

Karl Tiedemann

PUIDUHAKKE PÕLETAMISEL TEKKIVATE LÄMMASTIKOKSIIDIDE HEITMETE VÄHENDAMINE

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut
Keskkonnatehnoloogia ja -juhtimise õppekava
Juhendaja: Kaie Eha, MSc

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl Tiedemann

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Puiduhakke põletamisel tekkivate lämmastikoksiide heitmete vähendamine

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Karl Tiedemann

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Kaie Eha

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

LÜHENDID	4
SISSEJUHATUS.....	5
1. LÄMMASTIKOKSIIDIDE HEITMED.....	7
1.1. Heitmete olemus ja teke	7
1.2. Mõju keskkonnale ja inimesele	8
2. PUIDU PÕLETUSTEHNOLOOGIAD	10
2.1. Keevkihtpõletus.....	10
2.2. Kihtpõletus	12
3. EESTI SEADUSANDLUS	14
4. LÄMMASTIKU HEITMETE VÄHENDAMINE.....	16
4.1. Primaarmedetmed	16
4.2. Sekundarmedetmed.....	18
4.2.1. Selektiivne katalüütiline redutseerimine	19
4.2.2. Selektiivne mittekatalüütiline redutseerimine	20
4.2.3. Uuenduslikud lähenemised sekundaarmedetmetele	22
5. METOODIKA	25
6. EESTI NELJA SUURIMA KOOSTOOTMISJAAMA LÄMMASTIKOKSIIDIDE VÄHENDAMISE TEHNOLOOGIAD	26
KOKKUVÕTE.....	31
SUMMARY	32
VIIDATUD ALLIKAD	34
LISAD	36
Lisa 1. Kätiste koondtabel	36

LÜHENDID

CFB– *Circulating fluidizedbed combustion*, tsirkuleeriv keevkihtpõletus

PM – *Particulate matter*, tahked osakesed

VOC – *Volatile organic compounds*, lenduvad orgaanilised ühendid

FBC – *Fluidizedbed combustion*, keevkihtpõletus

SCR – *Selective catalytic reduction*, Selektiivne katalüütiline redutseerimine

SNCR – *Selective noncatalytic reduction*, Selektiivne mittekatalüütiline redutseerimine

BBF – *Biased burner firing*, eelistatud põletiga kütmine

BOOS – *Burners out of service*, põletid, mis on välja lülitatud

OFA – *Over fire air*, ülepõlemisõhk

KKJS – keskkonnajuhtimissüsteem

PVT – parim võimalik tehnoloogia

SISSEJUHATUS

Euroopa Liit (EL) seab kohustuslikuks, et taastuenergia moodustaks 2030. aastaks vähemalt 32% kogu energiatarbimisest, mis sunnib liikmesriike suurendama taastuenergia osakaalu. Selle saavutamiseks peab kütte- ja jahutussektor vähendama fossiilkütuste kasutamist ning biokütuste, sealhulgas tahke biomassi kasutamise, saab oluliseks komponendiks ELi kütte- ja jahutusstrateegias. [1]

2017. aastal moodustas ELis elamumajandussektorile toodetavast energiast 43% tahke biomassi energia. Tahke biomassi kasutamine on atraktiivne mitte ainult suure taastuenergia osakaalu tõttu soojatootmises, vaid ka madalamate energiakulude tõttu võrreldes fossiilkütustega. See võib aidata vähendada süsinikdioksiidi heitkoguseid ja toimida alternatiivina fossiilkütustele kui taastuvale ja süsinikdioksiidi neutraalsele energiaallikale. [1]

Tahke biomassi põletamine soojuse tootmiseks võib vähendada keskkonnasäästlikkust, mõjutades otseselt õhukvaliteeti. Peamised saasteained selles kontekstis on tahked osakesed (PM) ja lämmastikoksiidid (NO_x). Tahkete osakeste heidet peetakse sageli peamiseks õhusaasteallikaks, mis viib üha rangemate piiranguteni biomassi kütteseadmete kasutamisel. Kuigi NO_x heitkogused on saanud vähem tähelepanu, näitavad uuringud, et suur osa kaasaegsete biomassi kütteseadmete keskkonnamõjust võib olla seotud NO_x heitkogustega. [1]

Antud lõputöö eesmärgiks on tuua välja olemasolevad lämmastikoksiidide heitmete vähendamise meetodid, võrrelda nelja Eesti suurima koostootmisjaama juba kasutusele võetud NO_x heitmete vähendamise protsesse ja võrrelda neid kirjanduses välja toodud parimate praktikatega.

Eesmärgi täitmiseks on püstitatud järgmised uurimusküsimused:

- Millised on lämmastikoksiidide mõjud looduskeskkonnale ja inimesele?
- Millised on lämmastikoksiidide heitmete vähendamise meetodid puidu põletamisel?
- Millised on Eesti nelja suurima koostootmisjaama lämmastikoksiidide heitmete vähendamise protsessid?

Käesolev lõputöö on jaotatud kaheks osaks: kirjanduse ülevaateks ja analüüsi osaks. Kirjanduse ülevaade hõlmab erinevaid aspekte lämmastikoksiidide heitmetest, nende tekke põhjustest ning mõjust keskkonnale ja inimesele. Lisaks tutvustatakse erinevaid puidu põletustehnoloogiaid. Kirjanduse ülevaates käsitletakse ka meetodeid lämmastikuheitmete vähendamiseks, sealhulgas primaarmeetmeid, sekundaarmeetmeid ja uuenduslikke lähenemisi sekundaarmeetmetele.

Töö analüüsi osa võrdleb Eesti nelja suurima koostootmisjaama lämmastikoksiidide heitmete vähendamise protsesse. Antakse ülevaade, milliseid meetodeid need jaamad rakendavad ning millised on nende meetodite tulemused. Erialase kirjandusega võrreldi kuivõrd langesid kokku või vastandusid saadud analüüsi tulemused. Samuti esitatakse soovitusi, milliseid tehnoloogiaid võiksid kasutada koostootmisjaamad tulevikus heitmete vähendamiseks.

