



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Energiatehnoloogia instituut

## **NO<sub>x</sub> HEITMETE VÄHENDAMINE HAKKPUIDU MULLIVAS KEEVKIHTKATLAS**

### **REDUCTION OF NO<sub>x</sub> EMISSIONS IN A WOODCHIP BUBBLING FLUIDIZED BED BOILER**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Atko Siht  
/nimi/

Üliõpilaskood 191986MASM

Juhendaja: Alar Konist, professor  
/nimi, amet/

(Tiitellehe pöördel)

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." ..... 2022

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 2022

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20..

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Atko Siht (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose NO<sub>x</sub> hetmete vähendamise hakkpuidu mullivas keevkihtkatlas,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Alar Konist,  
(*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.

---

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

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

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Atko Siht, 191986MASM (nimi, üliõpilaskood)

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

Juhendaja(d): Professor, Alar Konist, 6203907 (amet, nimi, telefon)

Konsultant: .....(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) *NO<sub>x</sub> heitmete vähendamine hakkpuidu mullivas keevkihtkatlas*

(inglise keeles) Reduction of NO<sub>x</sub> emissions in a woodchip bubbling fluidized bed boiler

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Lämmastikuheitmete tekkepõhjused keevkihtkatlas
2. Lämmastikuheitmete vähendamise meetodid
3. NO<sub>x</sub> heitmete vähendamine põlemisõhkude reguleerimisega MKK katlas

### Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus                                 | Tähtaeg  |
|----|--|----------|
| 1. | Tahkete biokütuste definitsioon ja omadused        | 21.03.22 |
| 2. | NO <sub>x</sub> heitmed ja nende teke, vähendamine | 06.04.22 |
| 3. | VÄO KTJ 1 keevkihtkatla mõõdistused ja tulemused   | 04.05.22 |

**Töö keel:** Eesti

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "20" Mai 2022

**Üliõpilane:** Atko Siht ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Alar Konist ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

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

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

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

|  |    |
|--|----|
| EESSÕNA .....  | 9  |
| Lühendite ja tähiste loetelu .....                           | 10 |
| SISSEJUHATUS .....   | 11 |
| 1. KÜTUSE LÄMMASTIK PÕLEMISEL .....                          | 13 |
| 1.1 Gaas-N.....  | 13 |
| 1.2 Tõrv-N.....  | 13 |
| 1.3 Koks-N .....   | 14 |
| 2. NO <sub>x</sub> HEITMETE TEKE .....                       | 15 |
| 2.1 Termiline NO <sub>x</sub> .....                          | 15 |
| 2.2 Kiire NO <sub>x</sub> .....                              | 16 |
| 2.3 Gaaside oksüdeerumine.....                               | 16 |
| 2.4 Tõrvade oksüdeerumine.....                               | 17 |
| 2.5 Koksi oksüdeerumine .....                                | 18 |
| 3. HAKKPUIT KÜTUSENA.....                                    | 19 |
| 3.1 Elementaarkoostis.....                                   | 19 |
| 4. HAKKPUIDU KEEVKIHTPÕLETUS .....                           | 22 |
| 4.1 MKK eripärad NO <sub>x</sub> tekkeks .....               | 23 |
| 4.1.1 Kütuse omaduste mõju .....                             | 23 |
| 4.1.2 Kihi temperatuur .....                                 | 24 |
| 4.1.3 Põlemisõhu kogus.....                                  | 25 |
| 4.2 NO <sub>x</sub> heitmete piirmäärad .....                | 25 |
| 5. NO <sub>x</sub> HEITMETE VÄHENDAMINE KEEVKIHTKATLAS ..... | 27 |
| 5.1 Primaarne.....   | 27 |
| 5.1.1 Astmeline põlemisõhk .....                             | 27 |
| 5.1.2 Suitsugaasi retsirkulatsioon .....                     | 29 |
| 5.1.3 Astmeline kütuse etteanne .....                        | 29 |
| 5.2 Sekundaarne.....   | 31 |
| 5.2.1 SCR.....   | 32 |
| 5.2.2 SNCR .....   | 34 |
| 5.2.3 DeNO <sub>x</sub> skraber.....                         | 37 |
| 5.2.4 DeNO <sub>x</sub> kihi lisandid.....                   | 39 |
| 6. NO <sub>x</sub> MUUTUS VÄO MKK NÄITEL .....               | 41 |
| 6.1 Katsetuste läbiviimine .....                             | 41 |
| 6.2 Parameetrid ja kasutatud seadmed .....                   | 42 |
| 6.2.1 Temperatuuri mõõdistuste asukohad.....                 | 43 |
| 6.2.2 Suitsugaaside mõõdistuste asukoht .....                | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 6.2.3 Põlemisõhkude mõõdistuste asukohad..... | 44 |
| 6.2.4 Kütuseproovid.....                      | 44 |
| 6.3 Mõõdistuste tulemused.....                | 45 |
| 6.3.1 Sekundaarõhk 80, tertsiaalõhk 20 .....  | 45 |
| 6.3.2 Sekundaarõhk 60, tertsiaalõhk 40 .....  | 47 |
| 6.4 Järeldused .....                          | 51 |
| 6.4.1 Temperatuur.....                        | 52 |
| KOKKUVÕTE .....                               | 53 |
| SUMMARY.....                                  | 54 |
| KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....            | 55 |
| LISAD .....                                   | 58 |
| Lisa 1 Katse 1 protokoll .....                | 59 |
| Lisa 2 Katse 2 protokoll .....                | 60 |
| Lisa 3 Katse 3 protokoll .....                | 61 |
| Lisa 4 Katse 4 protokoll .....                | 62 |
| Lisa 5 Katse 5 protokoll .....                | 63 |
| Lisa 6 Katse 6 protokoll .....                | 64 |
| Lisa 7 Katse 7 protokoll .....                | 65 |
| Lisa 8 MKK vaade küljelt.....                 | 66 |
| Lisa 9 MKK vaade eest.....                    | 67 |
| Lisa 10 Kütuse proovivõtu asukoht.....        | 68 |
| Lisa 11 Temperatuuri mõõtmise andur.....      | 69 |

## Joonised

|  |    |
|--|----|
| Joonis 1.1: Tahkete biokütuste lämmastiku termokeemilise muundamise voodiagramm [5].....   | 13 |
| Joonis 1.2: Tahkete biokütuste koksi lämmastiku sisaldus (võrdluses põlevaine lämmastikuga enne pürolüüsi) erinevatel pürolüüsi temperatuuridel [8]–[11] ..... | 14 |
| Joonis 2.1: Lihtsustatud voogdiagramm termilise, kiire ja kütuse NO <sub>x</sub> tekkimise kohta [12].....   | 15 |
| Joonis 3.1: Hakkpuidu ja purustatud puidu visuaalne erinevus [18] .....  | 19 |
| Joonis 3.2: VÄO KTJ 1 sissesöötjast võetud hakkpuidu kütuseproov .....   | 21 |
| Joonis 4.1: (a) Tsirkuleeriv keevkiht (TKK); (b) Mulliv keevkiht (MKK) [20] .....  | 22 |
| Joonis 4.2: Kütuse lämmastiku sisalduse suhe NO <sub>x</sub> heitmete kogusega (a) ja kütuse-N muundumine NO <sub>x</sub> 'ks (b) [21] .....                   | 24 |
| Joonis 5.1: Astmeline põlemisõhkude jaotus MKK katlas [24].....  | 28 |
| Joonis 5.2: Vooluskeem astmelise põlemisõhuga .....  | 28 |
| Joonis 5.3: Vooluskeem astmelise kütuse etteandega [26] .....  | 30 |
| Joonis 5.4: NO <sub>x</sub> vähendamine astmelise kütusetteandega kivisöe tolmpõletus katlas [13].....   | 31 |
| Joonis 5.5: SCR katalüsaatorite levinuimad stuktuurid: plaat, kärg ja valtsitud [27]..   | 32 |
| Joonis 5.6: SCR asukoht suitsukäigul kõrge tuhasusega tsoonis (a), madala tuhasusega tsoonis (b) ja (c) [29] .....   | 33 |
| Joonis 5.7: Suitsugaasi temperatuuri ja NO <sub>x</sub> vähendamise efektiivsuse suhe SCR tehnoloogiaga [30] .....   | 34 |
| Joonis 5.8: SNCR UREA põhimõtteline skeem [32] .....   | 35 |
| Joonis 5.9: Temperatuuri aken NO <sub>x</sub> heitmete optimaalseks vähendamiseks SNCR'ga [32].....  | 36 |
| Joonis 5.10: NO <sub>x</sub> heitmete vähenemise sõltuvus reageerimata ammoniaagi kogusest suitsugaasis [33].....  | 37 |
| Joonis 5.11: DeNO <sub>x</sub> skrabberi vooluskeem [35] .....   | 38 |
| Joonis 5.12: DeNO <sub>x</sub> reageeriva tahke materjali kasutamine keevkihis [36] .....  | 39 |
| Joonis 6.1: VÄO KTJ 1 MKK keevkihtkatla temperatuuri mõõdistuste positsioonid .....  | 43 |
| Joonis 6.2: Suitsugaaside mõõtmine elektrifiltri ja ökonomaiseri vahel .....   | 44 |
| Joonis 6.3: VÄO 1 MKK sekundaarõhu düüside vastukaal .....   | 45 |
| Joonis 6.4: VÄO 1 MKK NO <sub>x</sub> kogus kuivas suitsugaasis 80/20 põlemisõhkude suhtega .....  | 46 |
| Joonis 6.5: VÄO 1 MKK temperatuurid ülemises tsoonis 80/20 põlemisõhkude suhtega .....   | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Joonis 6.6: VÄO 1 MKK NO <sub>x</sub> kogus kuivas suitsugaasis 60/40 põlemisõhkude suhtega (katse 2 ja 3)..... | 47 |
| Joonis 6.7: VÄO 1 MKK temperatuurid ülemises tsoonis 60/40 põlemisõhkude suhtega (katse 2 ja 3).....            | 48 |
| Joonis 6.8: VÄO 1 MKK NO <sub>x</sub> kogus kuivas suitsugaasis 60/40 põlemisõhkude suhtega (katse 6 ja 7)..... | 49 |
| Joonis 6.9: VÄO 1 MKK temperatuurid ülemises, keskmises ja alumises sektsioonis (katse 6) .....                 | 50 |
| Joonis 6.10: VÄO 1 MKK temperatuuride erinevus ülemises ja alumises sektsioonis (katse 6) .....                 | 51 |

## **Tabelid**

|   |    |
|---|----|
| Tabel 3.1: Eesti biokütuse katlamajade tüüp nõuded hakkpuidule.....   | 20 |
| Tabel 4.1: Keevkihttehnoloogia põlemisprotsessi parameetrite mõju NO <sub>x</sub> ja N <sub>2</sub> O heitmetele [13] ..... | 23 |
| Tabel 4.2: Nõuded keskmise võimsusega uute rajatavate põletusseadmete heitmetele (EL) 2015/2193 [22].....                   | 26 |
| Tabel 4.3: NO <sub>x</sub> heitmete piirmäärad tahkete kütuste põletusseadmetele 2010/75/EL [23].....                       | 26 |
| Tabel 6.1: Mõõdetavad parameetrid ja väärtuste hankimine .....  | 42 |
| Tabel 6.2: Mõõtmiste tulemusena saadud NO <sub>x</sub> kogused kuivas suitsugaasis teisendatuna O <sub>2</sub> =6%.....     | 51 |



## **EESSÕNA**

Käesolev magistritöö on valitud enda isiklikust huvist tahkete biokütuste põlemistel tekkivate heitmete vastu ning viisidest nende vähendamiseks. Täpsema teema valikul lähtusin töökohas tehtud uuringutest ja projektidest. Seega sooviks tänada Utilitas Tallinna Elektri jaama, kus sooritatud katsed said läbi viidud. Lisaks soovin tänada juhendajat, professor Alar Konist, kes aitas lõputöö koostamisel ja pakkus välja erinevaid materjale.

NO<sub>x</sub>, hakkpuit, BFB, astmeline põlemine, magistritöö.

## Lühendite ja tähiste loetelu

Biokütus-N – kütuses sisalduv lämmastik

CEMS – statsionaarne heitmete mõõtmise süsteem

DCS – protsessi kontrollsüsteem

$\Delta t$  – temperatuuride vahe

Gaas-N – gaasis sisalduv lämmastik

Koks-N – kosis sisalduv lämmastik

KTJ - koostootmisjaam

$\lambda$  – liigõhutegur

Lendosa-N – lendosades sisalduv lämmastik

LHV – alumine kütteväärtus

MCR – katla soojuskoormus

MKK – mulliv keevkiht

N – lämmastik

NO<sub>x</sub> – lämmastikoksiidid (NO ja NO<sub>2</sub>)

PM – peenosakesed

PPM – osakesi miljondiku kohta

SCR – selektiivne katalüütiline lämmastikuheitmete vähendamine

SNCR – selektiivne mittekatalüütiline lämmastikuheitmete vähendamine

TKK – tsirkuleeriv keevkiht

TJ – teradžaul

Tõrv-N – tõrvas sisalduv lämmastik

UREA – ammoniaagil baseeruv kemikaal

## SISSEJUHATUS

Viimase 10 aasta jooksul on Eestis pidevalt kasvanud hakkpuidu põletamine soojusenergia tootmiseks. Kui aastal 2012 toodeti tahketest biokütustest 42391TJ primaarenergiat, siis aastal 2020 oli toodanguks 71447TJ.[1] Mis peamine, tegemist on regionaalse kütusega, mille kasutamine aitab vähendada sõltuvust maagaasist ning saavutada Euroopa Liidu poolt seatud kliimaeesmärgid aastateks 2030 ja 2050.

Erinevalt fossiilsetest kütustest, loetakse taimset ja puitset päritolu tahkeid biokütuseid süsinikneutraalseteks. See on üheks peamiseks põhjuseks, miks kasutatakse biokütuseid soojus- ja elektrienergia tootmiseks. Küll aga on ka teisi heitmeid peale CO<sub>2</sub>'e, mis vabanevad keskkonda põlemisel tekkivate suitsugaasidega. Tahkete biokütuste puhul on selleks lämmastikoksiidid, ehk NO<sub>x</sub> ja N<sub>2</sub>O heitmed.

NO<sub>x</sub> (NO ja NO<sub>2</sub>) ja N<sub>2</sub>O on atmosfääris kõige levinumad lämmastik ühendid. N<sub>2</sub>O puhul on tegemist kasvuhoonegaasiga, mis sarnaselt CO<sub>2</sub>'le aitab kaasa kliima soojenemisele ja põhjustab osoonikihi lagunemist. N<sub>2</sub>O on atmosfääris peamiselt taimset, looduslikku päritolu. See on ka põhjuseks, miks erinevalt NO<sub>x</sub> ühenditest ei ole hetkel N<sub>2</sub>O reguleeritud.[2]

Tahkete kütuste põlemisel tekivad NO<sub>x</sub> heitmed aga põhjustavad happelihmu ning linnades sudu, mis omakorda põhjustab hingamisteede haigusi. Seega on seatud põletusseadmetele Euroopa Liidus piirmäärad, millega soovitakse kontrollida NO<sub>x</sub> heitmete kogust atmosfääris. Alates aastast 2005 on Euroopa Liidus tekkinud NO<sub>x</sub> heitmete kogus vähenenud 36%. Suurimaks allikaks on maantee transport, mis moodustab 39% õhku paisatud lämmastikoksiidide kogusest. Energeetikasektori osakaal on 14%. [3] Selleks, et jätkuks langustrend, on Euroopa Liit seadnud keskmise suurusega ja suurtele põletusseadmetele heitmete piirmäärad. See käsitleb nii olemasolevaid kui ka uusi rajatavaid võimsusi. Olemasolevatele keskmise suurusega põletusseadmetele on lisaks ettenähtud üleminekuperiood aastani 2025 (eritingimustel 2030).[4]

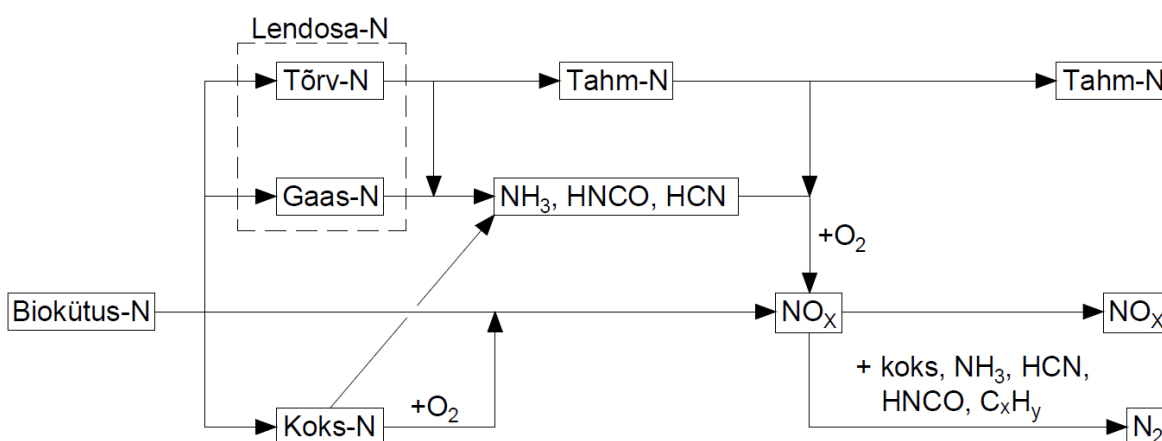
Olemasolevate põletusseadmete jaoks võib see halvimal juhul tähendada lisainvesteeringuid NO<sub>x</sub> vähendamise seadmetesse. Selleks on mitmeid tehnoloogiaid, levinuimaks SNCR, ehk UREA või ammoniaagi pritsimine põlemiskeskonda. Probleemiks on olemasolevate kollete puhul tihti ideaalse reageerimistsooni leidmine, kuna kolde konstruktsioonile ei ole seda ettenäinud. Üheks lahenduseks võib olla ka heitmete vähendamine primaarsel teel, ehk reguleerides põlemiskarakteristikat.

Olenevalt olukorrast, võib põlemise reguleerimine olla ka vajalik enne lisaseadmete paigaldust, et tekiks optimaalsete parameetritega keskkond.

Antud lõputöö eesmärk on uurida kuidas tekivad hakkpuidu põlemisel  $\text{NO}_x$  heitmed ja nende vähendamine olemasolevas keevkihtkatlas primaarsete ja sekundaarsete meetoditega. VÄO KTJ 1 MKK katlas läbiviidud katsete eesmärgiks oli uurida põlemiskambri temperatuure SNCR paigalduseks ja põlemisõhkude mõju  $\text{NO}_x$  heitmetele kuivades suitsugaasides.

# 1. KÜTUSE LÄMMASTIK PÕLEMISEL

Hakkpuit koosneb paljudest erinevatest keemilistest elementidest. Üheks selliseks elemendiks on lämmastik (N), mis võib moodustada 0,1-2,3% hakkpuidu kuivainest. Kütuse põlemisel laguneb osakeste struktuur, ehk toimub lendosade ja koksi eraldumine. Sama toimub ka lämmastikuga. Osa lämmastikust lahkub koos lendosadega (lendosa-N) ja osa jääb koksi (koks-N). Lendosa-N jaguneb veel omakorda faaside alusel gaasiks (gaas-N) ja tõrvaks (tõrv-N). Joonisel 1.1 on esitatud lihtsustatud voodiagramm lämmastiku muundamise protsessist.



Joonis 1.1: Tahkete biokütuste lämmastiku termokeemilise muundamise voodiagramm [5]

## 1.1 Gaas-N

Pürolüüsi tulemusena tekivad gaas-N koosneb ühenditest NH<sub>3</sub>, HCN ja HNCO.[5] Täpne kogus ja omavaheline suhe lendosades sõltub lisaks kütusekoostisele ka põlemisprotsessist (pürolüüsi temperatuur ja osakese kuumutamise kiirus). Kirjanduse järgi loetakse puidu pürolüüsil 800°C juures tekkiva N<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>/HCN/HNCO suhteks lendosades 0/90/5/5.[6] Lisaks eelnimetatule on gaasidest leitud ka NO<sub>x</sub> ühendeid, mille tekkimine on põhjustatud suurest hapniku sisaldusest puit kütustes.

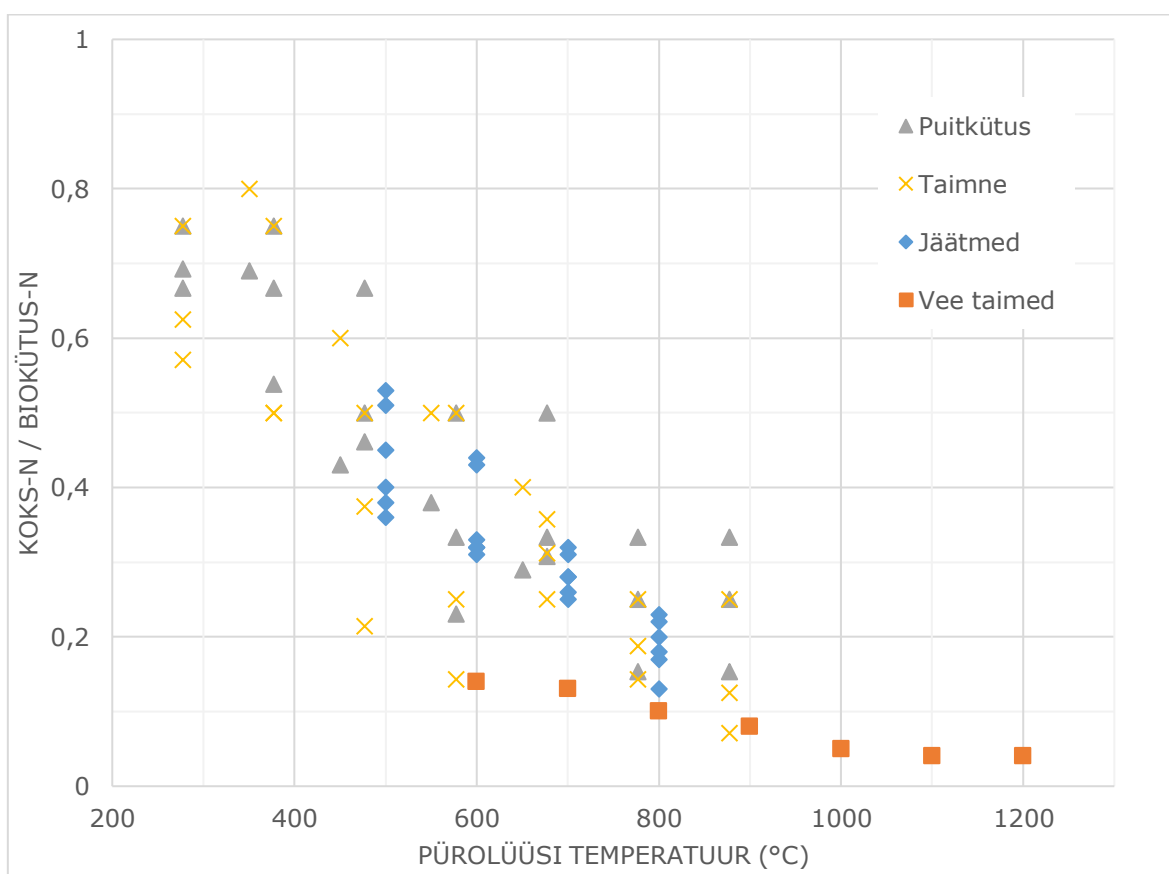
## 1.2 Tõrv-N

Lisaks gaasile, tekib pürolüüsi käigus ka tõrv, mis sisaldab samuti lämmastiku ühendeid. Tekkiva tõrv-N osakaal sõltub kütusest, pürolüüsi temperatuurist ja kuumutuskeskkonnas viibimise ajast. Teatud olukordadel (näiteks õlgede pürolüüsil) võib tõrv-N moodustada koguni 51% kütuses olevast lämmastikust.[6] Kõrgemitel temperatuuridel (>600°C) toimub tõrvade termiline krakkimine ning lämmastikühendid eralduvad tahma (tahm-N) ja gaasidena (NH<sub>3</sub> ja HCN). Tekkiv tahm koosneb lisaks

lämmastikühenditele ka muudest väiksematest keemilistest komponentidest. Tahmas sisalduva lämmastik võib reaktsioonide tulemusena vähendada NO<sub>x</sub> heitmete sisaldust, moodustada ise NO<sub>x</sub> ühendeid oksüdeerides hapnikuga või lihtsalt lahkuda suitsugaasidega.

### 1.3 Koks-N

Pärast lendosade eraldumist, jääb pürolüüsi tulemusena alles koks. Lendosade eraldumine algab tahketes biokütustes enamasti 160-250°C juures.[7] Antud temperatuuride juures jääb enamus biokütuses sisalduvast lämmastikust koksi, lendosadega eraldub puitset päritolu kütuste puhul 25-35% lämmastikust. Alates temperatuurist 550°C algab lämmastiku intensiivsem eraldumine, lendosadega lahkub puitsete kütuse puhul 50-85% kogu massist. Vee taimede korral eraldub näiteks koguni 86-96%. Põhjuseks on kütuse keemiliste sidemete kiirem lagunemine kõrgetel temperatuuridel. Koksi ja kütuses sisalduva lämmastiku suhe erinevatel temperatuuridel ja kütustes on esitatud joonisel 1.2.



