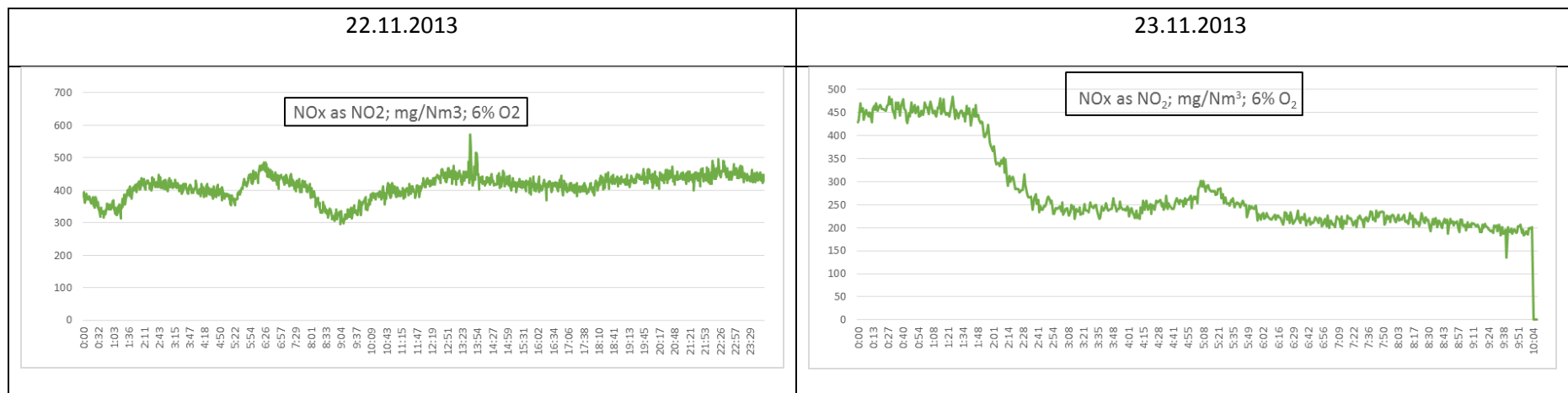
8.2. Lisa 2 Lämmastikmeite kontsentratsioon 09 – 12.11.2013



8.3. Lisa 3 Lämmastikheitmete kontsentratsioon 18 – 21.11.2013



8.4. Lisa 4 Lämmastikheitmete kontsentratsioon 22 – 23.11.2013



8.5. Lisa 5 Tuhkade analüüs

11.11.2013 Tuhkade keemiline koostis

Proovi iseloomustus	CO ₂	C _{CO2}	C _{elem}	C _{elem} -C _{CO2}	N _{elem}	S _{elem}	H _{elem}	SO ₃ üld	S _{sulfaat}	S _{sulfid}	SiO ₂	R ₂ O ₃	CaO	CaO _v	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Põhjatuhk	14,93	4,07	4,70	0,63	0,02	3,764	0,059	9,410	3,07	0,694	14,03	5,65	49,88	20,68	5,06	1,8	0,33
Ülekuumendi	4,31	1,18	1,32	0,14	0,02	3,166	0,020	7,916	2,70	0,466	20,93	10,29	35,44	15,3	5,56	2,99	0,32
Ökonomaiser	3,16	0,86	1,14	0,28	0,01	3,508	0,026	8,770	2,70	0,808	29,87	13,13	34,86	16,29	7,68	2,8	0,34
Õhuelsoojendi	3,18	0,87	0,96	0,09	0,00	3,480	0,770	8,700	3,19	0,290	28,53	9,93	35,5	16,64	6,18	2,78	0,33
Elektrifilter 1.väli	3,33	0,91	1,15	0,24	0,02	2,130	0,760	5,325	1,98	0,150	34,00	14,16	29,6	13,49	6,1	2,44	0,24
Elektrifilter 2.väli	3,15	0,86	1,11	0,25	0,03	2,100	0,740	5,250	2,01	0,090	36,16	13,93	31,38	12,71	6,03	3,55	0,48
Elektrifilter 3.väli	2,19	0,60	0,94	0,34	0,01	2,000	0,740	5,000	1,83	0,170	35,95	14,23	30,37	10,49	6,11	3,61	0,42
Elektrifilter 4.väli	2,75	0,75	0,83	0,08	0,02	2,530	0,740	6,325	2,34	0,190	31,96	16,55	31,97	6,52	6,65	3,34	0,34

Põhjatuha elementaar- ja karbonaatanalüüs

Proovi iseloomustus	Kütuste suhe	Proovivõtu kp.	Proovi nr.	CO ₂	C _{CO2}	C _{elem}	C _{elem} -C _{CO2}	N _{elem}	S _{elem}	H _{elem}
Põhjatuhk	95/5	7.11.2013	1198-13	18,46	5,03	5,63	0,60	0,01	3,530	0,770
Põhjatuhk	90/10	8.11.2013	1199-13	15,42	4,21	4,46	0,25	0,01	3,520	0,770
Põhjatuhk	85/15	11.11.2013	1190-13	14,93	4,07	4,70	0,63	0,02	3,764	0,059
Põhjatuhk	95/5	19.11.2013	1234-13	16,09	4,39	4,72	0,14	0,002	3,78	0,75
Põhjatuhk	90/10	21.11.2013	1235-13	14,07	3,84	4,22	0,04	0,003	3,86	0,75
Põhjatuhk	85/15	22.11.2013	1226-13	18,47	5,04	5,72	0,68	0,006	2,88	0,76
Põhjatuhk	80/20	4.12.2013	1251-13	32,11	8,76	9,24	0,48	0,005	0,78	0,74

Elektrifiltri 1. välja elementaar- ja karbonaatanalüüs

Proovi iseloomustus	Kütuste suhe	Proovivõtu kp.	Proovi nr.	CO ₂	C _{CO2}	C _{elem}	C _{elem} -C _{CO2}	N _{elem}	S _{elem}	H _{elem}
Elektrifilter 1.väli	95/5	7.11.2013	1273-13	3,89	1,06	1,15	0,11	0,004	2,17	0,70
Elektrifilter 1.väli	90/10	8.11.2013	1280-13	3,61	0,98	1,09	0,12	0,003	2,21	0,71
Elektrifilter 1.väli	85/15	11.11.2013	1194-13	3,33	0,91	1,15	0,24	0,02	2,130	0,760
Elektrifilter 1.väli	95/5	19.11.2013	1259-13	4,03	1,10	1,22	0,33	0,003	2,17	0,74
Elektrifilter 1.väli	90/10	21.11.2013	1266-13	3,53	0,96	1,10	0,38	0,004	2,21	0,73
Elektrifilter 1.väli	85/15	22.11.2013	1230-13	3,73	1,02	1,06	0,68	0,004	2,52	0,73