1. LÄMMASTIKOKSIIDIDE HEITMED

1.1. Heitmete olemus ja teke

NO_x-d, mille alla kuuluvad peamiselt lämmastikoksiid (NO), väiksemates kogustes lämmastikdioksiid (NO₂) ja dilämmastikoksiid (N₂O) ehk naerugaas, tekivad praktiliselt kõigis põlemisprotsessides. [2]

NO_x-de moodustumist mõjutavad kolm peamist mehhanismi [3]:

- termiline NO_x tekib õhu hapniku ja lämmastiku reaktsioonist;
- kütuse NO_x tekib kütuses sisalduvast lämmastikust;
- otsene NO_x tekib molekulaarse lämmastiku muundamisel leegi eesotsas, millele aitavad kaasa süsivesinike ühendid.

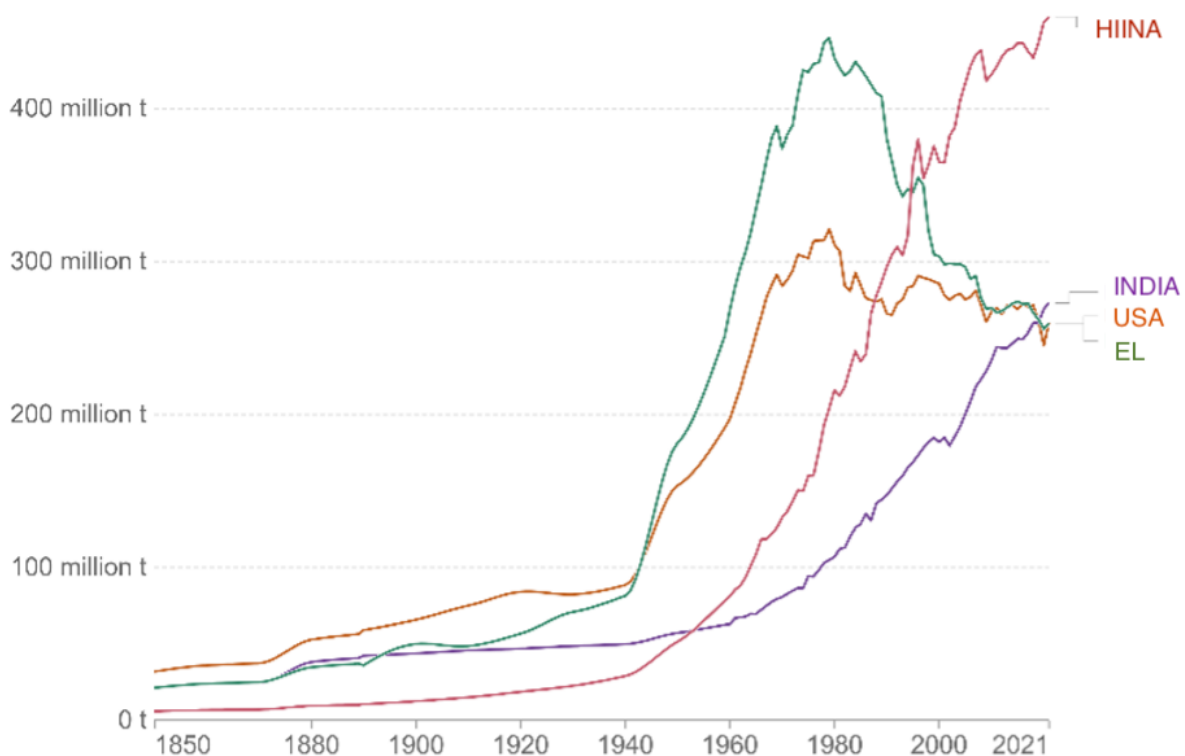
Molekulaarse lämmastikumuundumise tulemusena eralduva NO_x kogus on tavaliselt väiksem kui see, mis on teiste reaktsioonteede poolt tekitatud. Termilise NO_x moodustumine sõltub oluliselt temperatuurist. Kui põlemistemperatuur jääb alla 1000 °C, siis on NO_x heitmed märkimisväärselt madalamad ja nende moodustumine sõltub peamiselt kütusest tulenevast lämmastikust. Kütuse NO_x kogus sõltub kütuse lämmastikusisaldusest ja reaktsioonikeskkonna hapniku kontsentratsioonist. NO_x-de moodustumine toimub peamiselt termilise reaktsiooni kaudu gaasiliste ja vedelkütuste põletamisel. Kütuse NO_x kogused on suuremad kivisöe ja raskete kütteõlide puhul, kuna neis on rohkem kütusest tulenevat lämmastikku. [3]

Põlemisprotsessi valik mõjutab oluliselt NO_x eraldumist fossiilkütuste põletamisel [3]:

- liikuvate restidega katelde korral on NO_x heitkogused madalamad tänu madalamale põlemistemperatuurile ja järkjärgulisele põlemisele resti kohal;
- peenestatud kivisöe katelde puhul võivad heitkogused olla kõrgemad, sõltuvalt põleti tüübist ja põlemiskambri kujundusest;
- keevkihtpõletus katelde korral on NO_x heitkogused enamasti madalamad kui tavalistes kateldes, kuid võivad tekkida suuremad N₂O heitkogused madalate töötemperatuuride korral.