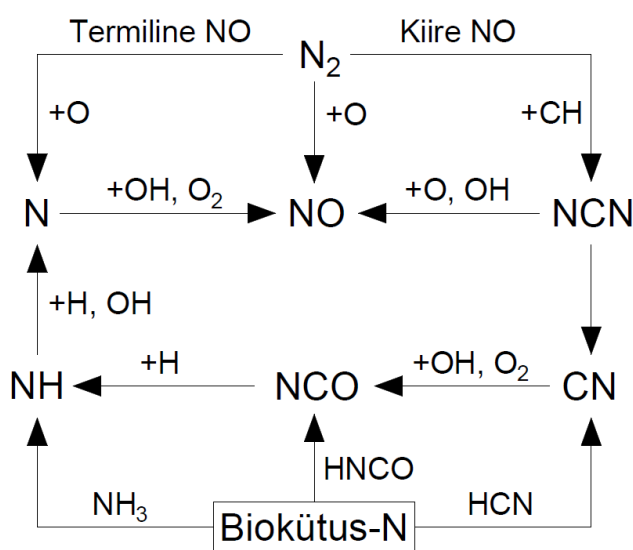
Joonis 1.2: Tahkete biokütuste koksi lämmastiku sisaldus (võrdluses põlevaine lämmastikuga enne pürolüüsi) erinevatel pürolüüsi temperatuuridel [8]–[11]

## 2. NO<sub>x</sub> HEITMETE TEKE

Põlemisel tekkivate lämmastikühendite edasisel oksüdeerumisel tekivad NO<sub>x</sub> ühendid (NO ja NO<sub>2</sub>). Tegemist on lämmastikoksiid heitmetega, mis põhjustavad happelihmu ja hingamisteede haigusi. Peamiseks ühendiks, mis tekib põlemisel on NO, mis edasisel reageerimisel O<sub>2</sub>'ga muundub NO<sub>2</sub>'ks. Antud reaktsioon toimub nii koldes põlemisel kui ka atmosfääris. Seega toimub NO muundumine NO<sub>2</sub>'ks ka hiljem korstnast väljudes.[7]

Kütuse põlemisel on 3 võimalikku viisi lämmastikoksiidide tekkeks:

- Termiline NO<sub>x</sub>, mis tekib õhus oleva lämmastiku reageerimisel hapnikuga kõrgel temperatuuril (>1300°C)
- Kiire NO<sub>x</sub>, mis tekib õhus oleva lämmastiku reageerimisel põlevate gaasidega (CH<sub>i</sub>). Selle tagajärjel tekivad vaheühendid, mis oksüdeeruvad edasi lämmastikoksiidideks
- Kütuse NO<sub>x</sub>, mis tekib kütuse põlemisel vabanevate lämmastikühendite reageerimisel õhus oleva hapnikuga



Joonis 2.1: Lihtsustatud voogidiagramm termilise, kiire ja kütuse NO<sub>x</sub> tekkimise kohta [12]

Joonisel 2.1 on kuvatud lihtsustatud voodiagramm NO<sub>x</sub> ühendite tekkest ja reaktsioonidest termilise, kiire ja kütuse lämmastiku muundamisel.

### 2.1 Termiline NO<sub>x</sub>

Kütuse põlemiseks antakse keskkonda õhku, mis sisaldab lämmastikku (N<sub>2</sub>). Selleks, et lõhkuda lämmastiku (N<sub>2</sub>) aatomite vahelist sidet on vaja palju energiat. Seega toimuvad

kõrgetel temperatuuridel (>1300°C) erinevad oksüdeerumise reaktsioonid, mis moodustavad lõpuks NO ühendid. Termilise NO tekkimine õhus olevast lämmastikust on esitatud valemitega 2.1-2.3.[13]



Seega on termilise NO<sub>x</sub> tekkeks vaja palju energiat ja piisavas koguses hapniku aatomeid, mis omakorda sõltub temperatuurist. Temperatuuri tõustes tõuseb ka vabade hapniku aatomite kogus põlemiskeskkonnas. Vastavalt kirjandusele ei ole vaja termilise NO<sub>x</sub> tekkega arvestada kui temperatuurid põlemiskeskkonnas on alla 1400°C.[13] Alates 1600°C toimub termilise NO<sub>x</sub> järsk kasv. Kuna hakkpuidu puhul hoitakse temperatuure reeglina alla 1100°C tuha sulamise tõttu, siis termilise NO<sub>x</sub> tekkega ei arvestata.

## 2.2 Kiire NO<sub>x</sub>

Lisaks hapnikuga reageerimisele võib põlemiskeskkonda antava õhus olev lämmastik (N<sub>2</sub>) reageerida ka kütusest lahkuvate süsivesinikega (CH<sub>i</sub>). Reaktsioon on esitatud valemiga 2.4.[14] Edasised reaktsioonid lämmastikoksiidide tekkeks on näidatud valemiga 2.11.



Hakkpuidu ja muude tahkete biokütuste põlemisel on tekkivate süsivesinike kogus väike. Lisaks sisaldab hakkpuit piisavas koguses orgaaniliselt seotud lämmastikku, mis moodustab peamise osa põlemisel tekkivatest NO<sub>x</sub>'de kogusest. Seega ei arvestada hakkpuitu põletates nn kiirete NO<sub>x</sub>'dega, vaid vaadeldakse ainult kütuse lämmastikust tekkinud NO<sub>x</sub>'e.[12]

## 2.3 Gaaside oksüdeerumine

Hakkpuidu põletamisel tekivad pürolüüsi tulemusena gaasid, mis sisaldavad NH<sub>3</sub>, HCN ja HNCO ühendeid. Edasisel põletamisel koos lisaõhuga moodustavad tekkinud ühendid oksüdeerumise teel uusi lämmastikühendeid.

NH<sub>3</sub>'e oksüdeerumisel on peamisteks saadusteks N<sub>2</sub> ja NO. Reaktsioonid on kirjeldatud valemitega 2.5-2.10.[12] Vähesel määral võib tekkida ka N<sub>2</sub>O, juhul kui keskkonda



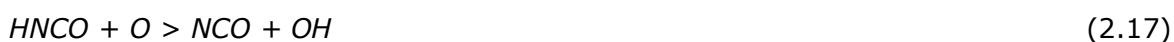
satub suuremas koguses lisaõhku. Selle tagajärjel võib moodustuda ühend HO<sub>2</sub>, mis reageerimisel NO'ga moodustab NO<sub>2</sub>'e (valem 2.9). Edasine reageerimine on näidatud valemiga 2.10.[12]



HCN oksüdeerumisel on lõppsaadusteks samuti N<sub>2</sub>, NO ja N<sub>2</sub>O. Reaktsioonid kirjeldatud valemitega 2.11-2.15.[12] Madalamatel temperatuuridel võib lisaks toimuda HNCO teke NCO reageerimisel veeauruga (valem 2.15). Kõrgematel temperatuuridel toimub HNCO lagunemine tagasi NCO'ks.[12]



Ka HNCO oksüdeerumisel tekivad N<sub>2</sub>, NO ja N<sub>2</sub>O ühendid. Reaktsioonid kirjeldatud valemitega 2.16 ja 2.17.[12] HNCO oksüdeerumiskiirus sõltub temperatuurist ja CO olemasolust keskkonnas. Juhul kui CO puudub, siis on oksüdeerumiskiirus madal temperatuuridel alla 1250K.[12] Kuna tahkete kütuste põlemisel tekib ka CO, siis reaalsuses on oksüdeerumine kiirendatud.



Edasised reaktsioonid N<sub>2</sub>, NO ja N<sub>2</sub>O tekkeks on näidatud valemitega 2.12, 2.13 ja 2.14.

## 2.4 Tõrvade oksüdeerumine

Tõrvade puhul on tegemist kõrge viskoossusega vedelikuga, mis termilise krakkimise tulemusena gaasistub. Seega sarnaselt lendosadele on peamisteks lämmastiku

heitmeteks  $\text{NH}_3$  ja  $\text{HCN}$ . Oksüdeerumisel moodustavad antud ühendid  $\text{NO}$  ja  $\text{N}_2$  heitmed, mis on reaktsioonidena kirjeldatud valemitega 2.5 kuni 2.15.

Tõrvade põlemisel tekkiva tahma lämmastikusisalduse kohta puudub täpne ülevaade biokütuste osas. Tahma mõju on rohkem uuritud kivisöe puhul, kus kirjanduse järgi vabaneb lämmastik tahma põlemise teel ning oksüdeerub lämmastikoksiidiks. Seega põhjustab tahm-N rohkem  $\text{NO}$  heitmed.[15]

## 2.5 Koksi oksüdeerumine

Koksi põlemisel tekib palju erinevaid lämmastikheitmeid. Põhilisteks on  $\text{N}_2$  ja  $\text{NO}$ , mis tekivad hapnikuga oksüdeerudes. Peamine osa suitsugaasides leiduvast  $\text{NO}_x$ 'st pärineb koksi põlemisest.[7] Lisaks eralduvad sarnaselt lendosadele ka  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$  ja  $\text{HNCO}$  ühendid, millest omakorda tekivad lõpuks reaktsioonide tulemusena  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}$  ja  $\text{N}_2\text{O}$  ühendid.

See kui palju tekib  $\text{NO}$  heitmeid koksi põlemisel, sõltub temperatuurist.  $\text{NO}$  heitmete kogused tõusevad kuni temperatuurini  $800^\circ\text{C}$ [5]. Kõrgematel temperatuuridel hakkab lämmastikoksiid reageerima koksiga, mis põhjustab  $\text{N}_2$  teket. Reaktsioonid on kirjeldatud valemitega 2.18-2.20.[16]



### 3. HAKKPUIT KÜTUSENA

Hakkpuitu loetakse väärindamata biokütuseks. Ehk tegemist on puitkütusega, mille mehaanilisi omadusi ei ole spetsiaalselt töödeldud. Sarnaselt hakkpuidule loetletakse väärindamata biokütusteks ka halupuitu, saepuru, laastu ja muid puidutöötlemisel tekkinud jäätmeid.[17]



a) Hakkpuit (peenestatud terava löikeriistaga) b) Purustatud puit (purustatud nüri löikeriistaga)

Joonis 3.1: Hakkpuidu ja purustatud puidu visuaalne erinevus [18]

Peamiseks erinevuseks võrreldes teiste puitkütuste tüüpidega on liigirikkus, ehk enamasti koosneb hakkpuit erinevat tüüpi puiduliikidest. Tegemist on tihti raiejäätmetega, mis koosneb lisaks puidule ka okstest, koortest ja pinnasest. Seetõttu on ka keeruline üheselt määrata täpset elementaarkoostist, kuna hakkpuidu kvaliteet võib varieeruda ka ühes koormas. Näitena võib tuua ka hooajalise sõltuvuse: suvel tarnitud hakke niiskusesisaldus on madalam, kui talvel või kevadel tarnitud. Seetõttu võib esineda olukordi, kus põlemisel tekkivate lämmastikoksiidide ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) kogused ületavad normi, kuna tarnitud tooraine päritolu muutub.

Ülesehituselt koosneb hakkpuit enamjaolt orgaanilistest ja vähesel määral anorgaanilistest ühenditest. Orgaanilise osa moodustab tselluloos, amorfse struktuuriga hemitselluloos ja lingiin. Tegemist on kütuse põlevaine osaga. Anorgaaniline osa seevastu võib esineda nii mineraalsete ühenditena, nagu fosfaadid, silikaadid ja kloriidid; või siis osana orgaanilistest mineraalidest Ca–Mg–K–Na.[19]

#### 3.1 Elementaarkoostis

Puitkütuste elementaarkoostise moodustavad süsinik (C), vesinik (H), hapnik (O), väävel (S), lämmastik (N) ja kloor (Cl). Neist esimesed kolm (C, H ja O) võivad

moodustada koguni 99% kuivaine kogumahust.[17] Ülejäänud elementide (S, N ja Cl) osakaal on küll väike, kuid siiski oluline probleemide vältimiseks.

Väävli (S) sisaldus kuivaines jääb enamasti 0 ja 0,07% vahele. Kõrge väävlisisaldus võib põhjustada madalatemperatuurilist korrosiooni suitsukäikudes. Hakkpuidu puhul ei ole väävliheitmed enamasti probleemiks, kuna põlemisel tekkiv SO<sub>2</sub> võib siduda tuhaga.[14]

Lämmastiku (N) kogus sõltub hakkpuidu koostisest. Puidu puhul võib lämmastiku kogus kuivaines olla 0,5-2,3%, samas kui puidukoos 0,3-0,8%. Samuti võib kogust hakkpuidus tõsta ka kõrgem taimse materjali (rohelus, õled) kogus.[14]

Hakkpuidu puhul on kloori (Cl) sisaldus enamasti madal (<0,05%). Täpne kogus sõltub nagu ka lämmastiku puhul erinevatest teguritest. Kuna kloor jõuab taimedesse läbi mulla, siis võib sisaldust mõjutada ka päritolu.[14] Näiteks rannikul asuv puit võib olla suurema kloori sisaldusega kui sisemaal. Lisaks võib tõsta kloori osakaalu puiduokkad ja õled.[17]

Tabel 3.1: Eesti biokütuse katlamajade tüüp nõuded hakkpuidule

| Parameeter                                  | Ühik  | Hakkpuit         |                 |
|---|---|------------------|-----------------|
|   |   | Garantii väärtus | Lubatud vahemik |
| Kütteväärtus (LHV), (tarbimisaine)          | MJ/kg   | 8,3              | 5,2 – 12,1      |
| Tihedus                                     | kg/m <sup>3</sup>   | 320              | 230 – 400       |
| Kütuse suhteline väline niiskus kogu massis | %   | 50               | 35 – 60         |
| Tuhk (kuivaines)                            | %   | 2                | 0 – 4           |
| C (kuivaines)                               | %   | 50,45            | 49 – 53         |
| H (kuivaines)                               | %   | 6                | 5 – 7           |
| O (kuivaines)                               | %   | 40               | 38 – 44         |
| S (kuivaines)                               | %   | 0,02             | 0 - 0,07        |
| N (kuivaines)                               | %   | 0,3              | 0 - 0,8         |
| Cl (kuivaines)                              | %   | 0,02             | 0 - 0,05        |
| Tuha sulamise temperatuur                   | °C  | > 1200           | 1100 – 1300     |
| Fraktsiooni suurus                          | > 60% vahemikus 3,15 kuni 100 mm; < 35 % väiksem kui 1 mm, 5% kuni 200 mm |                  |                 |

Tabelis 3.1 on esitatud hakkpuidu tüüp elementaarkoostis, mille alusel on projekteeritud enamikus Eestis töötavatest hakkpuidu kateldest. Andmed pärinevad erinevate

katlamajade hankematerjalidest. Joonisel 3.2 on kuvatud VÄO KTJ 1 sissesöötjast võetud kütuseproov.

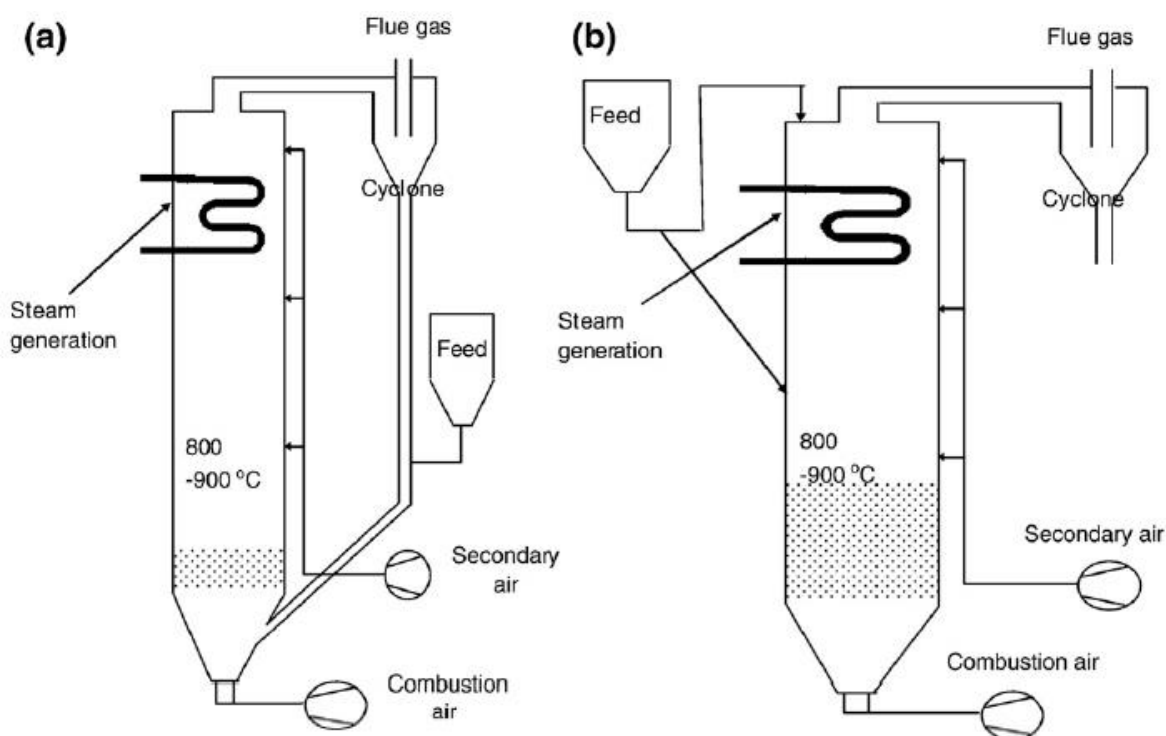


Joonis 3.2: VÄO KTJ 1 sissesöötjast võetud hakkpuidu kütuseproov

## 4. HAKKPUIDU KEEVKIHTPÕLETUS

Keevkihtpõletus tehnoloogia on hetkel kõige efektiivsem viis põletada tahkeid biokütuseid energia tootmiseks. Lisaks paremale soojusülekandele tekib keevkihtpõletusel ka enamasti vähem  $\text{NO}_x$  heitmeid võrreldes muude tehnoloogiatega. Põhjuseks on madal põlemistemperatuur koldes ( $800\text{-}900^\circ\text{C}$ ). Seetõttu ei teki termilist  $\text{NO}_x$ 'i ning pea kõik tekkinud lämmastikoksiidid on pärit kütuses sisalduvast lämmastikust. Ning kuna hakkpuidu lämmastiku sisaldus on küllaltki väike võrreldes näiteks põlevkivi või jäätmekütustega, siis on teoorias võimalik viia  $\text{NO}_x$  heitmete teke alla piirmäära põlemisprotsessis.

Keevkihtpõletusega kateldes toimub hakkpuidu põletamine materjali kihis, mis koosneb liivast, tuhast ja koksist. Teatud olukordades võib olla lisatud ka lisandeid vajalike heitmete vähendamiseks. Nn kihi moodustava materjali alla antakse primaarõhku, mis paneb materjali liikuma. Materjali liikumise intensiivsuse järgi jaotatakse keevkihttehnoloogia kaheks: MKK ehk mulliv keevkiht ja TKK ehk tsirkuleeriv keevkiht. MKK puhul antakse kihi alla primaarõhku kiirusega  $1\text{-}3\text{m/s}$ [20], mis paneb kihis oleva materjali ja kütuse osakesed liikuma (mullima). TKK puhul on primaarõhu kiirus suurem ( $3\text{-}6\text{m/s}$ )[20], mis paneb kütuse ja materjali osakesed kihist välja lendama. TKK ja MKK põhimõtteline skeem on esitatud joonisel 4.1.



Joonis 4.1: (a) Tsirkuleeriv keevkiht (TKK); (b) Mulliv keevkiht (MKK) [20]

## 4.1 MKK eripärad NO<sub>x</sub> tekkeks

Sarnaselt muudele põletusviisidele, toimuvad peatükis 2 kirjeldatud lämmastiku reaktsioonid ka MKK tehnoloogiat kasutades. Peamiseks erinevuseks on tekkivate NO<sub>x</sub> ja N<sub>2</sub> kogus ning omavaheline suhe. See võib sõltuda erinevatel faktoritest, kütuse oakeste suurus, tahke ja lendosade suhe, kihi temperatuur, lisaõhk ning põlemise karakteristika koldes. Seega ei sõltu NO<sub>x</sub>'de teke ainult kütusest, mis on hakkpuidu puhul ka positiivseks küljeks. Vastavalt peatükis 3 kirjeldatule ei ole hakkpuidu puhul tegemist konstantse koostisega kütusega.

Lisaks on teatud erinevusi ka MKK ja TTK põletusel. Tabelis 4.1 on esitatud põlemisparameetrite mõju NO<sub>x</sub> ja N<sub>2</sub>O heitmetele. Sealt on näha, et kui enamusi parameetritele muutuste puhul on mõju heitmetele MKK ja TTK puhul sama, siis on ka vastupidiseid näiteid. Näiteks MKK puhul toimub NO<sub>x</sub>'de vähenemine kui kasutatakse kihi materjalina lubjakivi, samas kui TTK puhul toimub astupidine efekt. Antud osas kirjeldan täpsemalt MKK eripära lämmastikoksiidide tekkel.

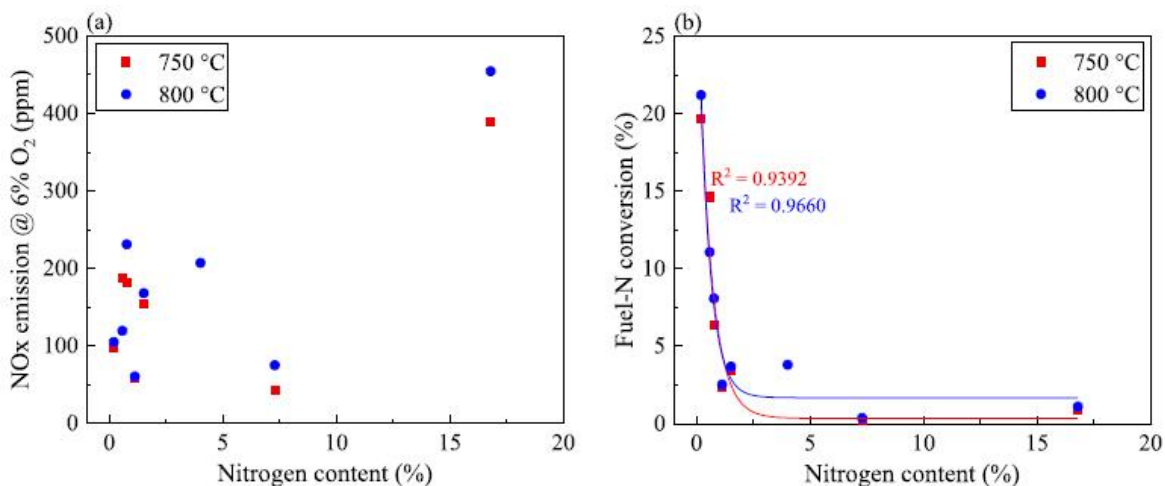
Tabel 4.1: Keevkihttehnoloogia põlemisprotsessi parameetrite mõju NO<sub>x</sub> ja N<sub>2</sub>O heitmetele [13]

| Suurenev parameeter                  | N <sub>2</sub> O | NO <sub>x</sub>       |
|--------------------------------------|------------------|-----------------------|
| Temperatuur                          | ↓                | ↑                     |
| Kütuse lämmastiku sisaldus           | ↓(MKK), ↓(TKK)   | ↓(MKK), ↑(TKK)        |
| Kütuse lendosade lämmastiku sisaldus | ↑                | ↑                     |
| Lisaõhk                              | ↑                | ↑                     |
| Astmeline põlemisõhk                 | ↓                | ↓                     |
| Lubjakivi                            | ↓                | ↓(MKK), ↑(TKK)        |
| SO <sub>2</sub>                      | ↑                | ↓                     |
| SNCR (NH <sub>3</sub> , UREA)        | ↑                | ↓                     |
| SCR                                  | -                | ↓                     |
| Rõhk                                 | ↑, ↓             | ↓ (NO <sub>2</sub> ↑) |

### 4.1.1 Kütuse omaduste mõju

Keevkihtpõletuse tehnoloogia eripäraks, võrreldes näiteks restil põletusega, on väiksem kütuse osakeste suurus. Hakkpuidu puhul näiteks 50x50x80mm. Kütuse osakeste mõõtmed võivad mõjutada NO<sub>x</sub>'de teket MKK põletusel kuna suurusest sõltub süttimise/lagunemise kiirus ja asukoht. Kivisöe põletamisel keevkihis on täheldatud mõlemapidist efekti. Kirjanduses avaldatud uuringu alusel vaadeldi kahte erinevat päritolu kivisütt, kus ühel vähenes tekkivate NO<sub>x</sub>'de kogus kütuse mõõtmete

suurenedes. Samas teisel kivisöel nähti, et  $\text{NO}_x$ 'de kogus vähenes kütuse mõõtmete vähenedes.[16] Eeldatakse, et suurema fraktsiooniga kütuse puhul toimub koksist NO eraldumine aeglasemalt ning gaasides olevate NH ühenditega reageerimisel toimub muundumine  $\text{N}_2$ 'ks (valem 2.8). Kindlat alust aga lämmastikoksiidide koguse modelleerimiseks kütuse suurusel ei ole. Lisaks on hakkpuidu puhul keeruline saavutada ühtlane osakeste fraktsioon.



Joonis 4.2: Kütuse lämmastiku sisalduse suhe  $\text{NO}_x$  heitmete kogusega (a) ja kütuse-N muundumine  $\text{NO}_x$ 'ks (b) [21]

Lisaks puudub kindel arusaam kütuses oleva lämmastiku sisalduse mõjust põlemisgaasides oleva  $\text{NO}_x$  kogusele. Vastavalt kirjandusele (joonis 4.2) ei pruugi madalam lämmastiku sisaldus tähendada madalamaid  $\text{NO}_x$ 'e. Küll aga on täheldatud, et lämmastiku sisalduse kasvades väheneb tekkivate  $\text{NO}_x$ 'de osakaal võrreldes muude lämmastikühenditega.[21]

#### 4.1.2 Kihi temperatuur

Keevkihtpõletuse plussiks restkoldega põletuse ees on küllaltki madalad temperatuurid (700-900°C), mis lisaks tuha sadestiste sulamise vähendamisele vähendab ka tekkiva  $\text{NO}_x$  kogust. Peatükis 2.1 kirjeldatud termiliste  $\text{NO}_x$ 'de kogus on näiteks keevkihtpõletusel olematu, mis tõttu seda ka ei käsitleta. Küll aga on kihi temperatuur üks olulisemaid lämmastikoksiidide tekitajaid kuna peamine  $\text{NO}_x$  kogus tekib hakkpuidu põletamisel koksist oleva lämmastiku oksüdeerumisel.

Peatükis 2.5 oli kirjeldatud, et  $\text{NO}_x$ 'de kogus koksi lämmastiku oksüdeerumisel suureneb temperatuuri tõustes. Seega võib arvestada, et mulliva kihi temperatuuri kasvades kasvab üldjuhul ka  $\text{NO}_x$ 'de kogus.[21] Küll aga on täheldatud kivisöe põletamise puhul, et teatud temperatuurist alates võib täheldada ka  $\text{NO}_x$ 'de langustrendi.[16] Seda põhjendatakse asjaoluga, et kõrgematel temperatuuridel (>900°C) toimub NO



intensiivsem reageerimine koksiga, mis põhjustab N<sub>2</sub> teket. Reaktsioonid on kirjeldatud valemitega peatükis 2.5.

### 4.1.3 Põlemisõhu kogus

MKK tehnoloogias on kütuse põlemine erinevates tsoonides vertikaalselt. Vastavalt sellele toimub ka põlemisõhu jaotamine koldes: primaarõhk (kihi all) ja sekundaarõhk (kihi peal). Sellest, kui palju antakse keskkonda põlemisõhku sõltub otseselt ka NO<sub>x</sub>'de kogus. Põlemiskeskonnass oleva lisaõhu koguse suurenedes kasvab ka tekkivate NO ja N<sub>2</sub>O heitmete kogus. Põhjuseks on CO, mille kogus hapniku koguse kasvades väheneb. Valemiga 4.1 on kirjeldatud toimuv koksist eralduva NO reaktsioon CO'ga.[16]



Tekkiva reaktsiooni intensiivsus sõltub samuti keskkonna temperatuurist. Mida kõrgem on temperatuur, seda järsem on ka lisaõhu mõju NO<sub>x</sub> ja N<sub>2</sub>O tekke kasvule. Seega võib öelda, et CO ja NO<sub>x</sub> on omavahel pöördvõrdelises korrelatsioonis, ühe kasvades väheneb teine.

MKK eripäraks on aga primaarõhu puhul nii kiiruse kui ka koguse olulisus. Tahke biomassi põletusel peetakse kihis oleva lisaõhu optimaalseks suhteks 0,9-1.[21] Lisatava primaarõhu kiiruse mõju NO<sub>x</sub>'le sõltub kütuse sisenemisest keskkonda. Juhul, kui kütus antakse otse kihi sisse, siis võib tekkida rohkem NO<sub>x</sub>'e kuna kiiruse kasvades muutub kihi käitumine ebastabiilseks. Vastupidine efekt võib toimuda siis, kui kütus antakse otse kihi peale. Seljuhul toimub primaarõhk kiiruse kasvades liikuda kiiremini läbi kihi ja kütuse, mistõttu on hapniku osalemine põlemisprotsessis lühem. See põhjustab intensiivsemat CO teket, mis valemi 4.1 alusel vähendab NO teket.

## 4.2 NO<sub>x</sub> heitmete piirmäärad

Põlemisgaasidega lahkvatele heitmetele ei ole maailmas seatud ühiseid piirmääri, mis kehtiksid kõikides riikides. Seetõttu võivad nii piirmäärad kui ka käsitletavat heitmed erineda riigiti ja piirkonniti. Enamasti jälgitakse põlemisgaaside puhul peenosakeste (PM), vääveldioksiidi (SO<sub>2</sub>) ja lämmastikoksiidi (NO<sub>x</sub>) koguseid.

Euroopa Liidus lubatava NO<sub>x</sub> heitmete kogus sõltub kütusest ja põlemiseadme soojuslikust nimivõimsusest. Keskmise võimsusega põletusseadmete (nimivõimsus 1-50MW<sub>th</sub>) jaoks on Euroopa Liidu direktiiv (EL) 2015/2193, mille nõuded uutele rajatavatele seadmetele on kuvatud tabelis 4.2. Seega on hakkpuidu põletamise korral maksimaalne lubatav NO<sub>x</sub> heitmete kogus kuivades suitsugaasides 300mg/Nm<sup>3</sup>, mis on

arvestatud O<sub>2</sub> sisaldusega 6%. Juhul kui hakkpuidu põletusseadmete summaarne soojusvõimsus on vahemikus 1-5MW<sub>th</sub>, siis on NO<sub>x</sub> heitmete piirmääraks 500mg/Nm<sup>3</sup>.

Tabel 4.2: Nõuded keskmise võimsusega uute rajatavate põletusseadmete heitmetele (EL) 2015/2193 [22]

| Saasteaine                            | Tahke biokütus | Muud tahkekütused | Gaasiõli | Vedelkütused (v.a gaasiõli) | Maagaas | Gaaskütused (v.a maagaas) |
|---------------------------------------|----------------|-------------------|----------|-----------------------------|---------|---------------------------|
| SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) | 200            | 400               | -        | 350                         | -       | 35                        |
| NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) | 300            | 300               | 200      | 300                         | 100     | 200                       |
| PM (mg/Nm <sup>3</sup> )              | 20             | 20                | -        | 20                          | -       | -                         |

Lisaks uutele seadmetele on direktiivis (EL) 2015/2193 määratud ka olemasolevate seadmete piirmäärad. Olemasolevatele hakkpuidu põletusseadmetele, mille soojusvõimsus on vahemikus 1-50MW<sub>th</sub>, on lubatud NO<sub>x</sub> väärtuseks kuivades suitsugaasides kuni 650mg/Nm<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6%). Olemasolevateks loetakse seadmeid, mis võeti kasutusele enne 20. detsembrist 2018. See aga kehtib kuni aastani 2025. Alates 1. jaanuarist 2025 peavad kõik olemasolevad keskmise võimsusega seadmed vastama tabelis 4.2 esitatud piirmääradele.

Tabel 4.3: NO<sub>x</sub> heitmete piirmäärad tahkete kütuste põletusseadmetele 2010/75/EL [23]

| Summaarne nimisoojus võimsus (MW) | Kivisüsi, pruunsüsi ja muud tahkekütused (mg/Nm <sup>3</sup> ) | Biomass ja turvas (mg/Nm <sup>3</sup> ) | Vedelkütused (mg/Nm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 50 –100                           | 300<br>450 tolmpuunsöe põletamisel                             | 300                                     | 450                                |
| 100 –300                          | 200  | 250                                     | 200                                |
| > 300                             | 200  | 200                                     | 150                                |

Põletusseadmetele, mille võimsus on suurem kui 50MW<sub>th</sub>, kehtib tööstusheitmete direktiiv 2010/75/EL. Tabelis 4.3 on esitatud maksimaalsed lubatud NO<sub>x</sub> heitmete piirmäärad kui O<sub>2</sub> sisaldus on 6%. Seega hakkpuidu põletamisel on piirmäärad sõltuvalt võimsusest vahemikus 200-300mg/Nm<sup>3</sup>.

## **5. NO<sub>x</sub> HEITMETE VÄHENDAMINE KEEVKIHTKATLAS**

Hakkpuidu põletamisel tekkivate NO<sub>x</sub> heitmete vähendamise jaoks on keevkiht tehnoloogia ideaalsete parameetritega. Keskkonna madal temperatuur, pikk kütuse viibimisaeg koldes ja põlemisõhu andmine astmeliselt võimaldab vähendada põlemisgaasidega lahkuvate NO<sub>x</sub> heitmete kogust nii primaarsete kui ka sekundaarsete meetoditega.

### **5.1 Primaarne**

N<sub>2</sub> teket hakkpuidus sisalduvast lämmastikust on võimalik soodustada kõige lihtsamalt primaarsel teel, ehk reguleerides põlemiskeskonna karakteristikat. Selleks on vaja hoida põlemisel tekkivad gaasid süsiniku rikkana võimalikult pikalt, et oleks piisavalt aega N<sub>2</sub> tekkeks.

Põlemist MKK keevkihtkoldes on võimalik mõjutada järgmiselt:

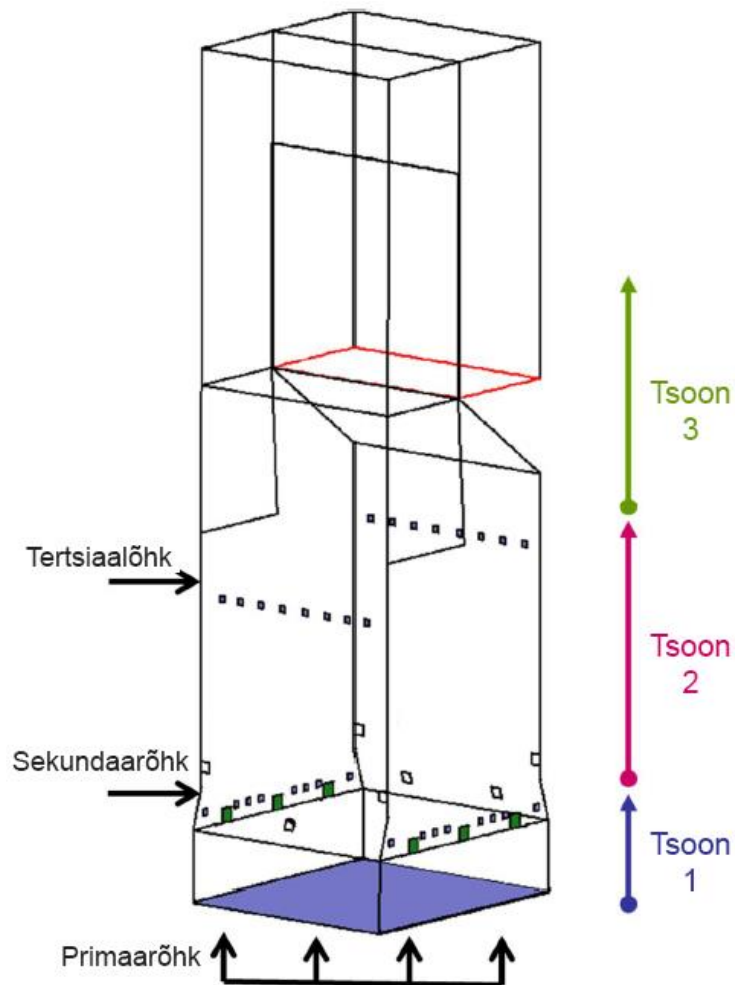
- Astmeline põlemisõhk – põlemisõhk viiakse koldesse erinevates sektsioonides
- Suitsugaasi retsirkulatsioon
- Astmeline kütuse etteanne

Põlemisõhuga tsoonide tekitamist ja suitsugaasi retsirkulatsiooni on võimalik kasutada ka TKK, ehk tsirkuleeriva keevkihi korral. Sellega mõjutatakse peamiselt NO<sub>x</sub> teket lendosade lämmastikust.

#### **5.1.1 Astmeline põlemisõhk**

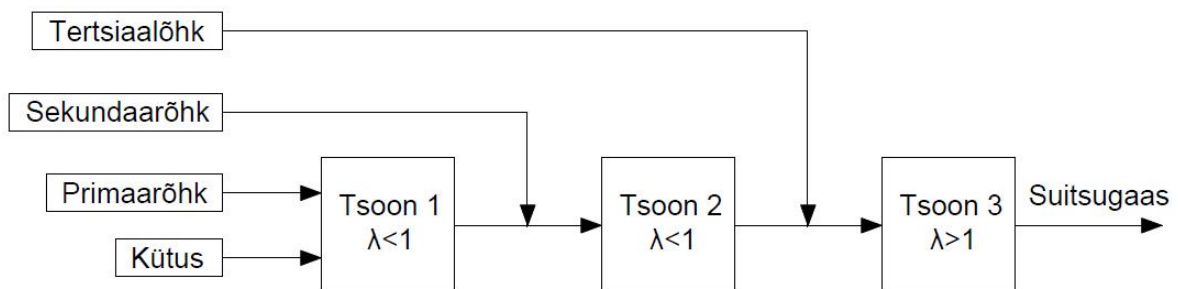
Keevkihtkateldes on põlemisõhud jaotatud tsoonide kaupa vertikaalselt. See kuidas on põlemisõhud jaotatud oleneb kolde konstruktsioonist. Põhiliseks jaotuseks on primaar ja sekundaar õhk. Primaarõhk antakse koldesse kihi alt, mis tekitab MKK puhul kihi keemise efekti. Lisaks puhtale õhule võib primaarõhk olla segatud ka suitsugaasi retsirkulatsiooniga, et paremini kontrollida kihi temperatuuri. Sekundaarõhku antakse koldesse kihi pealt ning selle asukohal on mõju NO<sub>x</sub> heitmete tekkele.

Jaotades põlemisõhu sisendid astmeliselt tekib koldesse rohkem kui ainult 2 põlemistsooni. See saavutatakse sellega, et lisaks sekundaarõhule antakse põlemisse ka tertsiaalõhku. Taoline põlemisõhkude ja tsoonide põhimõtteline skeem MKK kolde kohta on näidatud joonisel 5.1.



Joonis 5.1: Astmeline põlemisõhkude jaotus MKK katlas [24]

Primaarõhu puhul ei muutu midagi. Sekundaarõhk antakse koldesse enamasti kõrgemalt, kui kütuse sisenemise avad. Tertsiaalõhku antakse koldesse veelgi kõrgemalt, põlemiskambri lõpu osas. Tertsiaali puhul on oluline, et sisendid ei oleks liiga kõrgel kuna olenevalt konstruktsioonist, võivad ülekuumendi torud olla liiga lähedal. Kihi kohale antava õhu jagunemine kaheks annab võimaluse viia koldes olev põlemine kolme tsooni. Õhu kogused on tsoonides eraldi reguleeritud. Tsoonides 1 ja 2 on liigõhutegur  $\lambda < 1$ . Tsoonis 3 on  $\lambda > 1$ .



Joonis 5.2: Vooluskeem astmelise põlemisõhuga

Tsoonis 1 toimub kütuse pürolüüs kihis. Enamuse lendosaga eralduvatest gaasidest moodustavad CO, H<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> ja N<sub>2</sub>. Kuna λ<1 siis pürolüüsi tulemusena tekib ka peatükis 3.1 kirjeldatud NH<sub>3</sub>, HCN ja HNCO ühendid. Lisaks vabaneb ka koksist teatud kogus NO'd. Kuna tsoonis 2 on samuti λ<1 siis, ka kihi kohal on piiratud lämmastiku oksüdeerumine hapnikuga. Sellega pikendatakse kütuse põlemise aega, mis soodustab tekkinud NO heitmete reageerimist keevkihis oleva koksiga (peatükk 2.5) ja CO'ga (valem 4.1).

Tsoonis 3 toimub mittetäielikust põlemisest tekkivate CO ja C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> ühendite järelpõlemine. Nn lõpp-põlemise tsooni lisaõhu andmisega (λ>1) tekib NO vähendamise efekt, kus NO<sub>x</sub> muutub teistele lämmastikühenditele oksüdeerivaks ühendiks. Reaktsioonid kirjeldatud valemitega 2.8 ja 5.1[25].



Põlemisõhkude jaotus astmeliselt on eriti efektiivne NO<sub>x</sub>'de vähendamiseks keskmise ja kõrge lendosade sisaldusega kütuste puhul. Sinna alla kuulub ka hakkpuit. Kirjanduse järgi on põlemistsoonide tekitamisega võimalik vähendada NO<sub>x</sub> heitmeid koguni kuni 57%. [21]

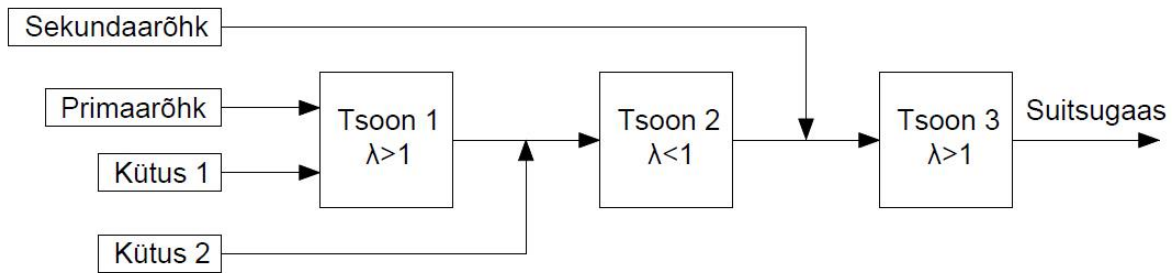
### **5.1.2 Suitsugaasi retsirkulatsioon**

Suitsugaasi retsirkulatsiooni kasutatakse põlemiskeskonna temperatuuri kontrolliks. Enamasti antakse suitsugaasi MKK katlas kihi alla koos primaarõhuga. Lisaks on võimalik suitsugaasi retsirkuleerida ka kihi kohale, sekundaar ja tertsiaalõhu vahele. Sellega on võimalik vähendada temperatuuri ja hapniku kogust koldes, mis vähendab omakorda NO<sub>x</sub> heitmete teket. Ehk parima efekti saavutamiseks peaks olema kasutusel koos peatükis 5.1.1 kirjeldatud põlemisõhkude jaotusega.

### **5.1.3 Astmeline kütuse etteanne**

Astmeline kütuse etteanne on katla konstruktsiooni ja protsessi osas keerulisem. See nõuab kahte täiesti eraldiseisvat kütuse etteande süsteemi, mis paiknevad erinevatel tasanditel. Ehk enamasti on tegemist lahendusega, mis on ettenähtud juba katla projekteerides. Olemasolevale katlale lisa kütuse sisendi ja transportööride paigaldamine tähendab tihti katlamaja ümberehitust.

Sellest hoolimata, võimaldab kütuse sisenemise jaotamise koldesse vähendada tekkivate NO<sub>x</sub> heitmete kogust. Tegemist on lahendusega, mis on tulnud kivisöe põletuselt, kus NO<sub>x</sub> vähendamiseks lisati põlemisse teise kütusena hakkpuitu või maagaasi.[13] Ehk lisatav teine kütus on justkui NO<sub>x</sub> heitmeid vähendav materjal. Protsessi põhimõtteline skeem on kujutatud joonisel 5.3.



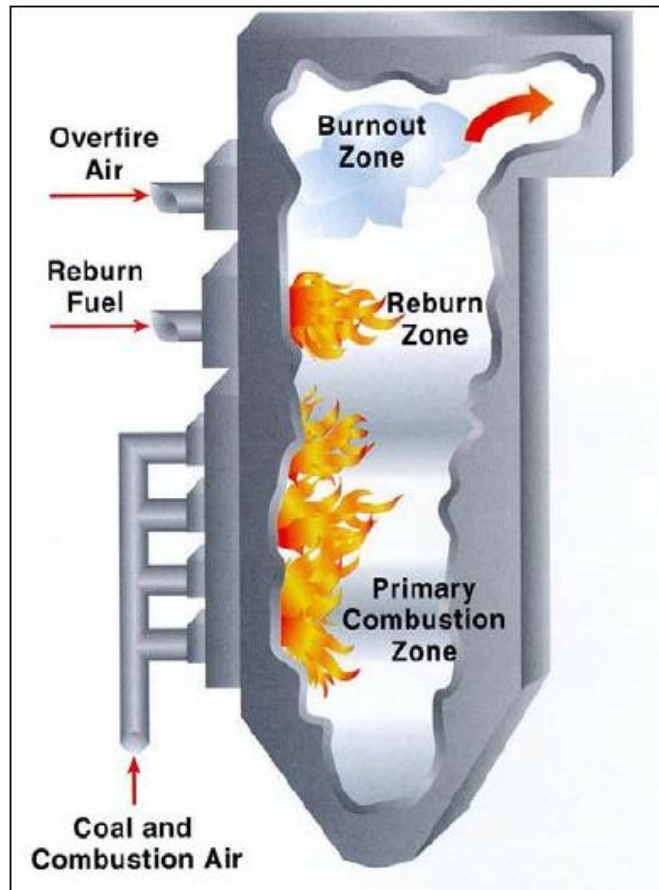
Joonis 5.3: Vooluskeem astmelise kütuse etteandega [26]

Sarnaselt peatükis 5.1.1 kirjeldatud põlemisõhkude jaotamisele toimub sarnane põlemistsoonide tekitamine ka siin. Kokku on 3 tsooni. Esimese tsooni moodustab kiht, kuhu antakse primaarõhku ja põhikütus. Erinevus „astmelise põlemisõhuga“ on see, et sel korral on tsoonis 1 liigõhutegur  $\lambda > 1$ . Ehk toimub kütuse põlemine ja hapnikuga oksüdeerumine.

Seejärel tuleb koldes ülespoole liikudes kütuse etteande teine aste. Kuna siin põlemisõhk puudub, siis tekib tsoon 2, kus  $\lambda < 1$ . Tsoonis 2 toimub lisa kütuse pürolüüsist vabanevate  $\text{NH}_i$  ühendite reageerimine põhikütusest vabanenud  $\text{NO}'$ ga vastavalt valemile 2.8. Lisaks tekib ka mittetäielikust põlemisest  $\text{CO}$  ja  $\text{C}_x\text{H}_y$  ühendid, mille reaktsioonid on kirjeldatud valemitega 4.1 ja 5.1.

Tsooni 3 tekitab sekundaarõhu lisamine süsteemi, mis tuleb pärast lisakütuse sisendit. Tegemist on nn järelpõlemise osaga, kus  $\lambda > 1$  ning toimub põlemisgaasides oleva süsiniku põlemine.

Kuna kütus 2 vajab samuti viibimisaega keskkonnas pürolüüsi toimimiseks siis MKK tehnoloogias on selle kasutamine keeruline. Tahkete kütuste kasutamine tähendaks vaheresti ehitamist koldesse. Ühe võimalusena on kasutada kivisöe põletamisest tulnud lahendust. Primaarkütusena kasutada hakkpuitu ning lisakütusena maagaasi, mille jaoks paigaldatakse kihi kohale põletid. Maagasi põlemise tulemusel tekivad  $\text{C}_x\text{H}_y$  ühendid, mis reageerivad  $\text{NO}'$ ga ning moodustavad  $\text{N}_2$  ühendid vastavalt valemile 5.1. Joonisel 5.4 on kuvatud näide kivisöe ja maagaasi lahendusest tolmpõletusega katlas.



Joonis 5.4: NO<sub>x</sub> vähendamine astmelise kütuseteandega kivisöe tolm põletus katlas [13]

## 5.2 Sekundaarne

Kui primaarsete meetoditega ei saavutata soovitud NO<sub>x</sub> tase, siis on võimalik rakendada ka sekundaarseid meetodeid. Sekundaarseteks meetoditeks on keemiliste ühendite lisamine keskkonda, mis reageerivad otseselt lämmastikoksiididega ning vähendavad seeläbi suitsugaasidega lahkvate NO<sub>x</sub>'de kogust. Lisatavad ühendid võivad olla nii vedelal kui ka tahkel kujul.

NO<sub>x</sub> teket on võimalik mõjutada järgmiste sekundaarsete meetoditega:

- SCR
- SNCR
- DeNO<sub>x</sub> skraber
- Kihhi/kütuse lisandid

Kõiki loetletud sekundaarseid lahendusi on võimalik kasutada ka tsirkuleeriva keevkihi puhul. Teatud katalüütilise materjali kasutamine kihis võib aga TTK puhul tuua

vastupidise efekti. Näiteks lubjakivi kasutamise tsirkuleerivaskeevkihis on täheldatud  $\text{NO}_x$  heitmete kasvu. Samas kui MKK puhul toimub vähenemine.[13]

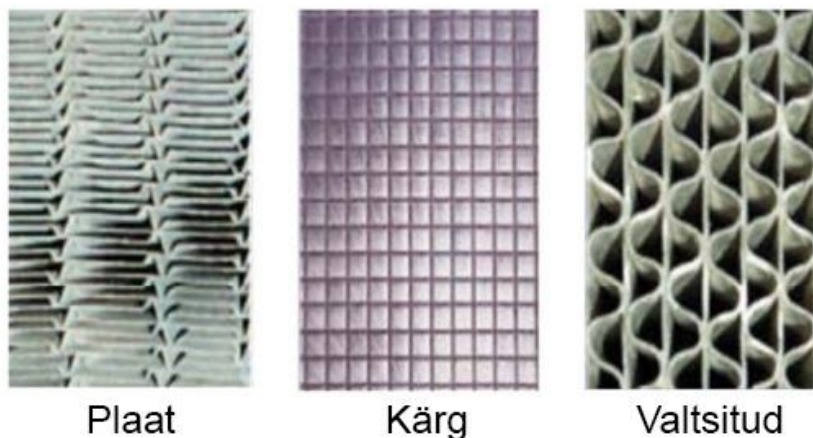
### 5.2.1 SCR

SCR, ehk selektiivne katalüütiline lämmastikuheitmete vähendamine, on kõige efektiivsem ja töökindlam lahendus  $\text{NO}_x$  heitmete vähendamiseks. Tegemist on tehnoloogiaga, mis on olnud kasutusel aastast 1970 ning ainuüksi USA's on paigaldatud üle 1000 SCR süsteemi. Süsteemi peamiseks plussiks on suurepärane efektiivsus (eemaldab kuni 95% suitsugaaside  $\text{NO}_x$  heitmetest)[27] ning eraldiseisev seade, mille paigaldus ei nõua olemasoleva katla ümberehitust.