Puidu põletamine kõrgetel temperatuuridel põhjustab puidus oleva lämmastiku reageerimist hapnikuga ja moodustab NO_x-de ühendid. Biomassi põletamisel domineerib NO_xi moodustumine kütuse lämmastiku kaudu, kuna temperatuur on tavaliselt madalam kui 1300 °C. Kütuse lämmastiku teke biomassi põletamisel hõlmab NO_x moodustumist ja redutseerumist, mida mõjutavad lenduv lämmastik (ammoniaak, vesiniktsüaniid jne). NO_x-de moodustumine toimub peamiselt lenduva lämmastiku muundumise kaudu. [1]

Aastas tekib maailmas miljardeid tonne NO_x heitmeid. Kõige rohkem heitmeid tekib tihedalt asustatud piirkondades, eriti tööstusriikides. 2021. aastal paiskasid Hiina 459,98, USA 259,99, EL riigid 259,75 ja India 272,91 miljonit tonni N₂O heitmeid atmosfääri (Joonis 1). [4]



Joonis 1. 2021. aasta nelja suurima NO_x tootjate omavaheline võrdlus [4], (kohandatud)

Kui USA ja EL riikide lämmastikuühendite atmosfääri paiskamine on juba taandumas, siis Hiina ja India on olnud stabiilselt tõusvas trendis. Aasia piirkonna majanduskasv ja sellest tulenev energia kasutuse suurenemine määravad suuresti globaalse heitmete hulga.[4]

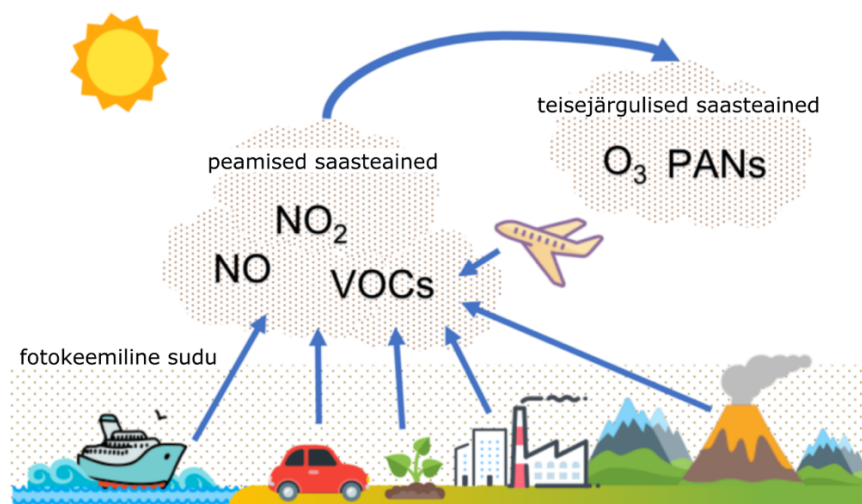
1.2. Mõju keskkonnale ja inimesele

NO_x-de heitmed kujutavad endast atmosfääris kahjulikke mürke. Need avaldavad negatiivset mõju ökosüsteemidele, põhjustades näiteks happesademeid, osoonikihi hõrenemist ja eutrofeerumist. Sademete kaudu jõuab üle 60% NO_x-e maa pinnasesse. Saasteained NO_x ja SO_x moodustavad atmosfääris ka happeid, mis põhjustavad happevihmasid, kiirendades seeläbi veekogude hapestumist. Atmosfääri saasteainete hulk on Euroopas ja Põhja-Ameerikas oluliselt vähenenud ning pinnavee hapestumine näitab taastumist, kuid see on olnud aeglane protsess. [5], [6], [7], [8]

N₂O mõju kasvuhoone efektile on ühe molekuli kohta 300 korda suurem kui süsinikdioksiidi (CO₂) mõju. N₂O, mis eraldub peamiselt mineraal- ja orgaaniliste väetistest, on kolmas

tähtsaim pikaajaline kasvuhoone gaas pärast süsinikdioksiidi ja metaani. See mõjutab kaudselt kliimamuutuste kaudu inimeste tervist. Lisaks sellele on N_2O praegu kõige olulisem osoonikihi kahanemise põhjustaja. Osoonikihi hõrenemine tõttu jõuab suurem hulk UV kiirgus maapinnale ning see mõjutab inimestel nahavähi esinemissageduse suurenemist. [5], [9]

NO muundub atmosfääris NO_2 -ks, olles happesademe ja fotokeemilise sudu tekitaja. Sudu, mille nimetus tuleneb sõnade „suits“ ja „udu“ liitmisel, on inimtekkeline ning seda on kahte erinevat tüüpi. Kollakas sudu, mida nimetatakse ka Los Angelese suduks, on fotokeemiline, mille on põhjustanud NO_x -de suur kontsentratsioon õhus (Joonis 2). Mustjas sudu, mida nimetatakse ka Londoni suduks, on põhjustatud suures koguses kivisöe põletamisest ja sisaldab palju vääveloksiide (SO). [2], [10]



Joonis 2. Fotokeemilise sudu teke [10], (kohandatud)

NO on vees halvasti lahustuv, mistõttu saavad NO_x -saaste ja happevihmade väiksed osakesed imbuda tõhusalt kopsudesse ja põhjustada hingamisraskusi ja hingamisteede haigusi, süvendavad südamehaiguste probleeme ning tekitavad silmade ärritust. [5], [10]

Alates 2004. aastast avaldatud ja Maailma Terviseorganisatsiooni poolt läbi vaadatud uuringud on tõestanud seoseid NO_2 kokkupuute ning hingamisteede sümptomite ja haiglaravi vahel. Nii lühiajalistes kui ka pikaajalistes uuringutes tuvastati kahjulikud mõjud NO_2 kontsentratsioonide korral, mis on võrreldavad või madalamad kui praegune ELi piirväärtus $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mis vastab Maailma Terviseorganisatsiooni õhukvaliteedi suunistele. Hiljutiste hinnangute kohaselt põhjustab NO_2 saaste iga-aastaselt umbes 4 miljonit uut astmahaigusjuhtu, moodustades olulise osa ülemaailmsest astmahaigestumusest. [9]