SCR tehnoloogia hõlmab endas ammoniaaki ( $\text{NH}_3$ ) ja katalüsaatorit, mis valmistatakse ette seadmena ning paigaldatakse suitsukäigu vahele. Suitsugaasi sisenemisel seadmesse pritsitakse keskkonda gaasistunud kujul ammoniaaki  $\text{NH}_3$ , mis seguneb suitsugaasiga. Seejärel läbib tekkinud segu katalüsaatori, mis muudab  $\text{NO}_x$  heitmete reageerimise  $\text{NH}_3$ 'ga intensiivsemaks ning reaktsioonide tulemusena tekib  $\text{N}_2$  ja  $\text{H}_2\text{O}$ . Toimuvad reaktsioonid on esitatud valemitega 5.2-5.4.[28]



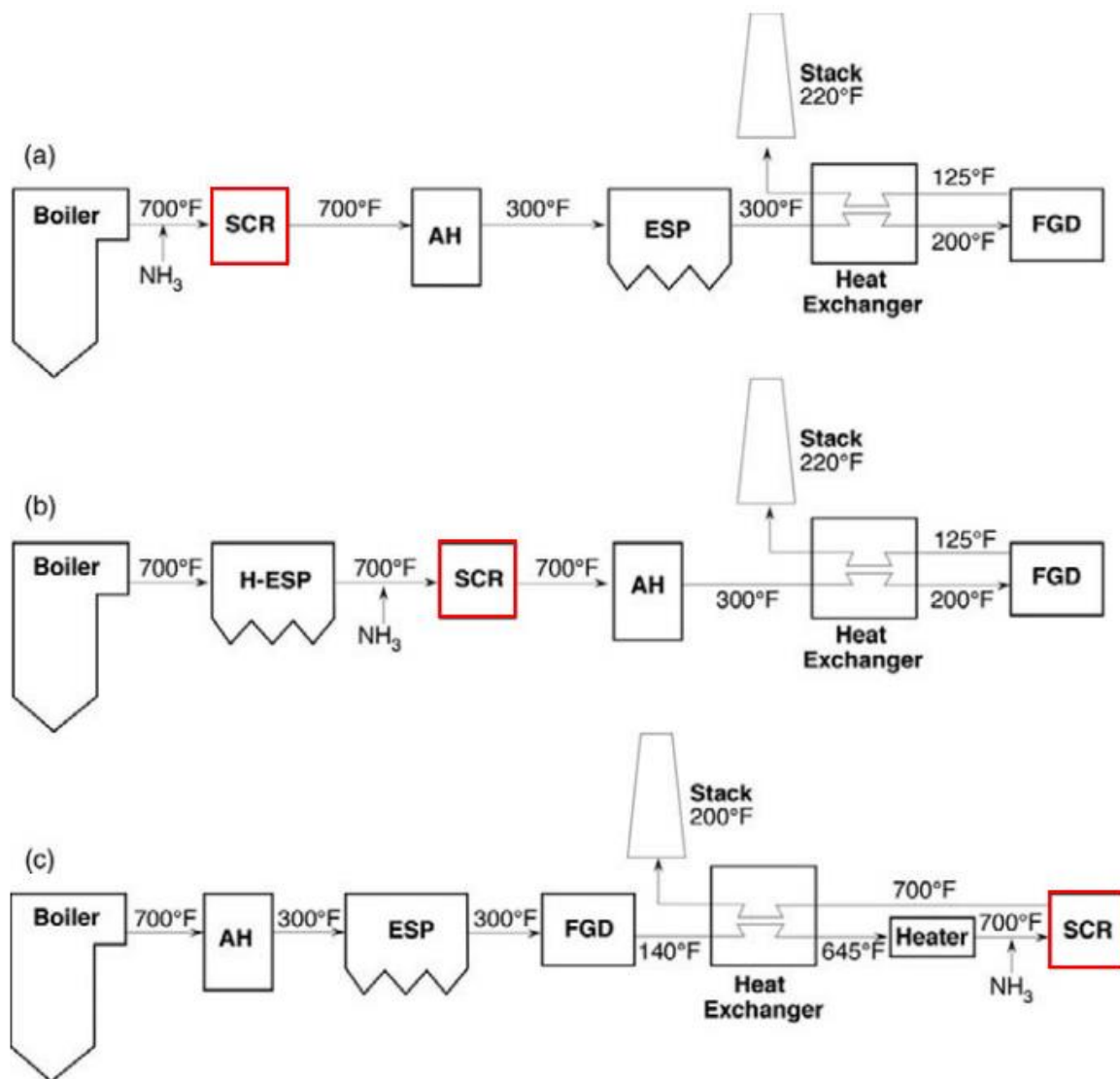
Katalüsaatori struktuuri ja materjalid määrab põletatav kütus ja SCR asukoht suitsukäigul. Tüüpiliseks katalüsaatori materjalideks on kasutusel titaanium dioksiid ( $\text{TiO}_2$ ), vanaadium pentoksiid ( $\text{V}_5\text{O}_5$ ) ja volfram trioksiid ( $\text{WO}_3$ ). Struktuurilt võib katalüsaator esineda plaadina, kärjena ja valtsitud. Näited on esitatud joonisel 5.5. Õige struktuuri valik on oluline, kuna suitsugaasides leiduvad peenosakesed võivad põhjustada ummistusi.



Joonis 5.5: SCR katalüsaatorite levinuimad stukturid: plaat, kärg ja valtsitud [27]



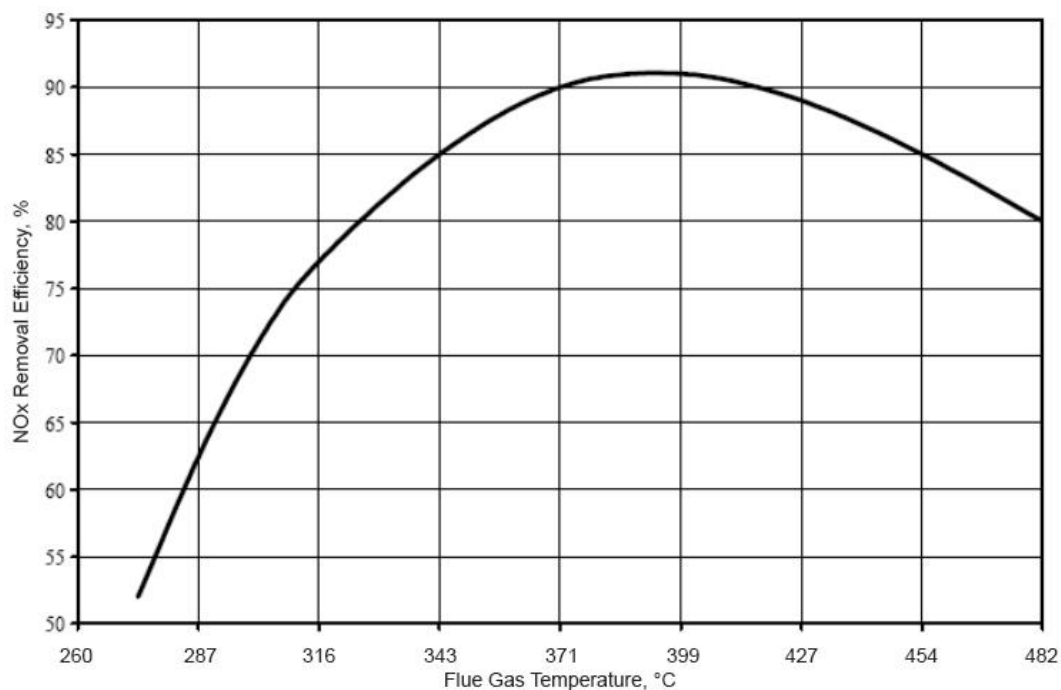
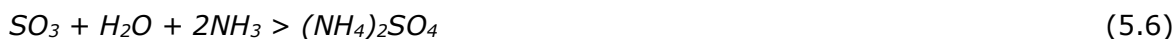
SCR süsteemi on võimalik paigaldada nii enne kui ka pärast suitsugaaside puhastust seadet. Selle alusel dimensioneeritakse seade kas madala või kõrge tuhasusega tsooni. Hakkpuidu põletusseadmete puhul paigaldatakse SCR tavaliselt pärast suitsugaaside puhastust. Põhjuseks on suitsugaasides olev kõrge lendtuha sisaldus. Vastavalt asukohale erinevad ka suitsugaaside temperatuurid. Kõrge tuhasuse tsoonis toimub SCR reaktsioonid enamasti temperatuuri vahemikus 240-420°C. Madala tuhasusega tsoonis on suitsugaasi temperatuur 240-250°C. Joonisel 5.6 on kuvatud erinevad võimalikud asukohad SCR paigalduseks.



Joonis 5.6: SCR asukoht suitsukäigul kõrge tuhasusega tsoonis (a), madala tuhasusega tsoonis (b) ja (c) [29]

Suitsugaasi temperatuur on oluline SCR reaktsioonide toimumisel. Joonisel 5.7 on kuvatud NO<sub>x</sub> vähendamise efektiivsus sõltuvana suitsugaaside temperatuurist. Lisaks NO'ga reageerimisele, reageerib NH<sub>3</sub> ka suitsugaasides olevate väävli ühenditega. Juhul kui suitsugaasi temperatuur on liiga madal, siis toimub tekkiva NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> ühendi

kondenseerumine, mis vähendab katalüsaatori efektiivsust ja põhjustab korrosiooni. Seega võib teatud olukordades olla vajalik tõsta suitsugaasi temperatuuri (>230°C).  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  tekkimise reaktsioonid on kirjeldatud valemitega 5.5-5.7.[29]



Joonis 5.7: Suitsugaasi temperatuuri ja NOx vähendamise efektiivsuse suhe SCR tehnoloogiaga [30]

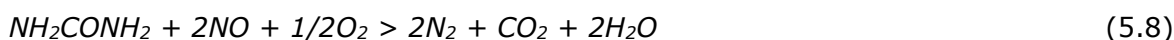
Lisaks SCR tehnoloogia positiivsetele külgedele on sellel ka negatiivseid. Eraldiseisev seade on küll seadmetootja vaates positiivne kuid olemasolevasse süsteemi paigaldamine võib tekitada probleeme. Enamus projekteeritud elektrijaamu ja katlamaju omavad võimalikult kompaktselt jalajälge ning lühikesi suitsukäike. Samuti on katalüsaatoril oma eluiga (8000-24000 tundi)[30] ning töötundide täissaamisel on vaja katalüsaatorit vahetada. Seega väheneb süsteemi efektiivsus ajas ning tekitab lisakulu.

## 5.2.2 SNCR

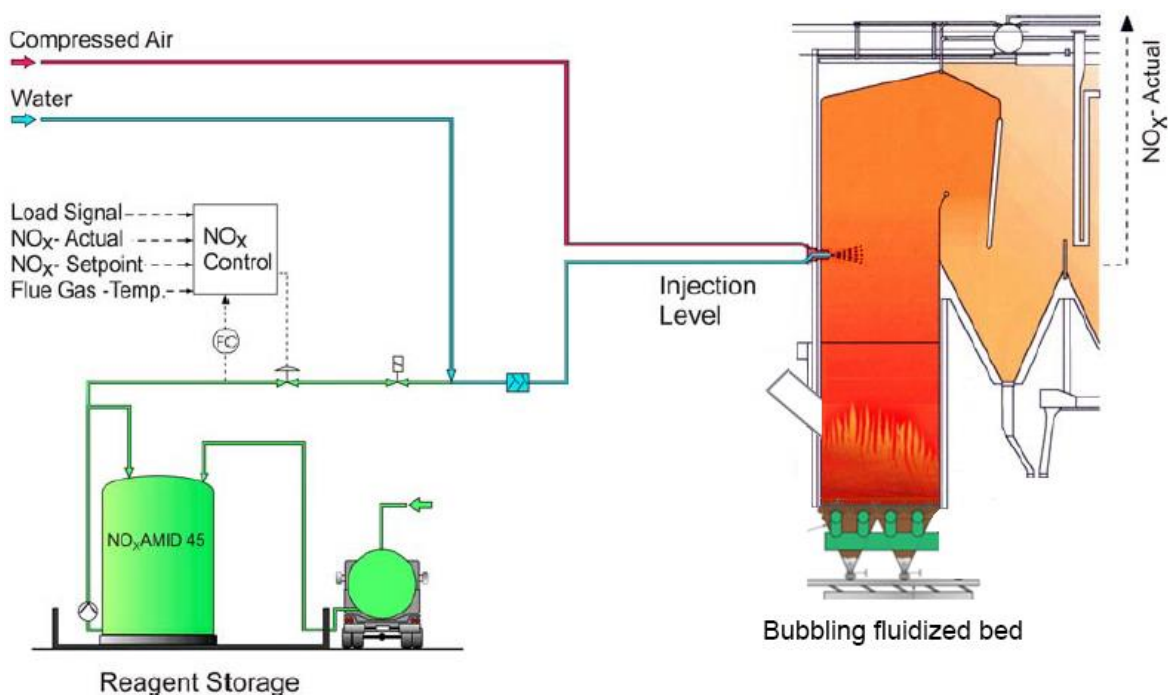
SNCR, ehk selektiivne mittekatalüütiline lämmastikuheitmete vähendamine, on teine väga populaarne NO<sub>x</sub> heitmete vähendamise tehnoloogia, mis on olnud kasutuses aastast 1974 ning on paigaldatud maailmas üle 300'le põletusseadmele.[29] Eestis olevatest hakkpuidu kateldest on SNCR kasutusel näiteks Tallinna elektrijaamas (Väo 1 ja 2). Väo 1 puhul on tegemist hakkpuidu MKK katlaga. Põhiline erinevus SCR'ga on

katalüsaatori puudumine ja asukoht süsteemis. Samuti ei toimu NO<sub>x</sub> vähendamine mitte suitsukäigus vaid koldes, kuumades suitsugaasides pärast põlemistsooni. Keskmiselt on SNCR tehngoloogiaga võimalik saavutada 20-70% vähem suitsugaasidega lahkuvaid NO<sub>x</sub>'e.[31]

NO<sub>x</sub> heitmete vähendamiseks kasutatakse SNCR puhul vedelal kujul ammoniaaki (NH<sub>3</sub>) ja/või UREA't. Olenevalt süsteemist võib ammoniaak esineda ka gaasilisel kujul. Ammoniaagi ja NO vaheline reaktsioon on kirjeldatud peatükis 5.2.1 valemiga 5.2. UREA kasutamise puhul tekib lisaks H<sub>2</sub>O'le ka CO<sub>2</sub>. Antud reaktsioon on kirjeldatud valemiga 5.8.[32]



Mõlemat kemikaali on võimalik seeda kasutada NO heitmete vähendamiseks. Peamiseks erinevuseks nende vahel on hoiustamine ja käsitlemine. Ammoniaagile on nõutud rangemad ohutussüsteemid ning sõltuvalt kosentratsioonist võib vajada hoiustamine ka registreeringut. Plussiks on ammoniaagi odavam hind võrreldes UREA'ga. UREA peamiseks eeliseks on see, et tegemist ei ole toksilise kemikaaliga ning hoiustamine on ohutum. NO<sub>x</sub> heitmete vähendamise seisukohalt on samuti UREA'l eelis kuna selle piisad levivad kaugemale suitsugaasides. See on ka üks põhjus miks suuremates põlemiskambrites kasutatakse UREA't. Negatiivseks pooleks on lahuse (50% vesi) madal kristalliseerumis temperatuur (17°C)[33], mistõttu on vaja jahedamas keskkonnas hoiustamisel pidevat tsirkulatsiooni ja soojendust.



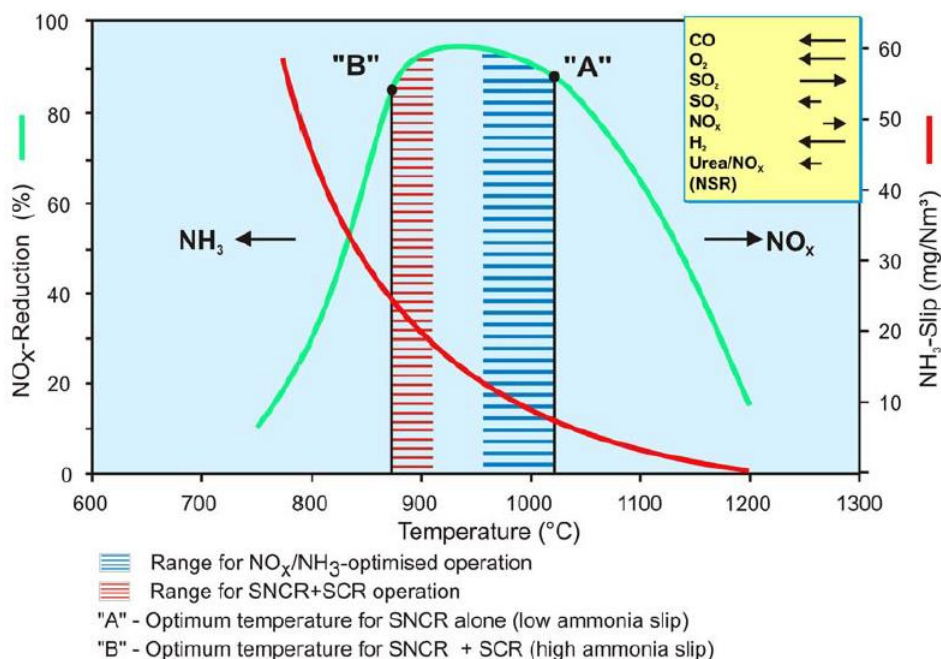
Joonis 5.8: SNCR UREA põhimõtteline skeem [32]

SNCR süsteem ise koosneb reageeriva aine (UREA või ammoniaak) mahutist, kolde segudüüsidest (inglise keeles lances) ja kontrollisüsteemist. Joonisel 5.8 on näidatud tüüpiline SNCR lahendus. Reageeriv aine pritsitakse koldesse läbi düüside koos suruõhu ja veega. Düüsid on enamasti jaotatud mööda kolde seina erinevatesse sektsioonidesse ning vastavalt vajadusele ka erinevatele tasanditele. Õige asukoha valik on väga oluline süsteemi seisukohast kuna sellest sõltub  $\text{NO}_x$ 'ga reageerimise efektiivsus.

Düüside asukoha valikul lähtutakse eelkõige parameetritest keskkonnas, mille juures toimub  $\text{NO}_x$  vähenemine kõige intensiivsemalt:

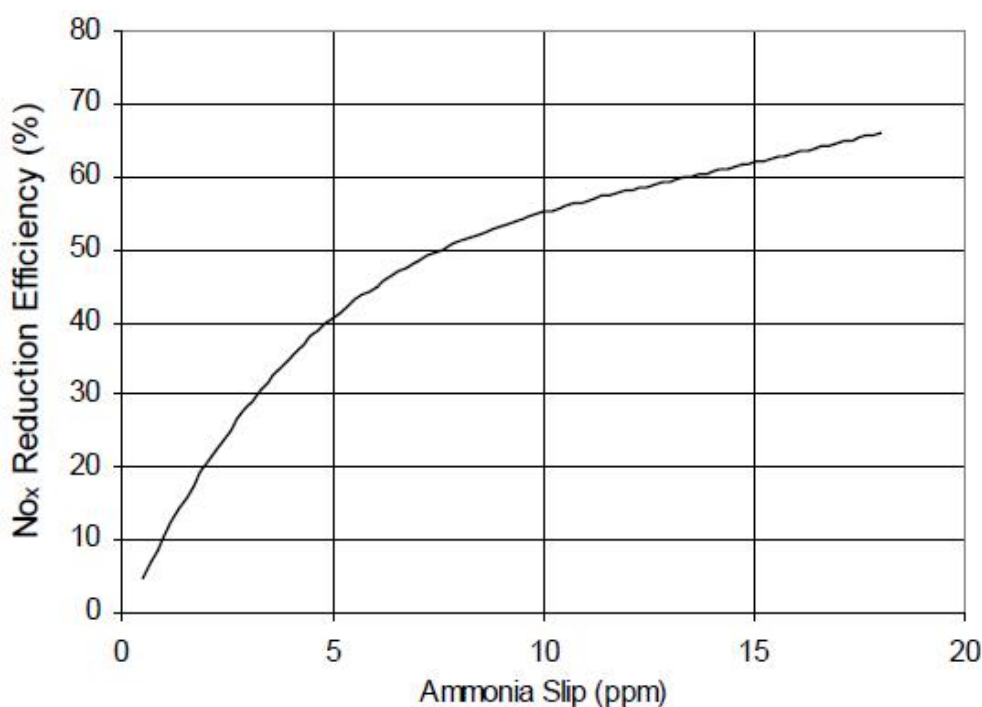
- Temperatuuri vahemik
- Reageeriva aine viibimisaeg keskkonnas
- Reageeriva aine segunemine suitsugaasiga

Temperatuur on üks olulisemaid parameetreid SNCR tehnoloogia puhul. Selleks, et toimuksid reaktsioonid  $\text{NO}$  ja ammoniaagi/UREA'ga võimalikult efektiivselt on vaja kindlat temperatuuri vahemikku. Kõige optimaalsemaks vahemikuks loetakse 900-1050°C.[32] Madalamatel temperatuuridel väheneb reaktsiooni intensiivsus ning keskkonda antav  $\text{NH}_3$  lahkub suitsugaasidega. Kõrgematel temperatuuridel hakkab aga  $\text{NH}_3$  oksüdeeruma ning tekitab uusi lämmastikoksiide. Kuna MKK katelde eripäraks on küllaltki madal kihi temperatuur (700-900°C), siis on vajalike temperatuuri tsoonide leidmine väga oluline. Enamasti on vajalik temperatuur leitav tertsiaalõhu kohal konvektiivses gaasikäigus (enne ülekuumendit).



Joonis 5.9: Temperatuuri aken  $\text{NO}_x$  heitmete optimaalseks vähendamiseks SNCR'ga [32]

SNCR süsteemi probleemseks kohaks on reageeriva aine koguse doseerimine. Koldes olev põlemine ei ole ühtlane kogu ristlõikes ning seetõttu tekib palju erinevaid tsoone. Ning peamiseks probleemiks on ebaeftiivne tagasiside, NO<sub>x</sub> heitmete mõõtmine toimub suitsukäigus enne korstent ning seega on tulemus viitega. Seega võib juhtuda olukord, kus soovitakse saavutada madalam NO<sub>x</sub> tase ning seega pritsitakse sisse liiga suur kogus reageerivat ainet. Sellega saavutatakse küll soovitud tulemus kuid see põhjustab ka reageerimata NH<sub>3</sub> kogust suitsugaasis. Optimaalseks reageerimata NH<sub>3</sub> koguseks suitsugaasis loetakse 5-10ppm.[33] Alates 25ppm'ist muutub ammoniaak tervisele kahjulikuks ning põhjustab kütuses oleva klooriga NH<sub>3</sub>Cl soolasis. Soolad kogunevad seadmetesse ja suitsukäikudesse ning põhjustavad korrosiooni. NO<sub>x</sub> vähendamise efektiivsuse ja üleliigse reageerimata ammoniaagi koguse suhe suitsugaasis on kuvatud joonisel 5.10.

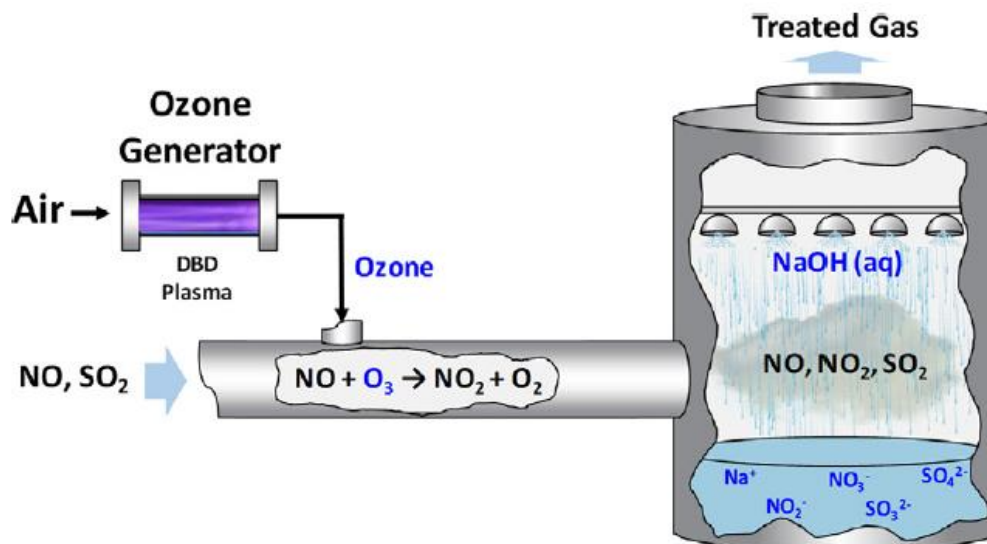


Joonis 5.10: NO<sub>x</sub> heitmete vähenemise sõltuvus reageerimata ammoniaagi kogusest suitsugaasis [33]

### 5.2.3 DeNO<sub>x</sub> skraber

Kui SCR ja SNCR on kõige levinuimad tehnoloogiad siis skraberite kasutamine NO<sub>x</sub> heitmete vähendamiseks veel nii populaarne ei ole. Põhjuseks on küllaltki uus ja keeruline süsteem, mis vajab rohkem seadmeid ja suuremat investeeringut kui näiteks SCR, mis on samuti eraldiseisev süsteem. Seadme tootjate sõnul on DeNO<sub>x</sub> skraberiga võimalik vähendada suitsugaasis olevaid NO<sub>x</sub> heitmeid rohkem kui 70%. [34]

Sarnaselt SCR'le paigaldatakse DeNOx skraberi suitsukäigule, enne korstent. Erinevuseks on katalüsaatori puudumine. Tehnoloogia põhineb suitsukäigus oleva gaasiliste NO<sub>x</sub> heitmete sidumisega vedelas olekus olevate leelistega (NaOH). Põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 5.11.