2. PUIDU PÕLETUSTEHNOLOOGIAD

Paljudes ELi liikmesriikides on puit kõige olulisem taastuenergia allikas. Puitkütused moodustasid 2016. aastal 6% kogu ELi 28 liikmesriigis tarbitud energiast. Eestis saadi üle 75% tarbitud taastuenergiast puidust. [11]

Tahkekütuse, sealhulgas puitkütuste, põletamise tehnoloogilised lahendused erinevad peamiselt kütuseosakeste ja gaasilise keskkonna vastastikuse mõju alusel. Neid tehnoloogilisi lahendusi on kokku viis [12]:

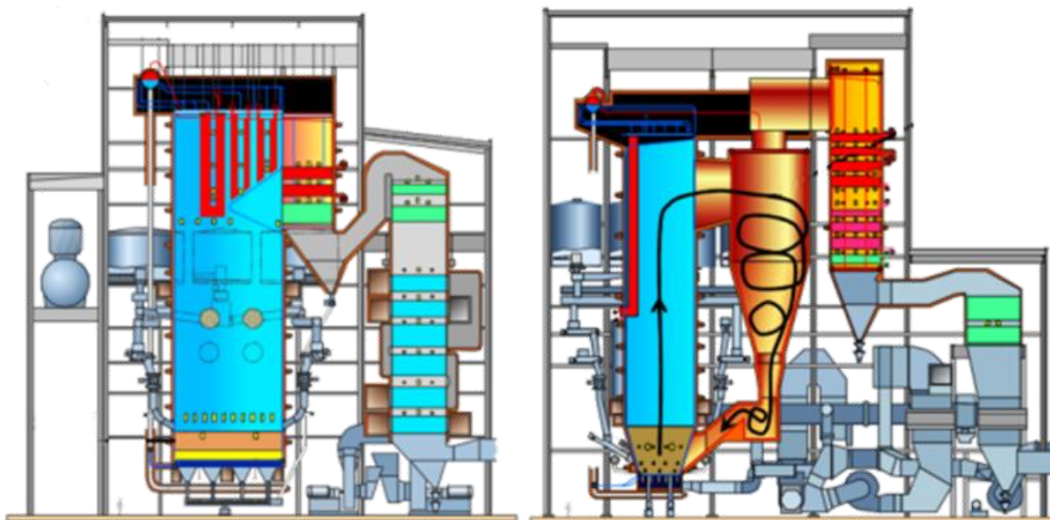
- keevkiht põletus – kasutatakse kas nn mullivat või tsirkuleerivat keevkihti;
- kihtpõletus – Kui kütusekiht asub kolde restil, siis on see restpõletus;
- tolmpõletus – puitkütuste puhul leiab kasutust üksikjuhtudel, näiteks puidu lihvimistolmu põletamisel koos vedelkütusega (või ilma);
- tsüklonpõletus – toimub intensiivne kütuse ja õhu keeriseline liikumine silindrikujulises koldes;
- kütuse gaasistamine – tekkinud gaas põletatakse kas vedel- või gaaskütusekatlas, samuti võib seda kasutada gaasimootori või gaasiturbiini kütusena.

Töös on täpsemalt käsitletud viiest tehnoloogiast kahte, sest uuritavates käitistes on kasutusel keevkihtpõletus või kihtpõletus tehnikad (Lisa 1).

2.1. Keevkihtpõletus

Keevkihtpõletamine (FBC) on põletustehnika, mis hõlmab kütuse pritsimist kuuma turbulentssesse kihti, koosnedes inertsest materjalist ja tuhast. Primaarne põlemisõhk süstitakse keevkihtkatla põhjast. Kütuse läbipõlemine on väga efektiivne tänu kõrgele põlemistemperatuurile (umbes 850 °C) ja pikale põlemisajale, mis tagab suhteliselt madalad põlemissaaduste heitkogused. Suurte katelde ja madala reaktiivsusega kütuste puhul eelistatakse tsirkuleeriva keevkihtpõletuse kasutamist, mis hõlmab tahkete osakeste ringlust, tsüklonsepareerimist ja jämedate osakeste taaskasutamist. Mõned FBC-süsteemid töötavad kõrgema rõhu juures, integreerides gaasiturbiini suitsugaaside paisutamiseks. [3]

keevkihtkatelde on kahte erinevat tüüpi klassikaline (nn mulliv või aeglane) FBC millel on võrdlemisi väiksem viibimisaeg, turbulentsus ja põletamise tõhusus ja tsirkuleeriv keevkihtpõletus (CFB), millel on suurem viibimisaeg, turbulentsus ja põlemise tõhusus (Joonis 3). [3], [13]



Joonis 3. Klassikaline keevkiht põletus (vasakul) ja tsirkuleeriv keevkiht põletus (paremal) [3]

Keevkihtpõletamine võimaldab põletada mitmesuguseid kütuseid ühes ja samas rajatises ning pakub lahendusi tuha sulamistemperatuuriga kütuste ja füüsiliste lisanditega seotud väljakutsetele. Klassikaline keevkihtpõletus sobib paremini biokütuste põletamiseks ning tsirkuleeriv keevkihtpõletus põlevkivi ja kivisöe põletamiseks, kuid ka viimase tehnoloogia juures saab koos põhikütustega põletada biokütuseid. [3], [12]

Keevkihtkatlas jääb põletamistemperatuur tavaliselt vahemikku 750-950 °C. Kütuse töötlemine keevkihtkateldes ei nõua selle pulbristamist ega kuivatamist ning kütuse niiskusesisalduse hoidmine üle 40% on tavaliselt soovitatav plahvatusohtliku tolmu vältimiseks. Keskkonnavalaselt on FBC-süsteemid võimelised vähendama SO₂ heitkoguseid ja saavutama madala termilise NO_x moodustumise taseme. [3]

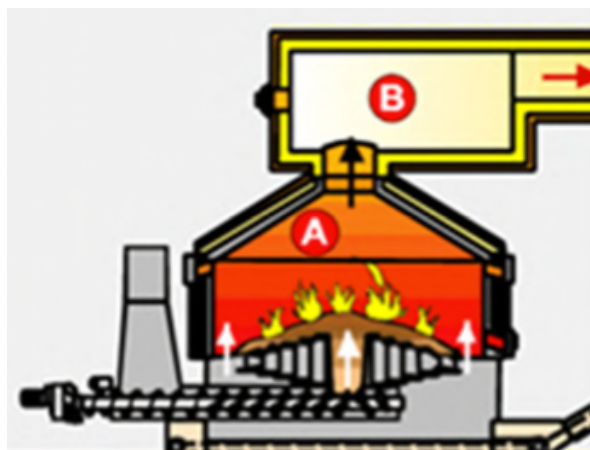
Keevkihtkatlas põlemisel tekkinud termilise NO_x kogus on madal tänu madalale põlemistemperatuurile. Peamine NO_x pärineb kütuses sisalduvast lämmastikust ning selle kontrollimiseks jaotatakse põlemisõhk astmeliselt. See jaotamine on keevkiht kateldes tavaliselt tugev, kuna gaasid segunevad halvasti tihedas suspensioonis. Põlemisõhu astmeline jaotamine on rakendatav ka mulliva kihiga kateldes. Kütuse lämmastik võib moodustada ka N₂O, mille heitkogused on keevkihtkateldes kõrgemad kui teistes kateldes. Kõrgematel, üle 950 °C temperatuuridel väheneb kütuse lämmastiku osakaal, mis moodustab N₂O. Samas võib kõrge põlemistemperatuur suurendada NO ja NO₂ heitmeid. [3]

2.2. Kihtpõletus

Kihtpõletus on üks vanimaid põlemistehnoloogiaid katelde süsteemides, mida tänapäeval kasutatakse peamiselt liikuvate restidega. Selles tehnoloogias ei liigu kütuseosakesed omavahel, vaid põlemisõhk ja gaasid liiguvad osakeste vahel. Kihtpõletuse oluliseks parameetrik on resti pindala, mis määrab katla soojusliku võimsuse. Restkolded on levinumad põletustehnilised lahendused keskmiste ja väikeste võimsuste jaoks. Põlemise tulemusena eralduv energia on biokütuste puhul umbes 80% selle täispotentsiaalst. Põlemise juhtimine võimaldab optimaalset õhuvarustust ja madalat põlemata ühendite sisaldust suitsugaasides. Kihtpõletus tehnoloogiad jagunevad kolmeks. Kuigi restitüüpe on mitmeid, siis jagatakse neid peamiselt kolme kategooriasse, hõlmates nii tüüpilisi kui ka spetsiaalseid restitüüpe [3], [12]:

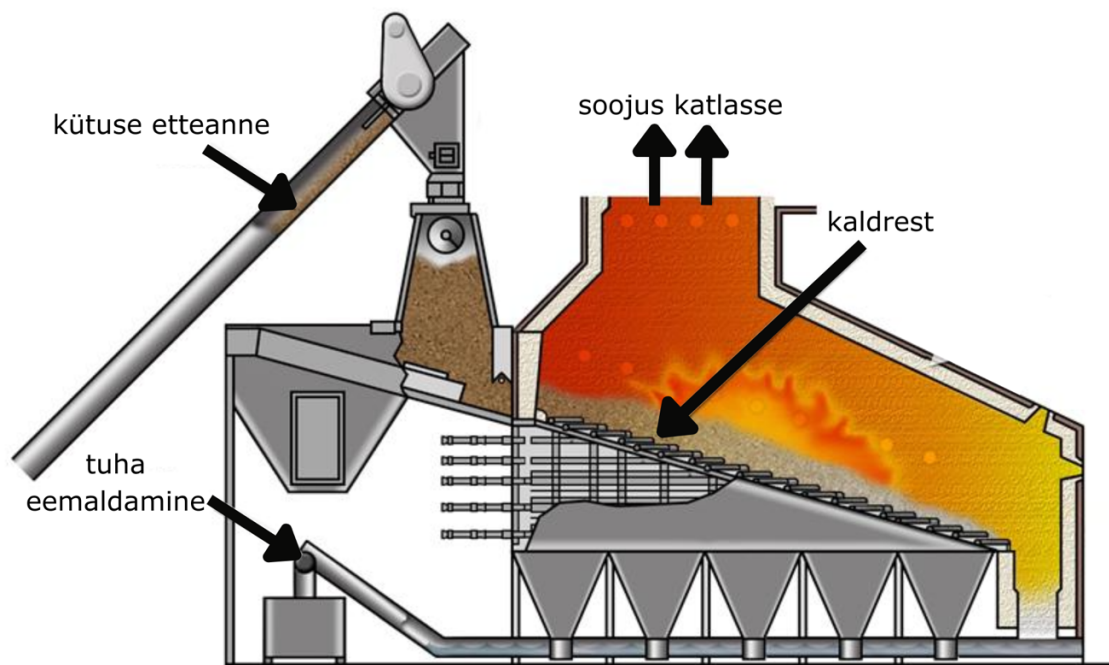
- liikumatu rest;
- mehaaniline kaldrest;
- kettrest.