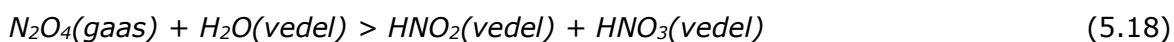
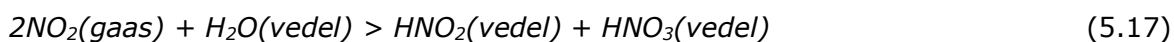
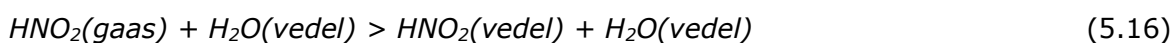


Joonis 5.11: DeNOx skrabberi vooluskeem [35]

Enne skraberisse sisenemist antakse suitsukäiku O<sub>3</sub> või ClO<sub>3</sub>'e[34], mis kiirendab suitsugaasis oleva NO oksüdeerimist. Tegemist on gaasilise faasilisega, milles toimuvad reaktsioonid on esitatud valemitega 5.9-5.14.[35]



Tekkinud ühendid on oma olekult gaasilise-vedela faasi piiril. Seetõttu andes keskkonda vett, toimub antud ühendite sidumine veega ning gaaside asemel on nad vedelas olekus. Reaktsioonid kirjeldatud valemitega 5.15-5.18.[35]



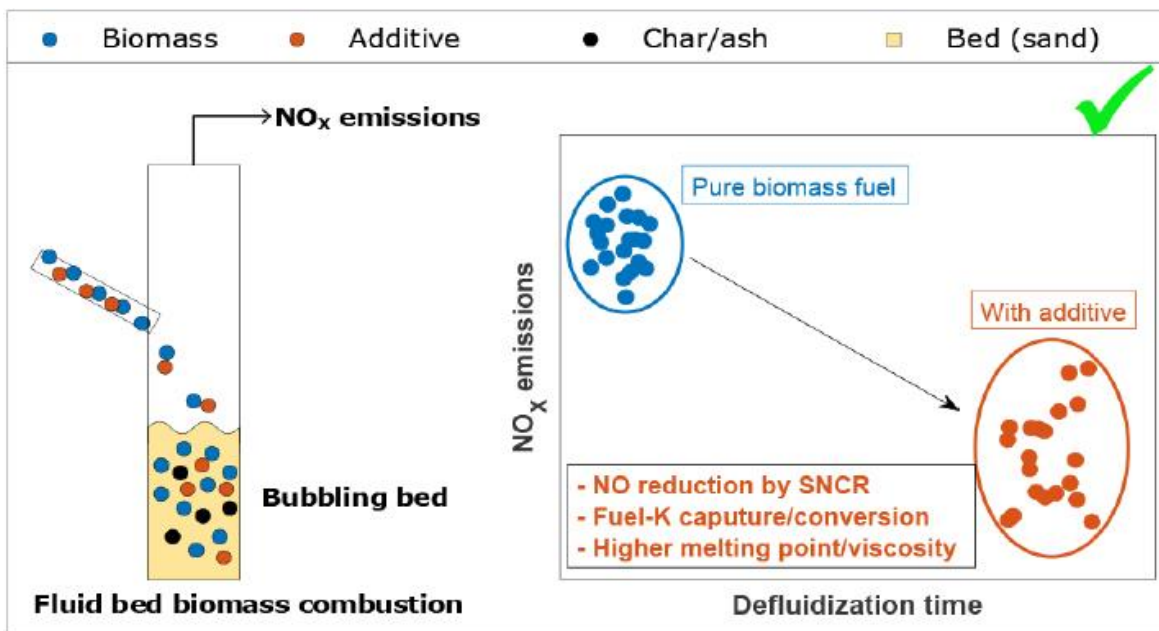
Tekkiv vedelal kujul  $\text{HNO}_2$  on aga ebastabiilne ning tahab laguneda tagasi gaasiliseks  $\text{NO}'\text{ks}$ . Seetõttu pritsitakse keskkonda leelist  $\text{NaOH}$ , mis neutraliseerib  $\text{HNO}_2$  valemiga 5.19.[35]  $\text{NaOH}$ 'ga reageerimise tagajärjel tekivad veega segunevad  $\text{NaNO}_2$  ja  $\text{NaNO}_3$  soolad, mis on võimalik keskkonnast eemaldada.



DeNOx skraberi tehnoloogia peamiseks positiivseks küljeks on see, et antud lahendust on võimalik lisada ka olemasolevale skraberile. Seeläbi on võimalik ühendada suitsugaaside puhastus,  $\text{NO}_x$  heitmete vähendamine ja kondenseerumissoojuse kasutamine.

### 5.2.4 DeNOx kihi lisandid

Kui eelnevalt mainitud sekundaarseid  $\text{NO}_x$  vähendamise tehnoloogiaid on võimalik paigaldada pea igat tüüpi põletusseadmetele, siis reageeriva tahke materjali lisamine põlemiskeskonda on pigem kasutusel ainult keevkihi puhul. Põhjuseks on kihi olemasolu, kus lisatava materjali viibimisaeg on piisavalt pikk reageerimiseks ja tekkivate ühendite mõjutamiseks juba pürolüüsi algaasis. Seda just eriti MKK puhul kuna erinevalt TKK'st ei toimu kihi lendlemist.



Joonis 5.12: DeNOx reageeriva tahke materjali kasutamine keevkihis [36]

Antud lahenduse plussiks on see, et materjali on küllaltki lihtne anda keskkonda nii koos kütusega kui ka segatuna liivaga. Probleemiks on aga selle õige materjali leidmine, mis vähendaks  $\text{NO}_x$  teket ja samal ajal ei põhjustaks kihi paakumist. Lisaks vajab materjal

tiheadat vahetust kuna osaleb otseselt pürolüüsi keskkonnas, kus toimub hakkpuidu koksist lämmastiku eraldumine.

Kirjanduse järgi on kõige sobivamad materjalid NH päritolu. Sellisteks materjalideks olid näiteks  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4$  ja  $\text{AlNH}_4(\text{SO}_4)_2$ . Uuringu järgi vähenes kütuses oleva lämmastiku muundumine  $\text{NO}_x$ ks 40%. Probleemiks aga tekkis  $\text{N}_2\text{O}$ , mille kogus kasvas kohati koguni rohkem kui 100%. [36] Seega ei ole  $\text{NO}_x$  vähendamise seisukohast tegemist väga kontrollitava ja lihtsa lahendusega.



## 6. NO<sub>x</sub> MUUTUS VÄO MKK NÄITEL

Utilitas Tallinna Elektriijaam koosneb kahest koostootmisjaamast: VÄO KTJ 1 ja VÄO KTJ 2. VÄO KTJ 1 hõlmab ühte hakkpuidu ja turba põletamiseks mõeldud keevkihtkollet (MKK). Peamiseks kütuseks on hakkpuit. Katla soojuslik võimsus on 67MW, auru kogus 28,2kg/s, temperatuur 530°C ja rõhk 110bar.

Uuringu eesmärgiks oli analüüsida põlemisõhu suhete mõju koldes olevale põlemise temperatuurile ja lämmastiku heitmete tekkele. Uuringu tellimuse põhjuseks oli tellija (elektriijaama) soov paigaldada hakkpuidu MKK katlale SNCR süsteem. Seega sooviti leida viise kuidas saavutada SNCR'i jaoks vajalik temperatuuri vahemik ja võimalikult madal NO<sub>x</sub> heitmete teke põlemisel SNCR kemikaalide koguse vähendamiseks.

### 6.1 Katsetuste läbiviimine

Kokku viidi läbi 6 kolde katsetust ja mõõdistust vahemikus 18.12.2020 ja 07.01.2021. Kõik katsed hõlmasid endas katsetusi erinevate põlemisõhkude suhetel, temperatuuride mõõtmist erinevates sektsioonides ja suitsugaasidega lahkuvate NO<sub>x</sub> ja CO heitmete kogust. Katla koormus mõõtmiste ajal oli 100%.

1. Katse 1: Katla MCR 100%, sekundaarõhk 80%, tertsiaalõhk 20%. Sekundaarõhu düüside siibrite kaalud originaal asendis.
2. Katse 2: Katla MCR 100%, sekundaarõhk 60%, tertsiaalõhk 40%. Sekundaarõhu düüside siibrite kaalud originaal asendis.
3. Katse 3: Katla MCR 100%, sekundaarõhk 60%, tertsiaalõhk 40%. Sekundaarõhu düüside siibrite kaalud -10cm originaal asendist.
4. Katse 4: Katla MCR 100%, sekundaarõhk 80%, tertsiaalõhk 20%. Sekundaarõhu düüside siibrite kaalud -10cm originaal asendist.
5. Katse 5: Katla MCR 100%, sekundaarõhk 60%, tertsiaalõhk 40%. Sekundaarõhu düüside siibrite kaalud -10cm originaal asendist.
6. Katse 6: Katla MCR 100%, sekundaarõhk 60%, tertsiaalõhk 40%. Sekundaarõhu düüside siibrite kaalud -10cm originaal asendist.
7. Katse 7: Katla MCR 100%, sekundaarõhk 60%, tertsiaalõhk 40%. Sekundaarõhu düüside siibrite kaalud -10cm originaal asendist. Kihi materjal vahetatud.

Enne iga katse algust jälgiti 1 tunni vältel katla parameetrite stabiilsust. Mõõdistuste ajal hoiti katla tööparameetreid võimalikult stabiilsena ja ligilähedal referents parameetritele. Juhul kui katla töö ei olnud enam stabiilne, lõpetati katsetus ning alustati uuesti pärast stabiilse olukorra saavutamist.

Katsete kestvus sõltus sellest, mitme põlemistsooni temperatuuri mõõdeti. Keskmiselt kulub ühe tsooni temperatuuri mõõtmisele 20 minutit.

Kõikide katsete protokollid on lisatud lisades 1-7.

## 6.2 Parameetrid ja kasutatud seadmed

Kõikide katsetuste ajal mõõdistati tabelis 6.1 kuvatud parameetreid.

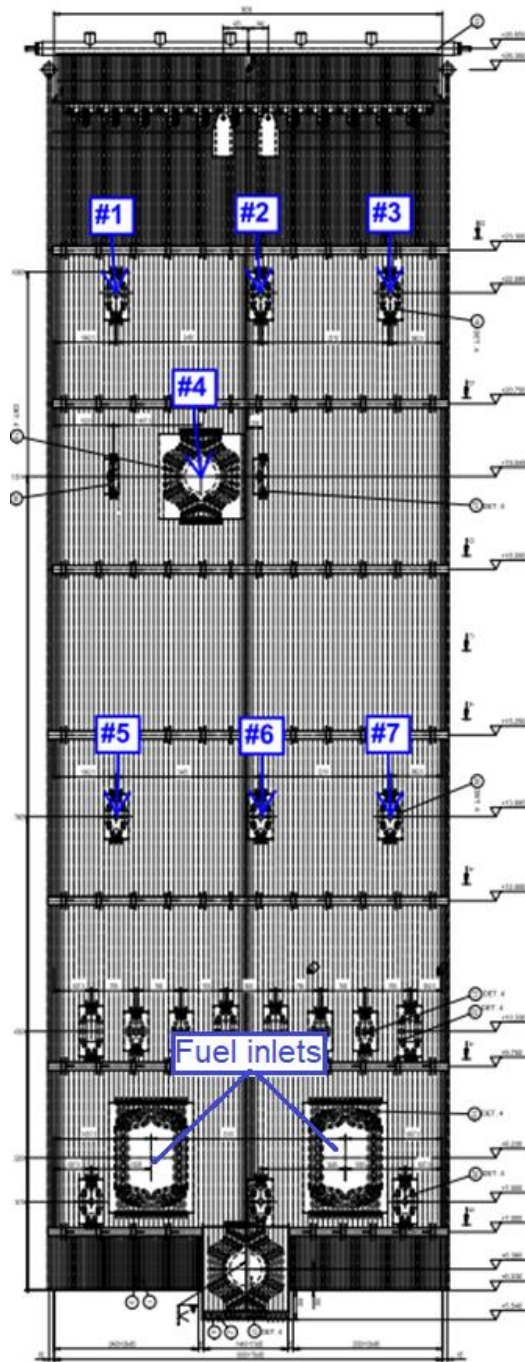
Tabel 6.1: Mõõdetavad parameetrid ja väärtuste hankimine

| Parameeter                                     | Meetod   |
|--|--|
| Kolde põlemistemperatuurid [°C]                | Mõõdetud temperatuuriga anduriga, mis on kinnitatud 4m pikkuse vesijahutusega toru külge |
| NO <sub>x</sub> [ppm]                          | Mõõdetud WÖHLER A550 analüsaatoriga + DCS väärtus  |
| CO [ppm]                                       | Mõõdetud WÖHLER A550 analüsaatoriga + DCS väärtus  |
| O <sub>2</sub> [%]                             | Mõõdetud WÖHLER A550 analüsaatoriga + DCS väärtus  |
| Primaarõhu kulu [m <sup>3</sup> /h]            | DCS väärtus  |
| Sekundaar + tertsiaal kulu [m <sup>3</sup> /h] | DCS väärtus  |
| Sekundaar + tertsiaal rõhk [mbar]              | DCS väärtus  |
| Sekundaarõhu kulu [m <sup>3</sup> /h]          | DCS väärtus  |
| Tertsiaalõhu kulu [m <sup>3</sup> /h]          | DCS väärtus  |
| Retsirkulatsiooni kulu [m <sup>3</sup> /h]     | DCS väärtus  |
| Põletite jahutusõhu kulu [m <sup>3</sup> /h]   | DCS väärtus  |
| Kütuse niiskus [%]                             | „Oven dry“ meetod  |

Põlemistsoonide temperatuure koldes mõõdeti temperatuuri anduriga, mis oli kinnitatud 4 meetri pikkuse vesijahutusega toru külge. Temperatuuri mõõtmise andur koos toruga on kuvatud lisas 11. Suitsugaaside NO<sub>x</sub>, CO ja O<sub>2</sub> väärtused mõõdeti enne elektrifiltrit WÖHLER A550 analüsaatoriga ja jaama statsionaarse analüsaatoriga korstnas (väärtus DCS'st).

### 6.2.1 Temperatuuri mõõdistuste asukohad

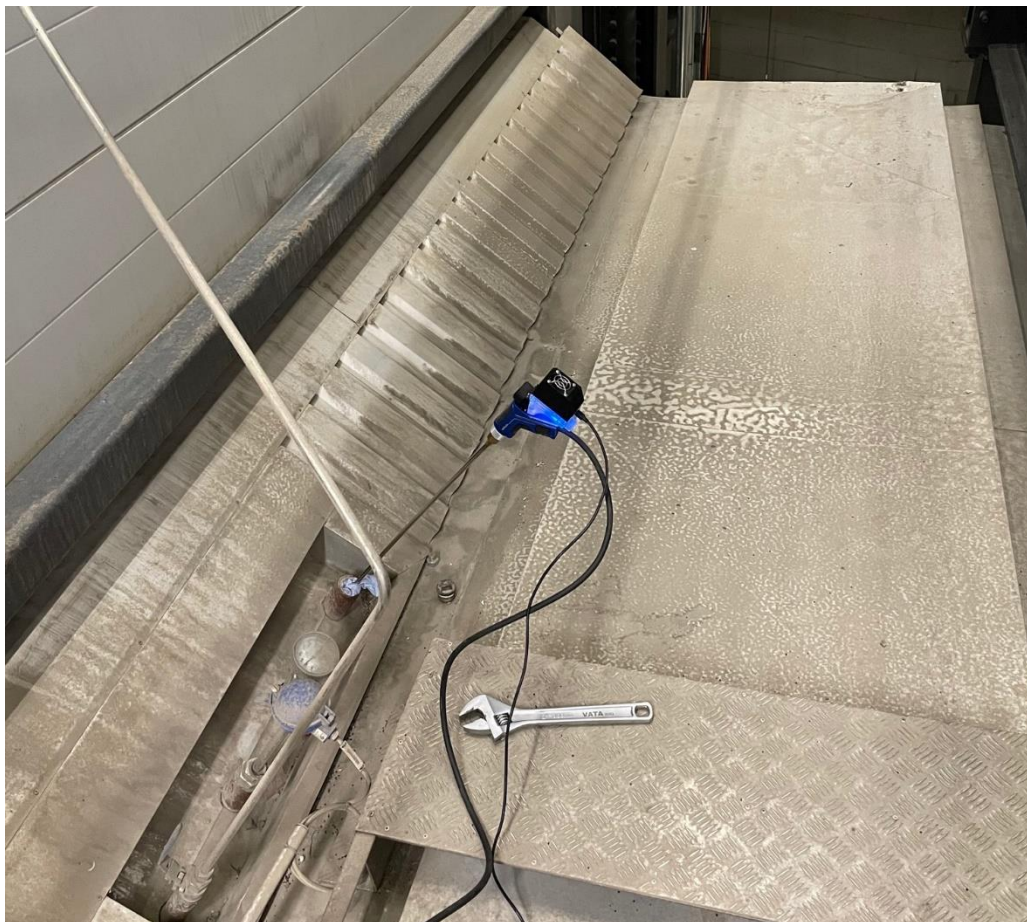
Põlemise temperatuuri mõõdeti keevkihtkatlas erinevates tsoonides. Kokku oli koldes võimalik temperatuuri mõõta 7's positsioonis, mis on kuvatud joonisel 6.1. Igas positsioonis oli kokku 7 mõõtmist erinevates sügavustes kolde seinast: 50cm kuni 350cm. Igas positsioonis/sügavuses hoiti temperatuuri andurit kuni temperatuurinäit oli saavutanud stabiilsuse.



Joonis 6.1: VÄO KTJ 1 MKK keevkihtkatla temperatuuri mõõdistuste positsioonid

## 6.2.2 Suitsugaaside mõõdistuste asukoht

Lahkuvate suitsugaaside väärtused ( $\text{NO}_x$ , CO ja  $\text{O}_2$ ) on saadud WÖHLER A550 analüsaatoriga suitsukäigult elektrifiltri ja ökonomaiseri vahel, ja korstnast jaama statsionaarselt analüsaatorilt (CEMS). Ajutise analüsaatori paigaldus näidatud joonisel 6.2. Peatükis 6.3 kasutatud tulemuste andmed on võetud jaama DCS'ist, ehk statsionaarselt analüsaatorilt. Kuna enne analüsaatorit on paigaldatud ka suitsugaaside kondensaator, siis tulemused on kuiva suitsugaasiga.



Joonis 6.2: Suitsugaaside mõõtmine elektrifiltri ja ökonomaiseri vahel

## 6.2.3 Põlemisõhkude mõõdistuste asukohad

Põlemisõhkude (primaar-, sekundaar ja tertsiaalõhk) koguste väärtused on hangitud jaama DCS'ist. MKK keevkihtkolde põlemisõhkude sisendid on näidatud lisades 8 ja 9.

## 6.2.4 Kütuseproovid

Hakkpuidu kütuseproovid võeti jaama poolt iga tunni aja tagant katsetuse ajal. Vajalik kütus võeti kütuseetteande teost enne kollet. Proovivõtu asukoht on näidatud lisan 10. Kütuseniiskus määrati kütuseproovi kuivatamisega kütusekapis, ehk nn „oven dry“ meetodiga.

## 6.3 Mõõdistuste tulemused

### 6.3.1 Sekundaarõhk 80, tertsiaalõhk 20

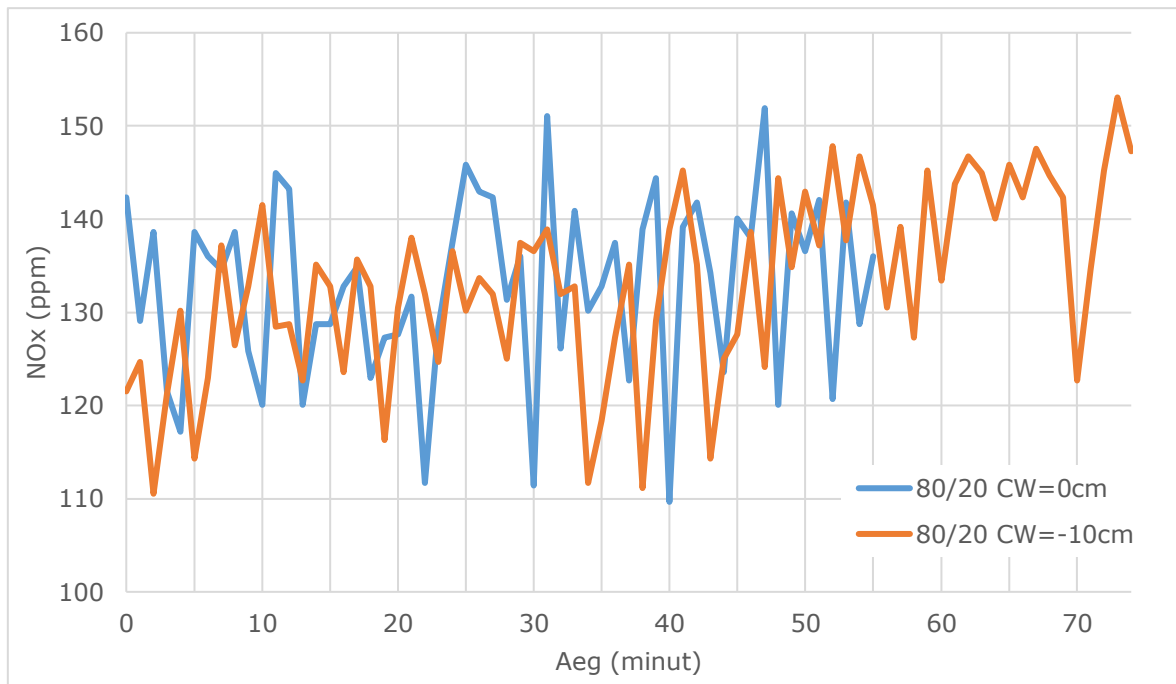
VÄO KTJ 1 MKK katlas kasutatakse normaalolukorras 80/20 suhet sekundaar- ja tertsiaalõhu jaotuseks kihi peale. Sellega saavutatakse põhiline kütuse põlemine tsoonis 2 ning väiksemas koguses järelpõlemine tsoonis 3.



Joonis 6.3: VÄO 1 MKK sekundaarõhu düüside vastukaal

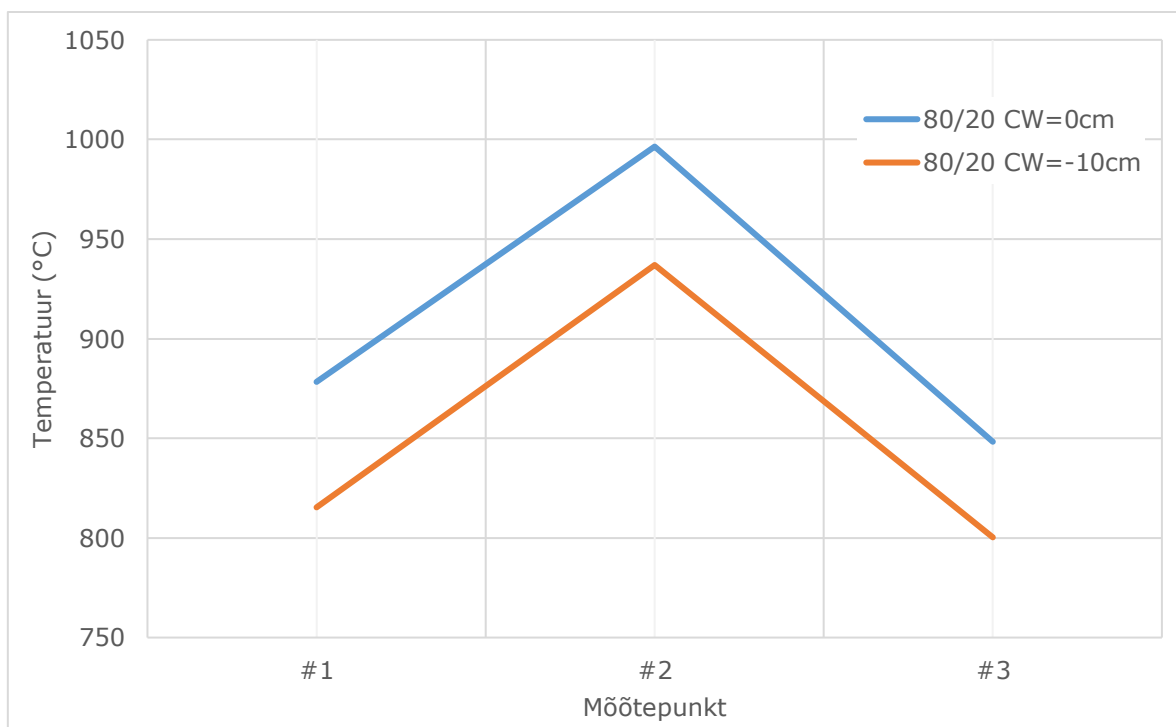
Sekundaarõhku antakse põlemisse läbi käsitsi reguleeritavate düüside/klappidega. Klappide ava pindala reguleerimine käib vastukaaluga. Seega ei ole tegemist lahendusega, kus toimuks pidev asendi reguleerimine vastavalt olukorrale. Kohapealse vaatluse järgi oli sekundaarõhu kiirus düüsidest küllaltki agressiivne ning õhu vool jõudis vastasseina.

80/20 põlemisõhkude konfiguratsiooniga viisime läbi 2 mõõdistust (katse 1 ja katse 4). Katse 4 korral liigutamise vastukaalu asukohta -10cm originaal positsioonist (orig. Positsioon joonisel 6.3 kuvatud sinise joonega). Liigutamise põhjuseks oli soov suunata sekundaarõhk rohkem leeki ja vähem kolde vastasseina. Vastukaalu asendi muutmiseiga suurendasime klapi ava, mis vähendas düüsist väljumise kiirust.