Liikumatu rest on paigutatud koldesse nurga all, mis soodustab kütuse varisemist restil, liikudes kuivamis- ja põlemisalade vahel. Liikumatu kaldresti kaldenurk vastab tavaliselt kütuse varisemisnurgale. Varbadest koosneva kaldresti restielemendid on paigutatud kütuse liikumissuunaga paralleelselt, samas kui treppresti astmed on paigutatud selle suhtes risti. Kaldresti kasutati ajalooliselt niiske saepuru põletamiseks saeveskite juures. Kütus asetatakse restile ja liigub raskusjõu mõjul alla, põledes lõpuni, ning tuhk kogutakse kogumismahutisse. Kaldrestidel (Joonis 4) on tavaliselt suur elavpind, mis tähendab, et õhu läbipääsuavad katavad suure osa resti pinnast, mistõttu õhu kiirus resti läbimisel on madal ja õhu jaotus ebaühtlane. Selleks, et tagada piisav põlemisõhu kogus kogu resti ulatuses, tuleb säilitada suhteliselt kõrge liigõhutegur, mis omakorda vähendab põlemise kasutegurit. Kaasaegsetes mehaanilise restiga kateldes on resti elavpind väiksem, õhu jaotus on ühtlasem ning kasutegur kõrgem. [12]



Joonis 4. Liikumatu kooniline kaldrest [12]

Mehaaniliselt liikuvate restielementide (Joonis 5) kasutamine võimaldab paremini kontrollida kütusekihi liikumist, tagada ühtlasemat jaotumist nii kütuse kui ka õhu osas ning viia põlemisprotsess efektiivsemaks, vähendades sealjuures kahjulike heidete, eriti vingugaasi sisaldust suitsugaasides. Mehaaniliste restide puhul võivad restielemendid liikuda üle rea, malekorras või kordamööda ühte ja siis teist rida, mis tagab kütusekihi ühtlase paksuse ja ladusama liikumise. Väga niiske kütuse korral kasutatakse koldeseintes tavaliselt jahutamata keraamilisi materjale, mille kõrgem töötemperatuur võimaldab kuumenedes anda piisavalt soojust kütuse kuivamiseks, lendainete eraldamiseks ja optimaalsete põlemistingimuste loomiseks nii restil kui ka lendainete põlemistsoonis. Siiski võib kuiva kütuse lühiajaline põletamine ilma jahutuseta koldes põhjustada temperatuuri kiiret tõusu, mis võib omakorda viia tuha sulamiseni, resti ja selle õhuavade ummistumiseni ning isegi koldeseinte kahjustumiseni. [12]



Joonis 5. Mehaaniliselt liikuv restkolle [14], (kohandatud)

Kettresti liikumise kiirust saab muuta, mis võimaldab paindlikult reguleerida kütuse liikumist kuivamistsoonist kuni süsiniku täieliku põlemiseni ja põlevainevaba tuha eemaldamiseni. Resti liikumiskiiruse ja põlemisõhu koguste ning vahekordade muutmine on oluline üleminekul erinevatele kütustele, tagamaks optimaalse põlemise tingimused. Rest peab olema varisemiskindel, et vältida peenemate kütuseosakeste langemist läbi resti all olevatesse õhujaotuskarpidesse. Kütuse kuivamine, kuumenemine, süttimine, põlemine ja järelejäänud tuha ning räbu eemaldamine toimuvad horisontaalselt liikuvatel kettrestidel. Resti alla antavat õhku seksioneeritakse, kuna kütuse põlemise intensiivsus resti ulatuses pole ühtlane. Põlevgaasid, mis väljuvad kütusekihist, põlevad koldekambris tänu sinna antavale sekundaarõhule. [12]

3. EESTI SEADUSANDLUS

Seadusandluse eesmärk on põletusseadmete heitmete piiramine, et kaitsta keskkonda ja inimeste tervist nii praegu kui ka tulevikus. Rahvusvahelistest direktiividest ning Eesti seadusandlusest tulenevad piirangud ajendavad tootjaid ja energiaettevõtteid otsima innovaatilisi tehnoloogiaid, mis aitavad vähendada saastet ning edendada keskkonnahoidlikku arengut. [15]

Keskkonnaministri 28. juuni 2013. a määrus nr. 48 „Suurte põletusseadmete saasteainete heite piirväärtused, nende kohaldamine mitme kütuse põletusseadme korral ja väävliärastuse astme nõuded“ (edaspidi määrus nr. 48) kehtestab nõuded suurte põletusseadmete saasteainete heite piirväärtuste ja väljuvate gaaside mahuühiku kohta, nende kohaldamise mitme kütuse põletusseadmetele ning väävliärastuse tasemele, mis sõltuvad seadme nimisoojusvõimsusest. Määruse kohaselt tähendab saasteaine heite piirväärtus lubatud saasteainete kogust välisõhus ühe normaalkuupmeetri kohta (temperatuuril 273,15 K ja rõhul 101,3 kPa) kuiva suitsugaasi kohta. [12, §1]

Sama määruse lisa 1 tabel 2 toob välja alates 2016. aastast kehtima hakanud lämmastikoksiidide heite piirväärtused. Biomassi ja turba kasutamisel on heite piirväärtused vahemikus 200-300 mg/Nm³, sõltuvalt põletusseadme nimisoojusvõimsusest (Tabel 1). [16]

Tabel 1. NO_x heite piirväärtused alates 1. jaanuar 2016 [16], (kohandatud)

Kütuseliik	Põletusseadme nimisoojusvõimsus P, MW	Heite piirväärtus, mg/Nm ³
Biomass ja turvas	$50 \leq P \leq 100$	300
	$100 \leq P \leq 300$	250
	$P > 300$	200

Keskkonnaministri 19.12.2017 määrus nr. 44 „Väljaspool tööstusheite seaduse reguleerimisala olevatest põletusseadmetest väljutatavate saasteainete heite piirväärtused, saasteainete heite seirenõuded ja heite piirväärtuste järgimise kriteeriumid“ (edaspidi määrus nr.44), reguleerib põletusseadmeid, mille nimisoojusvõimsus on 1-50 MWth. Määrus sätestab nõuded keskmise võimsusega põletusseadmetele, sh piirväärtused vääveldioksiidi, lämmastikoksiidide ja osakeste heitele. [13, §1 lõige 1] Selle määruse eesmärgiks on kehtestada uued nõuded põletusseadmetele, mille projekteeritud

soojusvõimsus jääb 1-50MW_{th}. Seda seetõttu, et Eesti seadusandlusesse saaks üle võtta Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiivi nr 2015/2193. Direktiivi kohaselt on nõutud loa või registreeringu omamine, NO_x, SO_x ja PM heite piirväärtuste järgimine ning NO_x, SO_x ja PM seiramine. [18]

Määruse nr. 44 §32 kirjeldab, et olemasolevate väiksemate põletusseadmete käitajate jaoks on investeeringute tegemine keerulisem, mistõttu antakse neile pikem ülemineku aeg. Kui praegu peavad üle 5 MW_{th} hakkama keskmistel põletusseadmetel heite piirnormidele vastama juba 2025. aasta 1. jaanuarist, siis kaugküttevõrku vähemalt 50% ulatuses tarnitava koostootmisjaama puhul tuleb neid piirnorme hakata täitma alles alates 2030. aasta 1. jaanuarist. Seni peavad aga antud käitised täitma §5 lõige 5 kohaselt vääveldioksiidi ja lenduvate osakeste heite piirväärtusi. [18]

Tabel 2. NO_x-i õhkuheite piirväärtused tahke biomassi ja/või turba põletamisel [19]

Põletusseadme summaarne nimisoojus (MW _{th})	Parim võimalik tehnoloogia (PTV)ga saavutatav heitetase (mg/Nm ³)			
	Aasta keskmine		Ööpäeva või proovivõtuperioodi keskmine	
	Uus seade	Olemasolev seade	Uus seade	Olemasolev seade
50-100	70-150	70-225	120-200	120-275
100-300	50-140	50-180	100-200	100-220
≥ 300	40-140	40-150	65-150	95-165

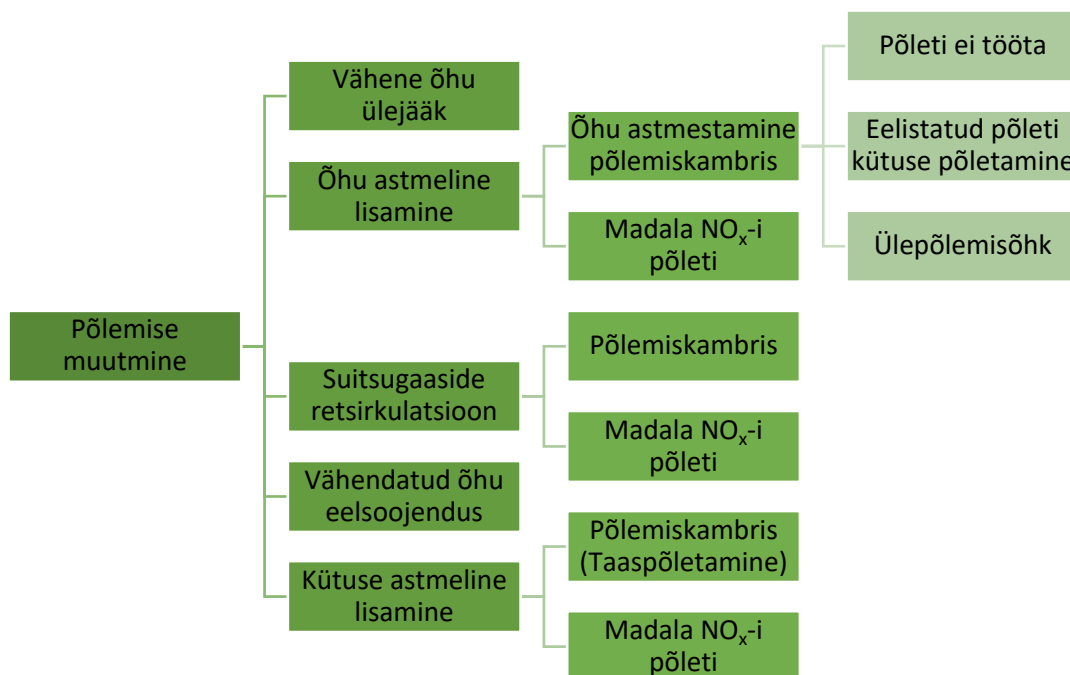
Parima võimaliku tehnoloogiaga saavutatavad aasta ja ööpäeva keskmised heitetasemed jaotatakse tulenevalt põletusseadme summaarsest nimisoojusest ning sellest, kas seade on uus või juba olemasolev (Tabel 2). [19]

4. LÄMMASTIKU HEITMETE VÄHENDAMINE

NO_x-de heitkoguste vähendamiseks kasutatavad tehnikad jagunevad primaarseteks ja sekundaarseteks. Primaarsed tehnikad keskenduvad NO_x-i tekke kontrollimisele ja vähendamisele põlemiskambris, samas kui sekundaarseid tehnikaid rakendatakse NO_x-i heitkoguste vähendamiseks peale põlemisprotsesse. [3]

4.1. Primaarmedetmed

Primaarmedetmed on suunatud põletusseadmete tööparameetrite või konstruktsiooni muutmisele, et vähendada NO_x-de moodustumist või muundada juba tekkivaid NO_x enne nende eraldumist. Primaarsed tehnikad hõlmavad endas manipulatsioone pealevoolava õhu hulga ja koostisega, temperatuuridega või kütuse lisamise strateegiaga (Joonis 6). [3]:



Joonis 6. Põlemise optimeerimiseks kasutatavad primaarmedetmed [3], (kohandatud)