Joonis 6.4: VÄO 1 MKK NO<sub>x</sub> kogus kuivas suitsugaasis 80/20 põlemisõhkude suhtega

NO<sub>x</sub> heitmete kogused 80/20 konfiguratsiooniga on kuvatud joonisel 6.4. Keskmiseks NO<sub>x</sub> koguseks nii katse 1 (80/20 0cm) kui ka katse 2 (80/20 -10cm) ajal oli 133ppm. Mõlema mõõtmise ajal oli O<sub>2</sub> näitaja 3,4% korstnast mõõdetuna. Põlemisõhu vooluhulk keskkonda oli 18,4m<sup>3</sup>/h, millest sekundaarõhk oli 12,6m<sup>3</sup>/h ja tertsiaalõhk 3,2m<sup>3</sup>/h. Ülejäänud 2,6m<sup>3</sup>/h õhku anti keskkonda läbi käivituspõletite jahutuse. Hakkpuidu kütuseniiskus oli 43%.



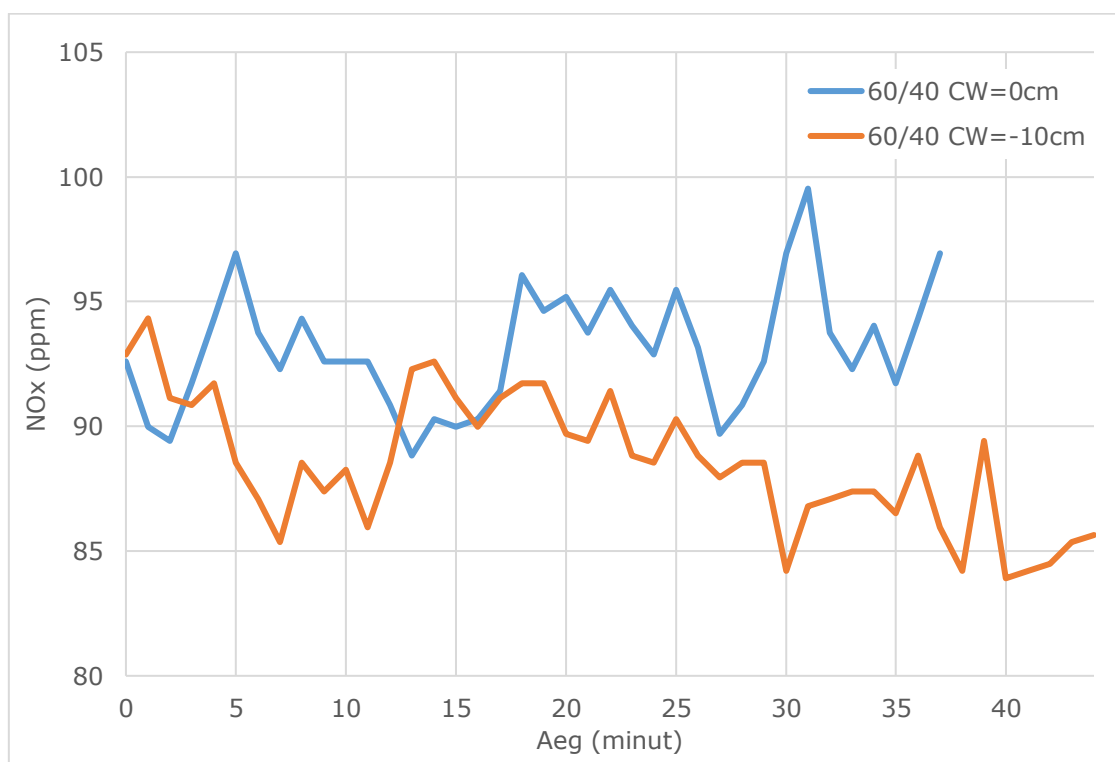
Joonis 6.5: VÄO 1 MKK temperatuurid ülemises tsoonis 80/20 põlemisõhkude suhtega

Vastukaalude liigutamise tulemusena kõigil sekundaarõhu klappidel vähenes ülemises tsoonis (mõõtepunktid #1-3) temperatuur 57°C. Lisaks üldisele muutusele vähenes ka temperatuuride erinevus põlemiskambri vasaku (mõõtepunkt #1) ja parema (mõõtepunkt #3) külje vahel. Kui katse 1 ajal oli  $\Delta t=30^{\circ}\text{C}$ , siis pärast vastukaalude liigutamist (katse 4) oli  $\Delta t=15^{\circ}\text{C}$ . Seega on vastukaalude liigutamisega võimalik vähendada ja ühtlustada koldes olevat põlemist ja seeläbi temperatuuri.

Kuna eesmärgiks on ka  $\text{NO}_x$  heitmete vähendamine, siis järgmisena otsustasime proovida põlemisõhkude suhet 60/40.

### 6.3.2 Sekundaarõhk 60, tertsiaalõhk 40

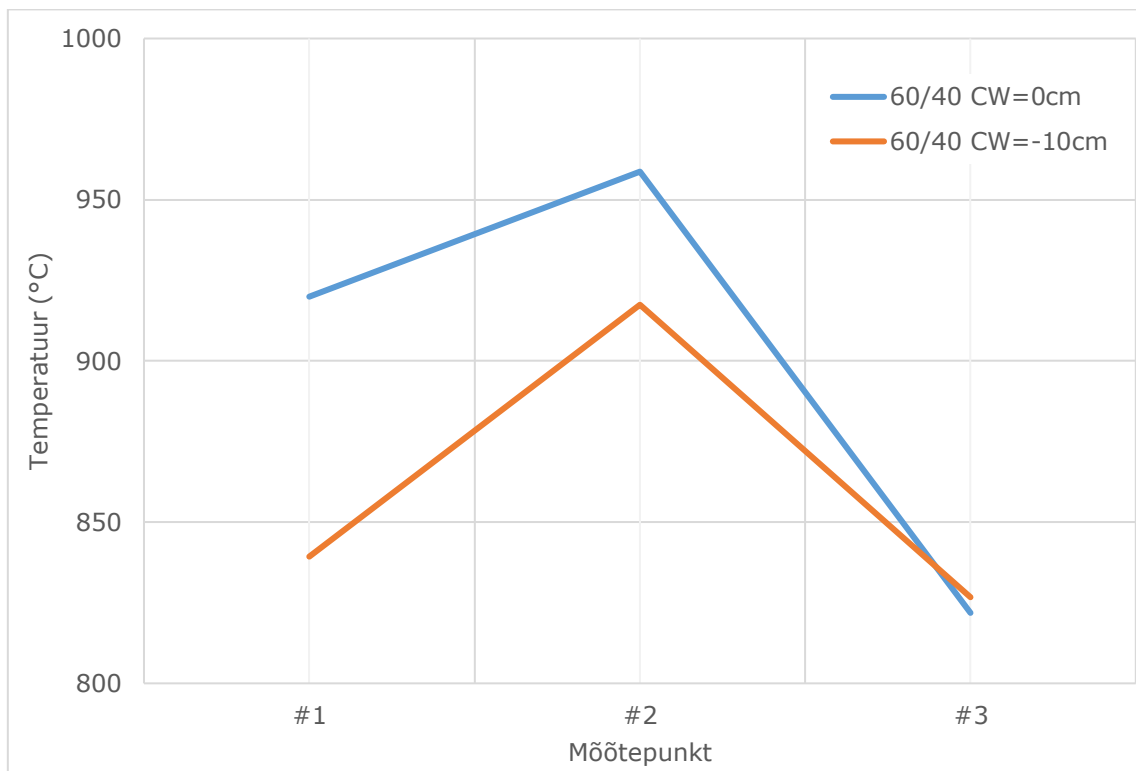
Peatükis 5.1.1 oli kirjeldatud astmeline põlemisõhkude jaotus, kus tekitati kihi kohale 2 põlemistsooni. Sekundaarõhuga tsoon, kus  $\lambda < 1$  ja tertsiaalõhuga tsoon, kus  $\lambda > 1$ . 80/20 konfiguratsiooni puhul toimub põhiline põlemine otse kihi kohal sekundaarõhu tsoonis. Seega otsustasime edaspidi proovida konfiguratsiooni 60/40, et vähendada liigõhu osakaalu vahetult kihi kohal.



Joonis 6.6: VÄO 1 MKK  $\text{NO}_x$  kogus kuivas suitsugaasis 60/40 põlemisõhkude suhtega (katse 2 ja 3)

Suitsugaasi  $\text{NO}_x$  heitmete kogused katsete 2 ja 3 ajal on kuvatud joonisel 6.6. 60/40 konfiguratsiooni kasutades oli keskmiseks  $\text{NO}_x$  koguseks katse 2 ajal 93ppm ja katse 3 ajal 89ppm. Mõlema mõõtmise ajal oli  $\text{O}_2$  näit korstnast mõõdetuna 4%. Kihi kohale antava üldise põlemisõhu kogus oli kokku  $19,5\text{m}^3/\text{h}$ , millest moodustas sekundaarõhk

10,1m<sup>3</sup>/h ja tertsiaalõhk 6,8m<sup>3</sup>/h. Ülejäänud 2,6m<sup>3</sup>/h õhust anti põlemiskeskonda läbi käivituspõletite jahutuse. Hakkpuidu kütuseniiskus oli 43%.

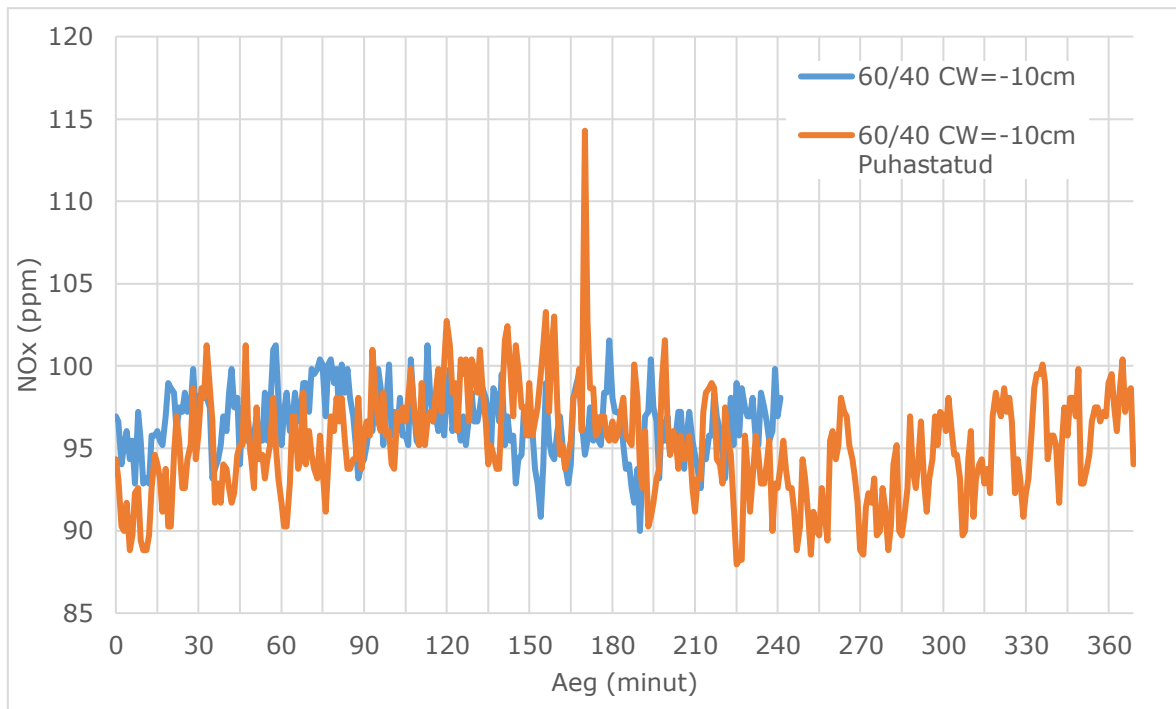


Joonis 6.7: VÄO 1 MKK temperatuurid ülemises tsoonis 60/40 põlemisõhkude suhtega (katse 2 ja 3)

Katsete 2 ja 3 ajal oli kolde ülemise sektsiooni (mõõtepunktid #1-3) keskmine temperatuur vastavalt 908°C ja 851°C. Ehk sarnaselt 80/20 konfiguratsioonile vähenes temperatuur vastukaalu liigutades ka 60/40 suhte korral. Suurim mõju vastukaalude liigutamisel 60/40 puhul on mõõtepunktis #1 ehk kolde vasakul küljel. Mõõtepunktis #1 langes temperatuur 81°C. Selle tagajärjel ühtlustus temperatuur ka vasaku ja parema külje osas. Kui originaal vastukaaludega oli  $\Delta t=98^{\circ}\text{C}$ , siis pärast asukoha muutust oli  $\Delta t=12^{\circ}\text{C}$ . Ehk põlemisõhkude osakaalude muutus nõuab ka klappide reguleerimist ühtlase põlemise tagamiseks koldes.

Kuna 60/40 põlemisõhkude jaotamisega saavutasime NO<sub>x</sub> heitmete vähenemise ning vastukaalu liigutamisega -10cm stabiilsema temperatuuri ülemises tsoonis, siis jätkasime kolde mõõdistamist konfiguratsiooniga 60/40 CW=-10cm katsega 6. Katse 5 jäeti pooleli kuna CO kontsentratsioon oli ebastabiilne.



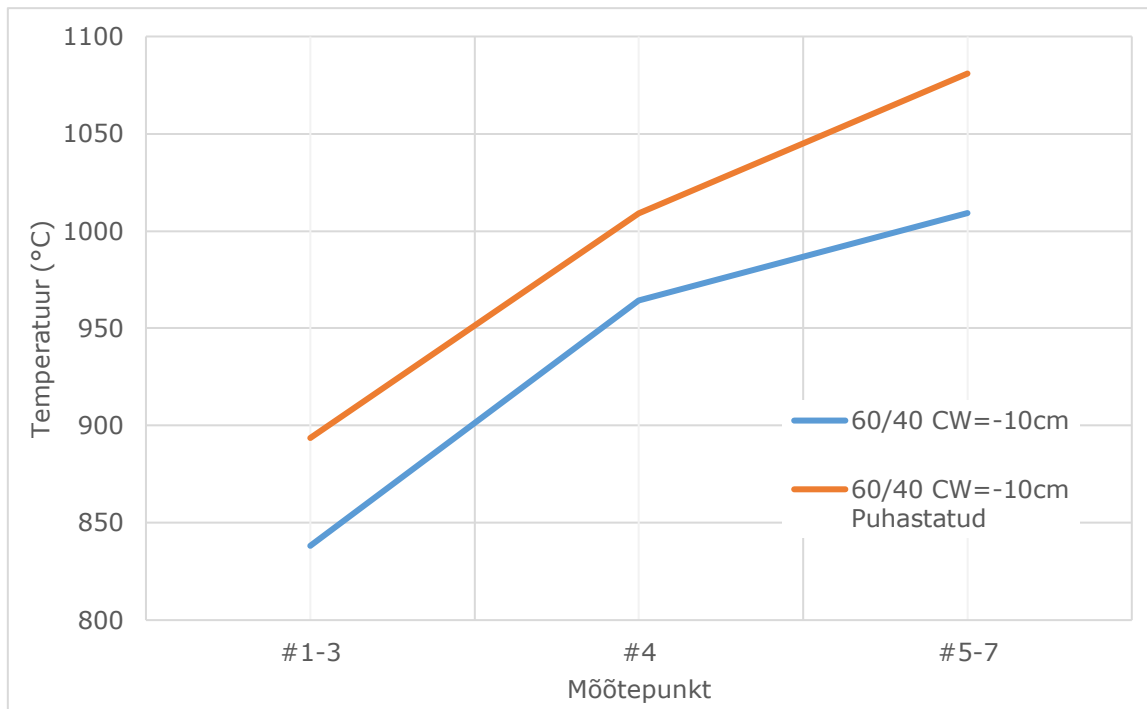


Joonis 6.8: VÄO 1 MKK NO<sub>x</sub> kogus kuivas suitsugaasis 60/40 põlemisõhkude suhtega (katse 6 ja 7)

Joonisel 6.8 on kuvatud suitsugaasi NO<sub>x</sub> heitmete kogused põlemisõhu 60/40 konfiguratsiooni korral. Katse 6 ajal oli keskmine NO<sub>x</sub> 97ppm ja O<sub>2</sub> 4,3%. Katse 7 ajal oli keskmine NO<sub>x</sub> 95ppm ja O<sub>2</sub> 4,8%. Kahe mõõtmise erinevus seisneb selles, et katse 7 teostati pärast kihi materjali (liiva) vahetust uue vastu. Kihi vahetamine puhta vastu selget mõju NO<sub>x</sub> tekke osas ei avaldanud.

Katse 6: Põlemisõhkude kogus 19,3m<sup>3</sup>/h, millest sekundaar 10,1m<sup>3</sup>/h ja tertsiaal 6,7m<sup>3</sup>/h. Retsirkulatsioon kihi alla 1,9m<sup>3</sup>/h. Kütuseniiskus 45,6%.

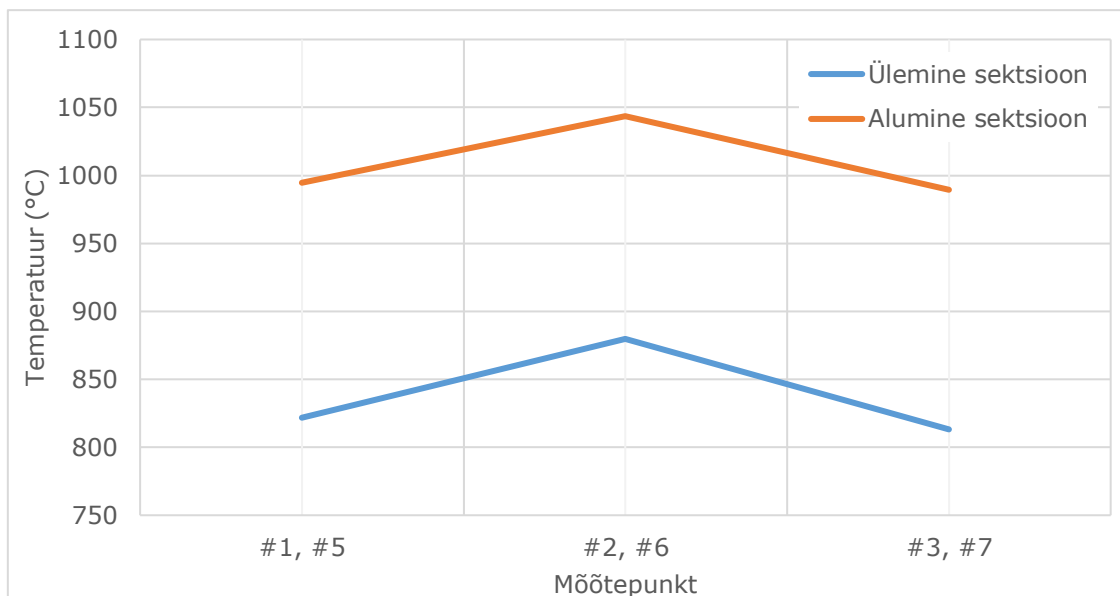
Katse 7: Põlemisõhkude kogus 20,4m<sup>3</sup>/h, millest sekundaar 10,6m<sup>3</sup>/h ja tertsiaal 7,m<sup>3</sup>/h. Retsirkulatsioon kihi alla 0m<sup>3</sup>/h. Kütuseniiskus 50,5%.



Joonis 6.9: VÄO 1 MKK temperatuurid ülemises, keskmises ja alumises sektsioonis (katse 6)

Joonisel 6.9 on kuvatud koldes olev keskmine temperatuur tsoonide kaupa. Kihi kohal, mõõtepunktides #5-7 oli katse 6 ajal keskmiseks temperatuuriks 1009°C. Koldes kõrgemale liikudes langes temperatuur ning mõõtepunktis #4 oli 964°C. Kõige ülemisel tasandil, mõõtepunktides #1-3, oli temperatuur 838°C.

Katse 7 ajal olid temperatuurid keskmiselt 60°C kõrgemad. Põhjuseks võis olla katse 7 ajal olnud kõrgem kütuseniiskus (50,5%) kui katse 6 ajal (45,6%). Suurema kütuseniiskuse tõttu toimus oli kihi temperatuur madalam ning põlemine toimus kõrgemal koldes, mis põhjendaks temperatuuri suurema tõusu. Lisaks oli retsirkulatsiooni osakaal katse 7 ajal 0m<sup>3</sup>/h, samas kui katse 6 ajal oli retsirkulatsioon 1,9m<sup>3</sup>/h.



Joonis 6.10: VÄO 1 MKK temperatuuride erinevus ülemises ja alumises sektsioonis (katse 6)

Temperatuuri erinevus kolde vasaku ja parema külje vahel näib vastavalt joonisel 6.10 kuvatud mõõdistuste tulemusena ühtlane. Alumisel tasandil on  $\Delta t=5^{\circ}\text{C}$  ja ülemisel tasandil  $\Delta t=9^{\circ}\text{C}$ . Põhjus miks parem sein on jahedam võib olla selles, et paremas seinas on käivituspõletid. Käivituspõletid tarbivad jahutusõhku, mis antakse koldesse kihi peale.

## 6.4 Järeldused

Vastavalt peatükis 4.2 kirjeldatud Euroopa Liidu keskmise võimsusega põletusseadmete direktiivile (EL) 2015/2193 on maksimaalne kuivades suitsugaasides lubatud  $\text{NO}_x$  kogus hakkpuitu põletades  $300\text{mg}/\text{Nm}^3$ ,  $\text{O}_2=6\%$ . Tabelis 6.2 on esitatud mõõtmiste käigus saadud  $\text{NO}_x$  kogused, teisendatuna  $6\%$ 'le hapnikule kasutades valemeid 6.1 ja 6.2.[37] Seega vastab VÄO KTJ 1 hakkpuidu MKK katel ka originaal seadistusega lämmastikheitmete nõuetele.

$$\text{NO}_{x,(\text{O}_2=6\%)} = \text{NO}_{x,\text{mõõdetud}} * (20,99-6)/(20,99-\text{O}_{2,\text{mõõdetud}}) \quad (6.1)$$

$$\text{NO}_{x,\text{mg}/\text{Nm}^3} = \text{NO}_{x,\text{ppm}} * 46/22,4 \quad (6.2)$$

Tabel 6.2: Mõõtmiste tulemusena saadud  $\text{NO}_x$  kogused kuivas suitsugaasis teisendatuna  $\text{O}_2=6\%$

|  | Katse 1<br>80/20 | Katse 2<br>60/40 | Katse 3<br>60/40 | Katse 4<br>80/20 | Katse 6<br>60/40 | Katse 7<br>60/40 |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\text{NO}_x, \text{O}_2=6\%$<br>(ppm)                       | 113              | 82               | 78               | 114              | 86               | 88               |
| $\text{NO}_x, \text{O}_2=6\%$<br>( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) | 232              | 168              | 160              | 233              | 177              | 180              |

VÄO KTJ 1 hakkpuidu MKK katla põlemist reguleerides on võimalik saavutada NO<sub>x</sub> heitmete tase kuivades suitsugaasides alla 200mg/Nm<sup>3</sup>. Vähendades kihi kohale antavas põlemisõhus sekundaarõhu osakaalu 80'lt 60'le ja suurendades tertsiaalõhu osakaalu vastavalt 20'lt 40'le, vähenes NO<sub>x</sub> heitmete kogus kuivas suitsugaasis 28%. Sellega saavutati olukord, kus kihi peal oli hapniku osakaal väiksem ning seega pikendati kütuse viibimist koldes ja oksüdeerumine hapnikuga oli raskendatud.

Kuna 60/40 konfiguratsioon sai valitud katse meetodil, siis on teoorias võimalik VÄO MKK katlas vähendada NO<sub>x</sub> teket veelgi rohkem. See tähendaks rohkem mõõdistusi erinevatel õhkude suhetel. Lisaks on võimalik ühendada sekundaarõhu kanali külge ka retsirkulatsioon, millega oleks võimalik hoida sekundaarõhu kohal olevas põlemistsoonis  $\lambda < 1$ .

Järelopõlemise, ehk viimase tsooni, osakaalu tõstmine on paraku osaliselt ka problemaatiline VÄO 1 MKK katlas. Probleemiks on küllaltki madal kolde konstruktsioon, mistõttu on tertsiaalõhu ja ülekuumendi torude kõrguste vahel vaid ~4m. Seega võib põlemise osakaalu suurendamine ülemises tsoonis põhjustada tuha sadestiste hulka ülekuumendi torudel.

#### **6.4.1 Temperatuur**

Koldes olevat temperatuuri mõjutab kõige rohkem sekundaarõhu klappide vastukaalu liigutamine. Seda nii 80/20 kui ka 60/40 konfiguratsiooni puhul. Kui vastukaalu originaalasendis oli kolde ülemise sektsiooni keskmine temperatuur ~905°C, siis pärast vastukaalu liigutamist -10cm vähenes temperatuur 855°C'ni.

Lisaks paranes temperatuuri disbilans kolde vasaku ja parema külje vahel. Kuna paremas seinas asuvad käivituspõletid, mis annavad pidevalt lisaõhku koldesse, siis tuleks vastavalt reguleerida ka sekundaarõhu klappe, et kambris olev õhukogus oleks jaotatud ühtlaselt. Probleemiks on klappide konstruktsioon, mis muudab reguleerimise keeruliseks kuna düüsist väljuv õhukiirus sõltub lisaks ava suurusele ka antava õhu kogusest. Seega 50% koormuse juures ei pruugi seatud asend olla enam optimaalseim. Lahendus oleks automatiseeritud klappid.

SNCR seisukohalt on ülemises tsoonis asuv temperatuur joonise 5.9 järgi ideaalne. Kuna ülemise tasandi mõõtepunktid #1-3 olid küllaltki kõrgel, siis on võimalik paigaldada SNCR'i ka madalamale, kus on temperatuur kõrgem. Näiteks mõõtepunkt #4 kohale, kus oli temperatuur 964°C ka pärast vastukaalude liigutamist. Lisaks on antud kõrgustel rohkem ruumi katla konstruktsiooni seisukohalt SNCR sisendite paigaldamiseks.

## KOKKUVÕTE

Hakkpuidu põletamisel keevkihttehnoloogiaga on võimalik saavutada NO<sub>x</sub> heitmete kogused, mis on alla käesoleval hetkel Euroopa Liidu poolt kehtestatud piirmäärade. Ning seda ka ilma optimaalse põlemisprotsessita lämmastikoksiidi heitmete tekke seisukohalt. Edasiste piirmäärade karmistumise korral on võimalik heitmeid vähendada nii primaarsete kui ka sekundaarsete meetoditega. VÄO 1 MKK koldes läbiviidud katse näitas, et astmeliste põlemistsoonide tekitamisega on võimalik mõjutada NO<sub>x</sub> teket. Muutes kihi kohal olevate põlemisõhkude suhet 80/20'lt (sekundaar/tertsiaal) 60/40'le vähendamise lisaõhu kogust sekundaar tsoonis ning intensiivistasime järelpõlemist. Sellega saavutasime VÄO 1 MKK koldes NO<sub>x</sub> heitmete koguse kuivades suitsugaasides alla 200 mg/Nm<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6%). Probleemiks võib antud lahenduse korral tekkida olemasolevate põletusseadmete konstruktsioonilised eripärad nagu näiteks liiga lühike põlemiskäik. See on näiteks probleemiks ka VÄO 1 MKK kolde puhul. Seega tuleb iga põlemisseadet käsitleda erinevalt ning optimaalsete sätete leidmiseks viia läbi rohkem katseid.

Juhul kui primaarsetest meetoditest ei piisa ning soovitakse tekkivaid NO<sub>x</sub> heitmeid veelgi alandada, siis on alati võimalik põletusseadmetele paigaldada ka NO<sub>x</sub> heitmeid vähendavad seadmed. Levinuimaks lahenduseks on reageeriva kemikaaliga (ammoniaak või UREA) põlemisel tekkiva NO sidumine. Eestis on enimlevinud SNCR'i kasutamine, kus reageeriv aine antakse otse koldesse, põlemiskäiku. Kokku on sekundaarsete meetoditega võimalik vähendada suitsugaasiga lahkuvate NO<sub>x</sub> heitmete kogust kuni 95% (SNCR kuni 70%). VÄO 1 MKK koldes läbiviidud temperatuuri mõõtmised näitasid, et keevkihtpõletuse korral on temperatuurid koldes ideaalsed SNCR'i kasutamiseks. Lisaks näitasid katsed, et temperatuure on võimalik mõjutada põlemisõhkude düüse reguleerides.

Seega võib tulevikus aina karmistuvate piirmäärade tõttu tekkida olukord, kus hakkpuidu põletusseadmed peavad kõik olema varustatud NO<sub>x</sub> heitmeid vähendavate tehnoloogiatega. Sellest hoolimata tuleks pöörata kõigepealt tähelepanu ka põlemise karakteristikale. Isegi, kui põlemist reguleerides ei saavutata vaja minev piirmäär, siis ühtlaste tsoonidega põlemiskeskonna saavutamine on siiski mõistlik. Lisaks aitab optimaalsete põlemisparameetrite leidmine vähendada NO<sub>x</sub>'de peale kuluvate kemikaalide kulu. Ning seega on ettevõtetele antud tegevusest ka rahaline võit.

## SUMMARY

There are numerous ways to meet the current NO<sub>x</sub> emission limits set by the European Union. One of such is by utilizing fluidized bed technology. By using woodchips in a fluidized bed combustion it's possible to achieve NO<sub>x</sub> values below the set limits by the European Union. That even without the most optimal process parameters in regards to NO<sub>x</sub> formation. It's also possible to lower the NO<sub>x</sub> emissions even more with both primary and secondary measures if the limits should stricthen in the future. The tests carried out on the VÄO 1 BFB boiler indicated that it's possible to affect the formation of NO<sub>x</sub> with staged air combustion. By adjusting the combustion air ratio above the bed from 80/20 (secondary/tertiary) to 60/40 we reduced the amount of excess air in the secondary zone and increased the intensity of after burn in the tertiary zone. In result the NO<sub>x</sub> emissions in dry flue gases were below 200 mg/Nm<sup>3</sup> (O<sub>2</sub>=6%). Incorporating such a solution can be problematic for existing boiler systems. For example, the combustion zone might be too short due to the construction of the boiler, in which case air staging might move the combustion zone too close to the superheater. This is also the case with the VÄO 1 BFB boiler. Which is why every boiler has to be viewed case by case and carried out different measurements and tests to find the most optimal parameters.

If primary measures aren't enough to achieve the desired NO<sub>x</sub> values, then it's also possible to install additional equipment to the existing system that would reduce NO<sub>x</sub> emissions. The most common solution is to use a reactive chemical (ammonia or UREA) to react with NO inside the system at various locations. In Estonia, SNCR is mostly used. With SNCR the reactive chemical is injected directly into the combustion chamber. The secondary measures are capable of reducing the NO<sub>x</sub> emissions up to 95% (with SNCR up to 70%). The tests carried out on the VÄO 1 BFB boiler indicated that the combustion temperatures are ideal for incorporating SNCR into the system. The tests also indicated that it's possible to affect the temperatures by adjusting the combustion air inlets.

It is possible that woodchip powered boilers are required to have extra equipment for NO<sub>x</sub> reduction in the future if the emission limits continue to stricthen. Regardless of that, it's still wise to also pay attention to the combustion characteristic. Even if it's not possible to achieve the required emission limits through primary measures, it's still important to have a balanced combustion throughout the zone. Plus reducing the NO<sub>x</sub> emissions through primary measures first also reduces the amount of reactive chemicals used in the secondary technology. Which also means less expenses for the operators.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] "Statistikaamet KE0230: ENERGIABILANSS ."
- [2] "Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>), Why and How They Are Controlled," 1999. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/ttn/catc>
- [3] "<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/sources-and-emissions-of-air>."
- [4] "<https://www.riigiteataja.ee/akt/110112017018>."
- [5] Ulusoy, "NO<sub>x</sub> formation and reduction in fluidized bed combustion of biomass."
- [6] H. Zhou, A. D. Jensen, P. Glarborg, and A. Kavaliauskas, "Formation and reduction of nitric oxide in fixed-bed combustion of straw," *Fuel*, vol. 85, no. 5–6, pp. 705–716, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.fuel.2005.08.038.
- [7] J. M. Jones, A. R. Lea-Langton, L. Ma, M. Pourkashanian, and A. Williams, "Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels," 2014. doi: 10.1007/978-1-4471-6437-1.
- [8] A. Demirbas, "Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products." [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/enconman](http://www.elsevier.com/locate/enconman)
- [9] H. Li *et al.*, "Characteristics and formation of nitrogen-containing products from the pyrolysis of maple wood and maize straw," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 163, p. 105462, May 2022, doi: 10.1016/j.jaap.2022.105462.
- [10] H. Chen, Y. Wang, G. Xu, and K. Yoshikawa, "Fuel-N evolution during the pyrolysis of industrial biomass wastes with high nitrogen content," *Energies (Basel)*, vol. 5, no. 12, pp. 5418–5438, 2012, doi: 10.3390/en5125418.
- [11] S. Yuan, X. li Chen, W. feng Li, H. feng Liu, and F. chen Wang, "Nitrogen conversion under rapid pyrolysis of two types of aquatic biomass and corresponding blends with coal," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 21, pp. 10124–10130, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.08.047.
- [12] P. Glarborg, J. A. Miller, B. Ruscic, and S. J. Klippenstein, "Modeling nitrogen chemistry in combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 67. Elsevier Ltd, pp. 31–68, Jul. 01, 2018. doi: 10.1016/j.pecs.2018.01.002.
- [13] Zevenhoven & Kilpinen, "NITROGEN," 2004.
- [14] H.Spliethoff, "Power Generation from Solid Fuels," 2010. doi: 10.1007/978-3-642-02856-4.
- [15] S. Niksa, "Predicting nitrogen release during coal tar decomposition," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 3, pp. 2765–2772, 2019, doi: 10.1016/j.proci.2018.06.086.

- [16] M. Miao *et al.*, "Experimental study on N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emission characteristics of five high-volatile fuels in bubbling bed combustion," *Fuel Processing Technology*, vol. 208, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.fuproc.2020.106517.
- [17] V. Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, S. Soosaar, and T. V. Vares, "Tallinna Tehnikaülikool BIOKÜTUSE KASUTAJA KÄSIRAAMAT," 2005.
- [18] "Tahked biokütused. Kütuste spetsifikatsioonid ja klassid. Osa 1: Üldnõuded. ISO 17225-1:2021"
- [19] S. v. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the chemical composition of biomass," *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, May 2010. doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022.
- [20] A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, and H. Spliethoff, "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 1, pp. 21–50, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2008.07.012.
- [21] P. W. Li and C. S. Chyang, "A comprehensive study on NO<sub>x</sub> emission and fuel nitrogen conversion of solid biomass in bubbling fluidized beds under staged combustion," *Journal of the Energy Institute*, vol. 93, no. 1, pp. 324–334, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.joei.2019.02.007.
- [22] *EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV (EL) 2015/ 2193, - 25. november 2015.*
- [23] *EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2010/75/EL, 24. november 2010, tööstusheidete kohta (saastuse kompleksne vältimine ja kontroll).* 2010.
- [24] P. Jukola, M. Huttunen, P. Dernjatin, and J. Heikkilä, "The Finnish and Swedish National Committees Finnish-Swedish Flame Days 2013-1-METHODS FOR NO<sub>x</sub> EMISSION REDUCTION IN BFB COMBUSTION: A CFD STUDY."
- [25] E. Houshfar, T. Løvås, and Ø. Skreiberg, "Experimental investigation on NO<sub>x</sub> reduction by primary measures in biomass combustion: Straw, peat, sewage sludge, forest residues and wood pellets," *Energies (Basel)*, vol. 5, no. 2, pp. 270–290, 2012, doi: 10.3390/en5020270.
- [26] R. Salzman and T. Nussbaumer, "Fuel staging for NO<sub>x</sub> reduction in biomass combustion: Experiments and modelling," *Energy and Fuels*, vol. 15, no. 3, pp. 575–582, May 2001, doi: 10.1021/ef0001383.
- [27] Valmet, "Recovery Boiler SCR-A Challenge and an Opportunity in Retrofit Cases."
- [28] "ADVANCED CONTROL METHODS FOR REDUCING NITROGEN OXIDES IN A FLUIDIZED BED BOILER."
- [29] Bruce G. Miller, *Clean Coal Engineering Technology*. Elsevier, 2011. doi: 10.1016/C2009-0-20236-4.



- [30] J. L. Sorrels, D. D. Randall, K. S. Schaffner, and C. Richardson Fry, "Chapter 2 Selective Catalytic Reduction," 2019.
- [31] "[https://www.valmet.com/energyproduction/air-emission-control/nox-reduction/sncr/.](https://www.valmet.com/energyproduction/air-emission-control/nox-reduction/sncr/)"
- [32] Dipl.-I. Bernd Von Der Heide, "Advanced SNCR Technology for Power Plants," 2011.
- [33] "Section 4 NO x Controls Section 4.2 NO x Post-Combustion."
- [34] "[https://www.valmet.com/energyproduction/air-emission-control/nox-reduction/nox-scrubber/.](https://www.valmet.com/energyproduction/air-emission-control/nox-reduction/nox-scrubber/)"
- [35] M. S. Kang, J. Shin, T. U. Yu, and J. Hwang, "Simultaneous removal of gaseous NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> by gas-phase oxidation with ozone and wet scrubbing with sodium hydroxide," *Chemical Engineering Journal*, vol. 381, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.122601.
- [36] B. Ulusoy *et al.*, "Multifunctional Additives for NO<sub>x</sub> Abatement in Fluidized Bed Biomass Combustion," *Energy and Fuels*, vol. 35, no. 15, pp. 12367–12379, Aug. 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01186.
- [37] "[http://www.globalcombustion.com/nox-measurement/.](http://www.globalcombustion.com/nox-measurement/)"

**LISAD**

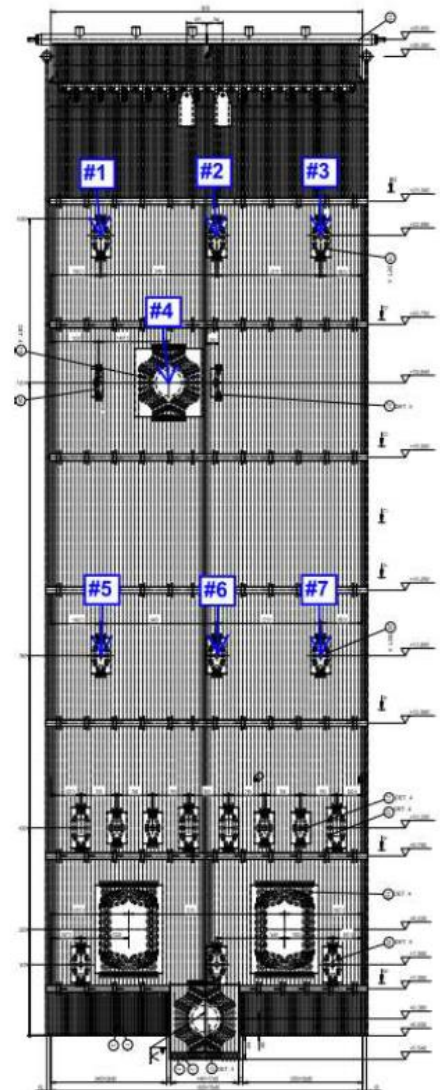
## Lisa 1 Katse 1 protokoll

Kuupäev: 18.12.2020

| Režiimi kirjeldus  |  |
|--|--|
| Katse 1<br>80% sekundaar, 20% tertsiaal<br>Vastukaal: olemasolev |  |

| Kolde temperatuuri mõõtmised |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Aeg           | esiseinast 50cm [°C] | esiseinast 100cm [°C] | esiseinast 150cm [°C] | esiseinast 200cm [°C] | esiseinast 250cm [°C] | esiseinast 300cm [°C] | esiseinast 350cm [°C] |
| Mõõtepunkt #1                | 11:06 - 11:19 | 748                  | 856                   | 892                   | 915                   | 873                   | 917                   | 947                   |
| Mõõtepunkt #2                | 10:30 - 10:45 | 945                  | 1008                  | 1020                  | 1003                  | 994                   | 999                   | 1006                  |
| Mõõtepunkt #3                | 10:47 - 11:00 | 724                  | 834                   | 823                   | 856                   | 867                   | 906                   | 928                   |
| Mõõtepunkt #4                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #5                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #6                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #7                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

| Stabiilse režiimi keskmised emissiooni näitajad |               |                |          |                 |
|---|---------------|----------------|----------|-----------------|
|   | Aeg           | CEMS (korsten) | enne ECO | BPE analüsaator |
| NOx [ppm]                                       | 10:20 - 11:20 | 133            |          | 130             |
| CO [ppm]  | 10:20 - 11:20 | 106            |          | 140             |
| O2 (%)  | 10:20 - 11:20 | 3,4            | 2,8      | 2,8             |
| primaar [m3/h]                                  | 10:20 - 11:20 | 11,7           |          |                 |
| sek+tertsiaal [m3/h]                            | 10:20 - 11:20 | 18,2           |          |                 |
| rõhk sek+tert (mbar)                            | 10:20 - 11:20 | 45             |          |                 |
| sekundaar [m3/h]                                | 10:20 - 11:20 | 12,4           |          |                 |
| tertsiaal [m3/h]                                | 10:20 - 11:20 | 3,1            |          |                 |
| retsirkulatsioon [m3/h]                         | 10:20 - 11:20 | 2,1            |          |                 |
| põletid [m3/h]                                  | 10:20 - 11:20 | 1,3            |          |                 |
| kütuse niiskus [%]                              |               | 43             |          |                 |



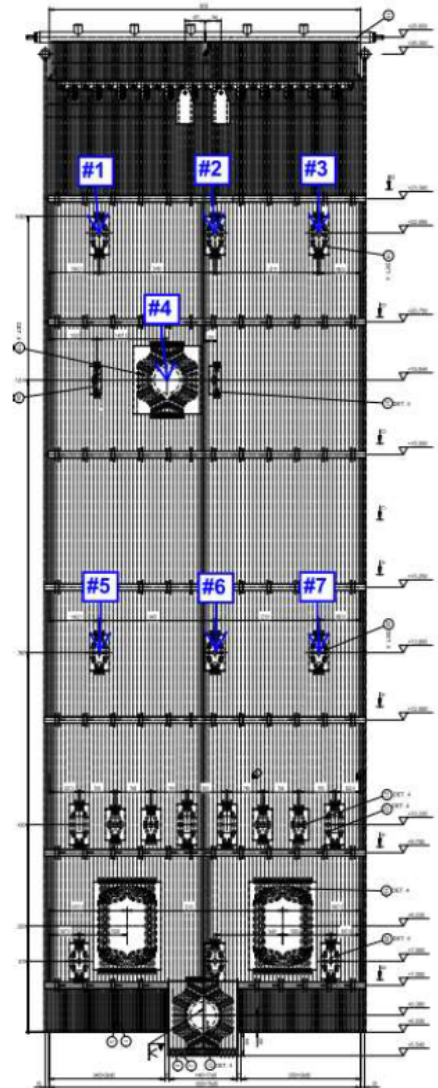
## Lisa 2 Katse 2 protokoll

Kuupäev: 18.12.2020

| Režiimi kirjeldus  |  |
|--|--|
| Katse 2<br>60% sekundaar, 40% tertsiaal<br>Vastukaal: olemasolev |  |

| Kolde temperatuuri mõõtmised |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Aeg           | esiseinast 50cm [°C] | esiseinast 100cm [°C] | esiseinast 150cm [°C] | esiseinast 200cm [°C] | esiseinast 250cm [°C] | esiseinast 300cm [°C] | esiseinast 350cm [°C] |
| Mõõtepunkt #1                | 11:58 - 12:08 | 766                  | 895                   | 930                   | 946                   | 944                   | 955                   | 1003                  |
| Mõõtepunkt #2                | 12:11 - 12:18 | 921                  | 966                   | 987                   | 947                   | 946                   | 976                   | 968                   |
| Mõõtepunkt #3                | 12:22 - 12:32 | 730                  | 791                   | 813                   | 838                   | 850                   | 866                   | 865                   |
| Mõõtepunkt #4                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #5                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #6                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #7                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

| Stabiilse režiimi keskmised emisiooni näitajad |               |                |          |                 |
|--|---------------|----------------|----------|-----------------|
|  | Aeg           | CEMS (korsten) | enne ECO | BPE analüsaator |
| NOx [ppm]                                      | 11:55 - 12:33 | 93             |          | 95              |
| CO [ppm]                                       | 11:55 - 12:33 | 117            |          | 125             |
| O2 (%)   | 11:55 - 12:33 | 4,0            | 3,4      | 3,3             |
| primaar [m3/h]                                 | 11:55 - 12:33 | 11,8           |          |                 |
| sek+tertsiaal [m3/h]                           | 11:55 - 12:33 | 19,4           |          |                 |
| rõhk sek+tert (mbar)                           | 11:55 - 12:33 | 45             |          |                 |
| sekundaar [m3/h]                               | 11:55 - 12:33 | 10,1           |          |                 |
| tertsiaal [m3/h]                               | 11:55 - 12:33 | 6,7            |          |                 |
| retsirkulatsioon [m3/h]                        | 11:55 - 12:33 | 2,1            |          |                 |
| põletid [m3/h]                                 | 11:55 - 12:33 | 1,3            |          |                 |
| kütuse niiskus [%]                             |               | 43             |          |                 |



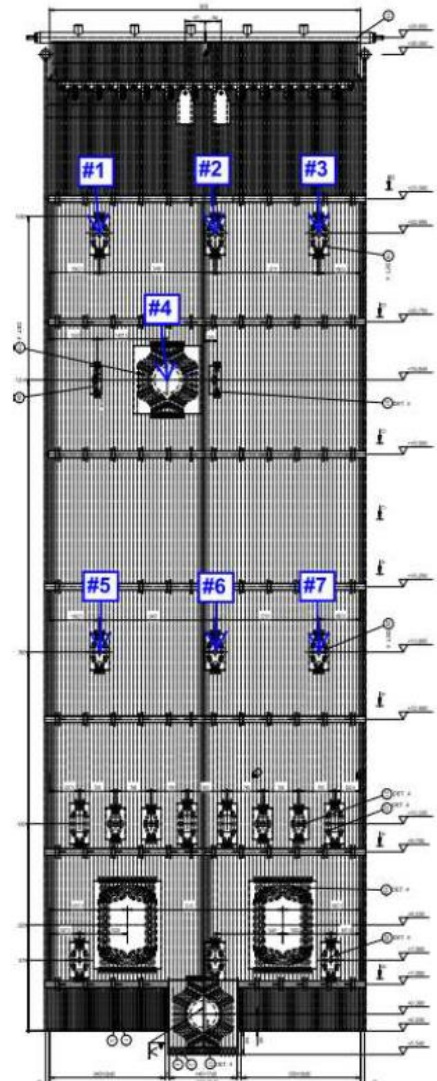
## Lisa 3 Katse 3 protokoll

Kuupäev: 18.12.2020

| Režiimi kirjeldus  |  |
|--|--|
| Katse 3<br>60% sekundaar, 40% tertsiaal<br>Vastukaal: sekundaaril -10 cm |  |

| Kolde temperatuuri mõõtmised |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Aeg           | esiseinast 50cm [°C] | esiseinast 100cm [°C] | esiseinast 150cm [°C] | esiseinast 200cm [°C] | esiseinast 250cm [°C] | esiseinast 300cm [°C] | esiseinast 350cm [°C] |
| Mõõtepunkt #1                | 13:52 - 14:01 | 736                  | 839                   | 860                   | 873                   | 848                   | 860                   | 859                   |
| Mõõtepunkt #2                | 13:41 - 13:50 | 882                  | 913                   | 928                   | 926                   | 918                   | 934                   | 921                   |
| Mõõtepunkt #3                | 13:24 - 13:37 | 749                  | 820                   | 833                   | 828                   | 820                   | 861                   | 876                   |
| Mõõtepunkt #4                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #5                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #6                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #7                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

| Stabiilse režiimi keskmised emisiooni näitajad |               |                |          |                 |
|--|---------------|----------------|----------|-----------------|
|  | Aeg           | CEMS (korsten) | enne ECO | BPE analüsaator |
| NOx [ppm]                                      | 13:20 - 14:05 | 89             |          | 93              |
| CO [ppm]                                       | 13:20 - 14:05 | 152            |          | 160             |
| O2 (%)   | 13:20 - 14:05 | 4,0            | 3,4      | 3,3             |
| primaar [m3/h]                                 | 13:20 - 14:05 | 11,6           |          |                 |
| sek+tertsiaal [m3/h]                           | 13:20 - 14:05 | 19,6           |          |                 |
| rõhk sek+tert (mbar)                           | 13:20 - 14:05 | 45             |          |                 |
| sekundaar [m3/h]                               | 13:20 - 14:05 | 10,2           |          |                 |
| tertsiaal [m3/h]                               | 13:20 - 14:05 | 6,8            |          |                 |
| retsirkulatsioon [m3/h]                        | 13:20 - 14:05 | 2,3            |          |                 |
| põletid [m3/h]                                 | 13:20 - 14:05 | 1,3            |          |                 |
| kütuse niiskus [%]                             |               | 43             |          |                 |



## Lisa 4 Katse 4 protokoll

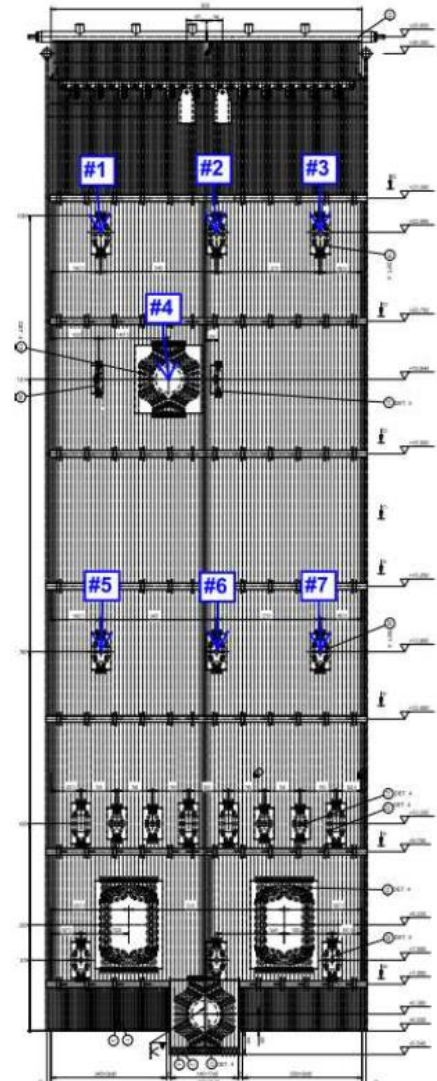
Kuupäev: 18.12.2020

| Režiimi kirjeldus  |  |
|--|--|
| Katse 4<br>80% sekundaar, 20% tertsiaal<br>Vastukaal: sekundaaril -10 cm |  |

| Kolde temperatuuri mõõtmised |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Aeg           | esiseinast 50cm [°C] | esiseinast 100cm [°C] | esiseinast 150cm [°C] | esiseinast 200cm [°C] | esiseinast 250cm [°C] | esiseinast 300cm [°C] | esiseinast 350cm [°C] |
| Mõõtepunkt #1                | 14:23 - 14:33 | 714                  | 809                   | 828                   | 838                   | 837                   | 839                   | 843                   |
| Mõõtepunkt #2                | 14:37 - 14:51 | 897                  | 933                   | 947                   | 946                   | 937                   | 943                   | 956                   |
| Mõõtepunkt #3                | 15:17 - 15:32 | 739                  | 786                   | 797                   | 800                   | 804                   | 838                   | 838                   |
| Mõõtepunkt #4                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #5                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #6                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #7                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

| Stabiilse režiimi keskmised emisiooni näitajad |               |                |          |                 |
|--|---------------|----------------|----------|-----------------|
|  | Aeg           | CEMS (korsten) | enne ECO | BPE analüsaator |
| NOx [ppm]                                      | 14:20 - 15:35 | 133            |          | 130             |
| CO [ppm]                                       | 14:20 - 15:35 | 119            |          | 190             |
| O2 (%)   | 14:20 - 15:35 | 3,4            | 2,9      | 2,6             |
| primaar [m3/h]                                 | 14:20 - 15:35 | 11,6           |          |                 |
| sek+tertsiaal [m3/h]                           | 14:20 - 15:35 | 18,6           |          |                 |
| rõhk sek+tert (mbar)                           | 14:20 - 15:35 | 45             |          |                 |
| sekundaar [m3/h]                               | 14:20 - 15:35 | 12,8           |          |                 |
| tertsiaal [m3/h]                               | 14:20 - 15:35 | 3,2            |          |                 |
| retsirkulatsioon [m3/h]                        | 14:20 - 15:35 | 2,2            |          |                 |
| põletid [m3/h]                                 | 14:20 - 15:35 | 1,4            |          |                 |
| kütuse niiskus [%]                             |               | 43             |          |                 |

Kell 15:00 O2 = 2,8 -> 3,0%



## Lisa 5 Katse 5 protokoll

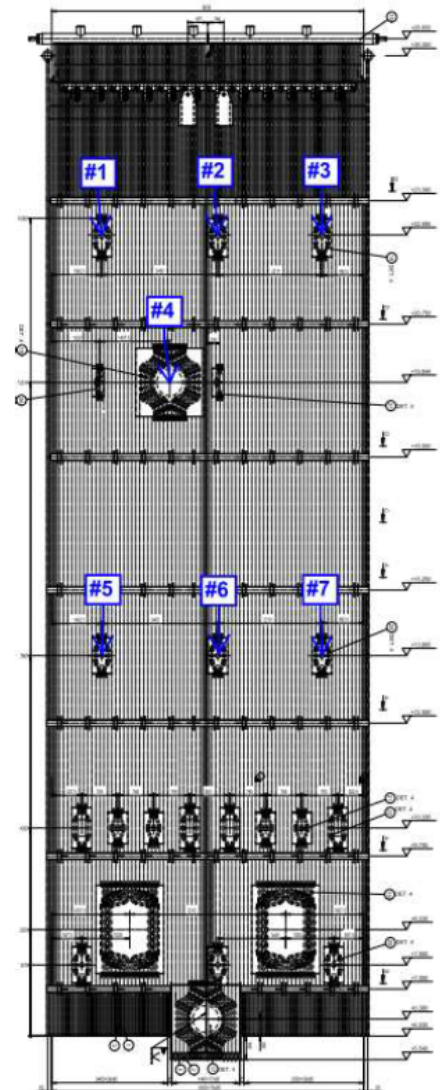
Kuupäev: 07.01.2021

| Režiimi kirjeldus  |  |
|--|--|
| Katse 5<br>60% sekundaar, 40% tertsiaal<br>Vastukaal: sekundaaril -10 cm |  |

| Kolde temperatuuri mõõtmised |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Aeg           | esiseinast 50cm [°C] | esiseinast 100cm [°C] | esiseinast 150cm [°C] | esiseinast 200cm [°C] | esiseinast 250cm [°C] | esiseinast 300cm [°C] | esiseinast 350cm [°C] |
| Mõõtepunkt #1                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #2                | 11:27 - 11:54 | 849                  | 897                   | 937                   | 909                   | 907                   | 922                   | 912                   |
| Mõõtepunkt #3                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #4                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #5                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #6                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #7                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

| Stabiilse režiimi keskmised emissiooni näitajad |               |                |          |                 |
|---|---------------|----------------|----------|-----------------|
|   | Aeg           | CEMS (korsten) | enne ECO | BPE analüsaator |
| NOx [ppm]                                       | 11:25 - 11:55 | 88             |          | 95              |
| CO [ppm]  | 11:25 - 11:55 | 182            |          | 250             |
| O2 (%)  | 11:25 - 11:55 | 3,8            | 3,2      | 3,2             |
| primaar [m3/h]                                  | 11:25 - 11:55 | 12,2           |          |                 |
| sek+tertsiaal [m3/h]                            | 11:25 - 11:55 | 18,5           |          |                 |
| rõhk sek+tert (mbar)                            | 11:25 - 11:55 | 45             |          |                 |
| sekundaar [m3/h]                                | 11:25 - 11:55 | 9,5            |          |                 |
| tertsiaal [m3/h]                                | 11:25 - 11:55 | 6,4            |          |                 |
| retsirkulatsioon [m3/h]                         | 11:25 - 11:55 | 1,9            |          |                 |
| põletid [m3/h]                                  | 11:25 - 11:55 | 1,3            |          |                 |
| kütuse niiskus [%]                              |               | 42,5           |          |                 |

O2 säte 3.2%



## Lisa 6 Katse 6 protokoll

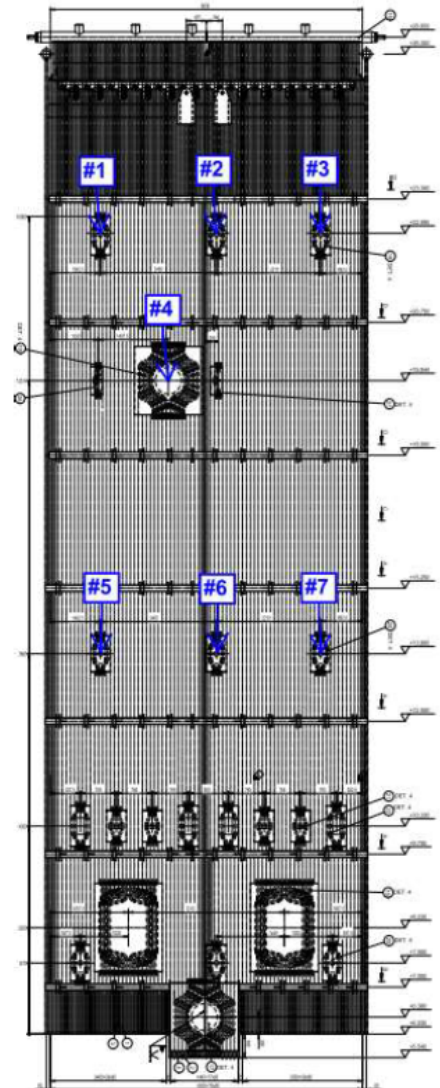
Kuupäev: 07.01.2021

| Reziimi kirjeldus  |
|--|
| Katse 6<br>60% sekundaar, 40% tertsiaal<br>Vastukaal: sekundaaril -10 cm<br>O2 säte 3.2% -> 3.6% |

| Kolde temperatuuri mõõtmised |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Aeg           | esiseinast 50cm [°C] | esiseinast 100cm [°C] | esiseinast 150cm [°C] | esiseinast 200cm [°C] | esiseinast 250cm [°C] | esiseinast 300cm [°C] | esiseinast 350cm [°C] |
| Mõõtepunkt #1                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #2                | 12:04 - 12:34 | 847                  | 887                   | 901                   | 883                   | 884                   | 895                   | 861                   |
| Mõõtepunkt #3                |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Mõõtepunkt #4                | 12:54 - 13:19 | 907                  | 960                   | 975                   | 982                   | 982                   | 976                   | 968                   |
| Mõõtepunkt #5                | 14:45 - 15:22 | 895                  | 926                   | 960                   | 1009                  | 1049                  | 1062                  | 1062                  |
| Mõõtepunkt #6                | 14:14 - 14:37 | 981                  | 1015                  | 1028                  | 1051                  | 1062                  | 1081                  | 1087                  |
| Mõõtepunkt #7                | 15:32 - 16:04 | 916                  | 959                   | 975                   | 1011                  | 1025                  | 1022                  | 1018                  |

| Stabiilse režiimi keskmised emisiooni näitajad |               |                |          |                 |
|--|---------------|----------------|----------|-----------------|
|  | Aeg           | CEMS (korsten) | enne ECO | BPE analüsaator |
| NOx [ppm]                                      | 12:03 - 16:05 | 97             |          | 104             |
| CO [ppm]                                       | 12:03 - 16:05 | 97             |          | 110             |
| O2 (%)   | 12:03 - 16:05 | 4,3            | 3,6      | 3,6             |
| primaar [m3/h]                                 | 12:03 - 16:05 | 12,3           |          |                 |
| sek+tertsiaal [m3/h]                           | 12:03 - 16:05 | 19,3           |          |                 |
| rõhk sek+tert (mbar)                           | 12:03 - 16:05 | 45             |          |                 |
| sekundaar [m3/h]                               | 12:03 - 16:05 | 10,1           |          |                 |
| tertsiaal [m3/h]                               | 12:03 - 16:05 | 6,7            |          |                 |
| retsirkulatsioon [m3/h]                        | 12:03 - 16:05 | 1,9            |          |                 |
| põletid [m3/h]                                 | 12:03 - 16:05 | 1,3            |          |                 |
| kütuse niiskus [%]                             |               | 45,6           |          |                 |

O2 säte 3.6%





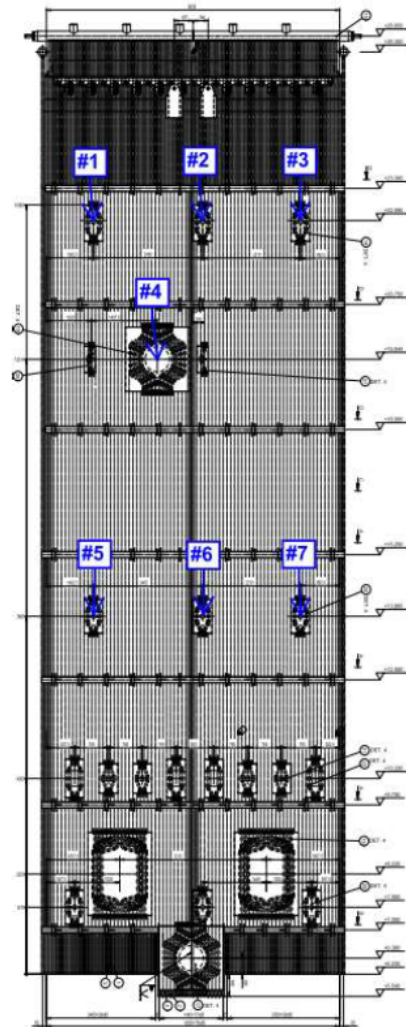
## Lisa 7 Katse 7 protokoll

Kuupäev: 04.02.2021

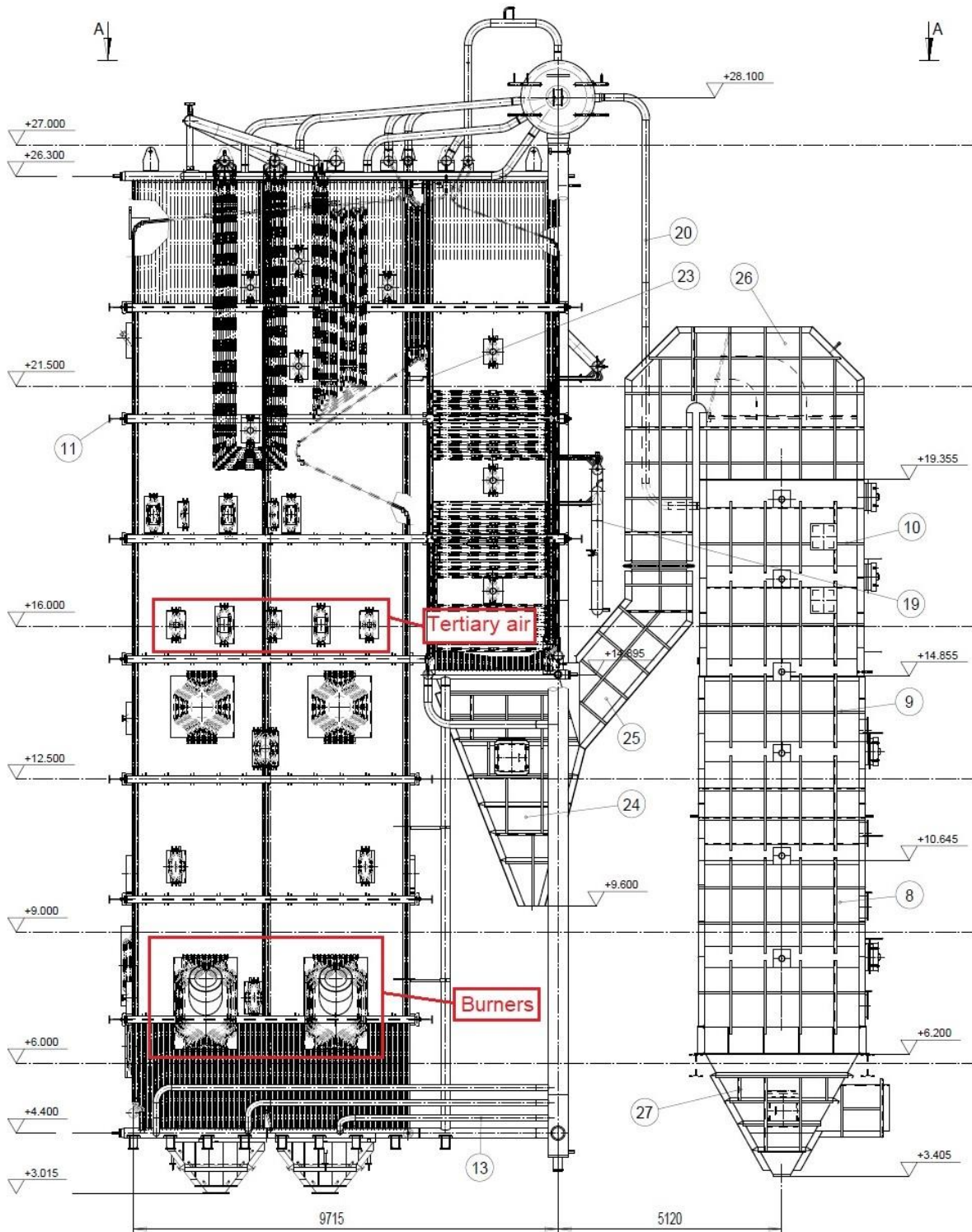
| Režiimi kirjeldus  |  |
|--|--|
| Katse 7<br>60% sekundaar, 40% tertsiaal<br>Vastukaal: sekundaaril -10 cm<br>Katel puhastatud Jaanuari keskel |  |

| Kolde temperatuuri mõõtmised |               |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                              | Aeg           | esiseinast 50cm [°C] | esiseinast 100cm [°C] | esiseinast 150cm [°C] | esiseinast 200cm [°C] | esiseinast 250cm [°C] | esiseinast 300cm [°C] | esiseinast 350cm [°C] |
| Mõõtepunkt #1                | 14:27 - 15:17 | 783                  | 826                   | 921                   | 961                   | 969                   | 968                   | 976                   |
| Mõõtepunkt #2                | 14:04 - 14:24 | 948                  | 945                   | 978                   | 966                   | 945                   | 960                   | 953                   |
| Mõõtepunkt #3                | 15:24 - 15:57 | 752                  | 815                   | 826                   | 827                   | 783                   | 824                   | 840                   |
| Mõõtepunkt #4                | 12:29 - 13:25 | 722                  | 1050                  | 1063                  | 1051                  | 1075                  | 1070                  | 1033                  |
| Mõõtepunkt #5                | 11:09 - 11:42 | 848                  | 1037                  | 1080                  | 1175                  | 1220                  | 1233                  | 1222                  |
| Mõõtepunkt #6                | 10:33 - 10:59 | 1050                 | 1078                  | 1074                  | 1123                  | 1170                  | 1210                  | 1232                  |
| Mõõtepunkt #7                | 09:55 - 10:15 | 946                  | 972                   | 972                   | 995                   | 1015                  | 1017                  | 1031                  |

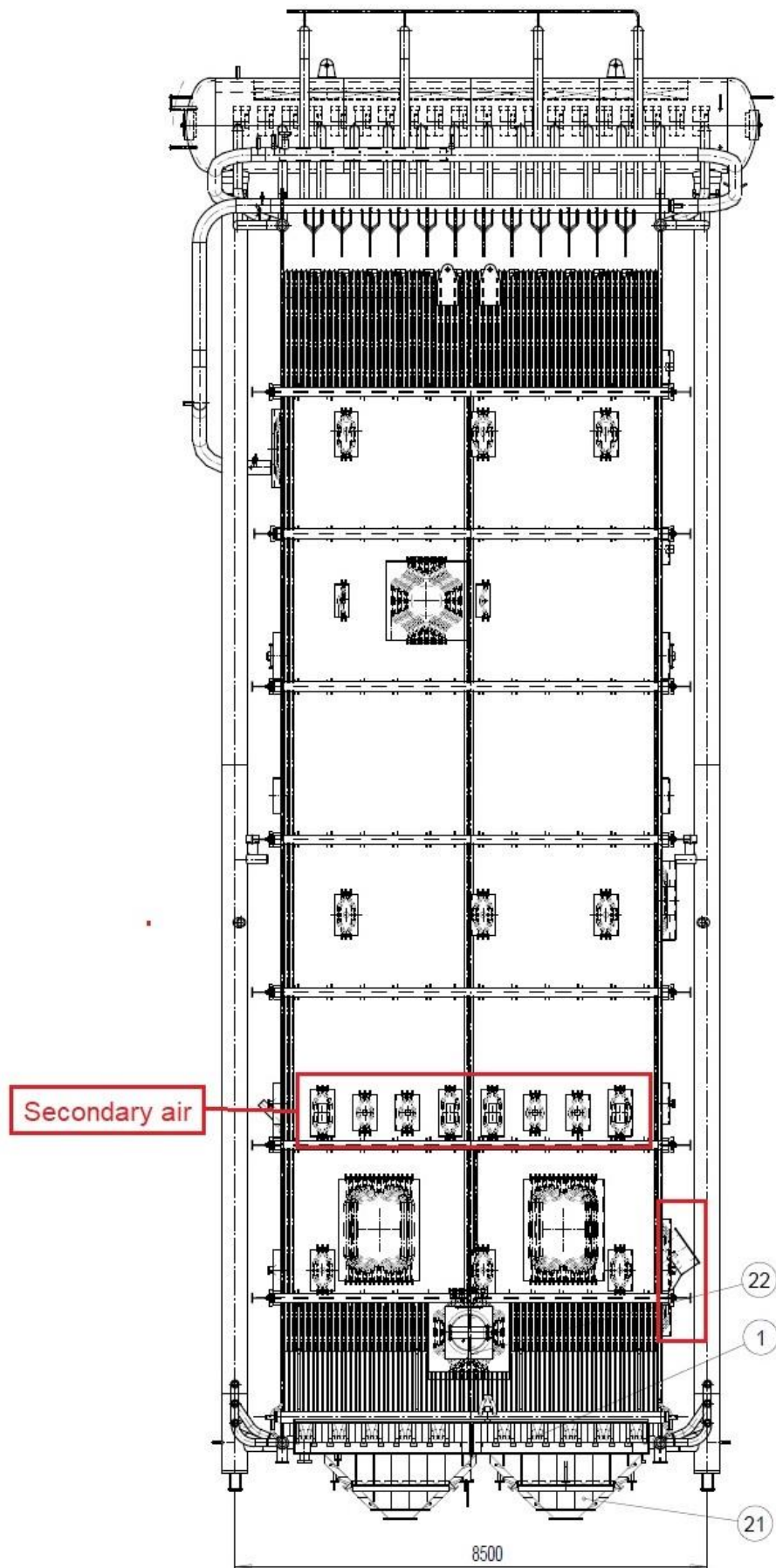
| Stabiilse režiimi keskmised emisiooni näitajad |               |                |          |                 |
|--|---------------|----------------|----------|-----------------|
|  | Aeg           | CEMS (korsten) | enne ECO | BPE analüsaator |
| NOx [ppm]                                      | 09:50 - 16:00 | 95             |          | 103             |
| CO [ppm]                                       | 09:50 - 16:00 | 94             |          | 98              |
| O2 (%)   | 09:50 - 16:00 | 4,6            | 4        | 4,1             |
| primaar [m3/h]                                 | 09:50 - 16:00 | 14,5           |          |                 |
| sek+tertsiaal [m3/h]                           | 09:50 - 16:00 | 20,4           |          |                 |
| rõhk sek+tert (mbar)                           | 09:50 - 16:00 | 50             |          |                 |
| sekundaar [m3/h]                               | 09:50 - 16:00 | 10,6           |          |                 |
| tertsiaal [m3/h]                               | 09:50 - 16:00 | 7,1            |          |                 |
| retsirkulatsioon [m3/h]                        | 09:50 - 16:00 | 0              |          |                 |
| põletid [m3/h]                                 | 09:50 - 16:00 | 1,4            |          |                 |
| kütuse niiskus [%]                             |               | 50,5           |          |                 |



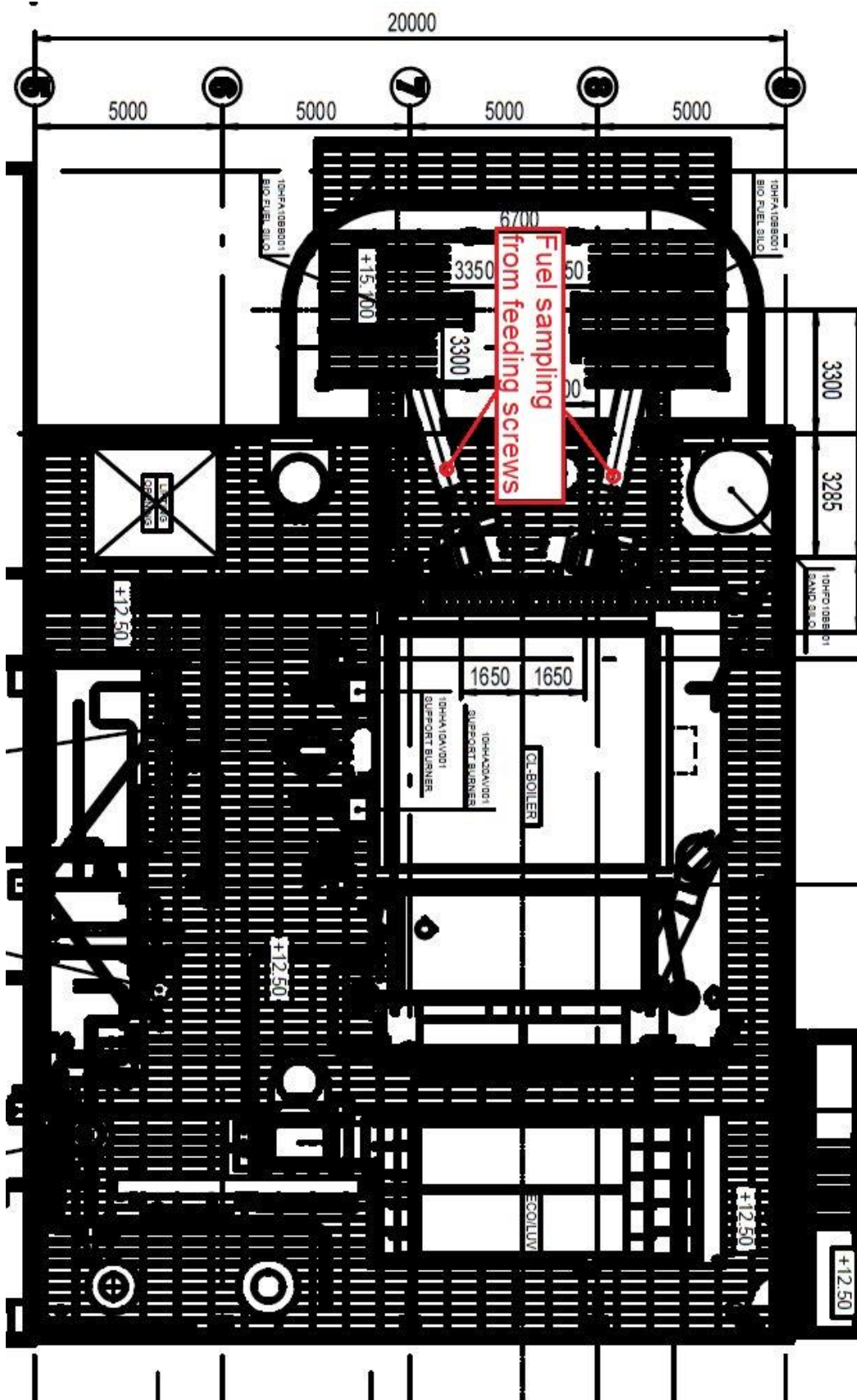
# Lisa 8 MKK vaade küljelt



Lisa 9 MKK vaade eest



Lisa 10 Kütuse proovivõtu asukoht



Lisa 11 Temperatuuri mõõtmise andur