Vähese õhu ülejäägi meetod põhineb hapniku hulga vähendamisel põlemisprotsessis minimaalseks tasemeks, mis on vajalik täielikuks põlemiseks, ning NO_x-i moodustumise minimeerimiseks. See saavutatakse peamiselt ahju õhulekete vähendamise, põlemisõhu hoolika kontrolli ja ahju põlemiskambri kujunduse muutmise abil. Tehnikat rakendatakse laialdaselt suurtes põlemisseadmetes, saavutades märkimisväärsed heitkoguste vähendamisi. Uuemad rajatised kasutavad täpseid mõõtmis- ja juhtimisseadmeid põlemisõhu optimaalseks reguleerimiseks. Vähese õhu ülejäägi meetod ei nõua täiendavat energiat ning võib isegi vähendada ventilaatori energia tarbimist ja suitsugaaside soojuskadu. Õigesti kasutades ei tohiks see vähendada elektrijaama tootlikust. Meetodi

positiivne mõju hõlmab vähendatud vääveldioksiidi (SO_2) heitkoguseid, mis vähendab korrosiooni ja kontrollseadmete osakeste ummistumist. Kogutud keskkonnanalaste andmete kohaselt võib antud protsessi kasutades NO_x -i vähendamine ulatuda 10–44%, sõltudes suuresti põlemisseadme algsest heitmete tasemest. [3]

Meetodi negatiivne mõju tekib siis, kui hapnikutaseme languse tõttu muutub põlemine mittetäielikuks, mille tulemusel võib suureneda põlemata süsiniku hulk tuhas ning süsinikmonooksiidi (CO) kogus. Sellised muutused võivad vähendada põlemisseadme efektiivsust ja suurendada korrosiooni. Lisaks võib hapnikutaseme langus mõjutada aurutemperatuuri, mis piisava kontrollsüsteemita võib tekitada ohtlikke olukordi nagu tulekahjud õhuelestsoojendites ja tuhakogujates. [3]

Õhu astmelise lisamisega luuakse mitme erineva hapnikusisaldusega põlemistsoonid põlemiskambris, eesmärgiga vähendada NO_x -de heitmete kontrolli ja tagada optimaalne täielik põlemine. Meetod tugineb õhu astmestamisele, mille käigus jagatakse põlemisprotsess vähemalt kaheks tsooniks: substõhhiomeetriliseks ehk hapnikupuudusega primaarseks põlemistsooniks ja ülestõhhiomeetriliseks ehk hapniku ülejäägiga sekundaarseks põlemistsooniks. [3], [19]

Primaarses tsoonis luuakse substõhhiomeetrilised tingimused, mis pärsivad NO_x -i teket kütusesse seotud lämmastiku konversioonist, vähendades sellega termilise NO_x -i moodustumist. Sekundaarses tsoonis lisatakse ülejäänud põlemisõhk, et põlemine lõpule viia, vähendades samal ajal NO_x -i teket tänu suuremale leegimahule ja madalamatele temperatuuridele. Meetodi rakendamiseks katelde ja ahjude puhul on mitmeid võimalusi, sealhulgas eelistatud põletiga kütmine (BBF), välja lülitatud põletid (BOOS), ülepõlemisõhk (OFA) ja kõrgendatud OFA-süsteemid. Tehnikat saab rakendada keevkihtpõletuse korral, kus põlemine algab substõhhiomeetrilistes tingimustes ja viiakse lõpule ülestõhhiomeetrilistes tingimustes. Õhu astmestamine ei suurenda põletusseadme energiatarbimist, välja arvatud juhul, kui kasutatakse võimendatud OFA-süsteeme. Samuti võib see parandada seadme energiatõhusust ja vähendada tahkete osakeste sisaldust lendtuhas ning põhjatuhas. Siiski võivad madalad temperatuurid soodustada N_2O teket ja suurendada põletamata süsiniku hulka. Õhu etapiviisiline lisamine on tõhusalt rakendatav ka restpõlemisreaktoris. [20]

Suitsugaaside retsirkulatsioon hõlmab osa suitsugaasi tagasisuhtimist põlemiskambrisse, et asendada osa värskest põlemisõhust. Selle tulemusena väheneb leegi temperatuur ja piiratakse hapnikusisaldust lämmastiku oksüdeerumiseks, mille tagajärjel väheneb termiliste NO_x -de teke. Seda saavutatakse spetsiaalsete põletite või muude seadistuste abil, mis põhinevad põlemisgaaside sisemisel ringlusel. Suitsugaasi tagasisuhtimine põlemisõhku on osutunud edukaks meetodiks kõrge temperatuuriga põletussüsteemides,

näiteks õli- või gaasiküttel töötavates seadmetes. Meetodi rakendamisel võetakse osa suitsugaasist selle põhivoolust, tavaliselt enne tahkete osakeste eemaldamist, ning suunatakse tagasi katlasse. Suitsugaase segatakse põlemisõhuga põleti ees. [3], [19]

Põlemisõhu eelsoojendamise vähendamine on meetod, mille eesmärk on alandada põlemisleegi temperatuuri ja piirata termilise NO_x teket, eriti gaasi- ja õlipõletussüsteemide puhul. Väikeste seadmete puhul võib isegi põlemisõhu eelsoojendi eemaldamine olla otstarbekas meetod, mille keskkonnakasu seisneb NO_x-i heitkoguste vähenemises. Üldine vähendamismäär on tavaliselt vahemikus 20–30%, kuid saavutatav heitkoguste vähenemise tase sõltub otseselt põlemisõhu eelsoojenduse algsest temperatuurist ja sellest, milline temperatuur saavutatakse pärast meetme rakendamist. [3], [19]

Kütuse astmeline lisamine ja ümberpõletamistehnika keskendub leegi temperatuuri või paiksete kuumade kohtade vähendamisele, luues põlemiskambris mitu põlemistsooni erineva kütuse ja õhu sissepritse tasemega. Eesmärk on muundada tekkinud lämmastikoksiidid tagasi lämmastikuks, vähendades seeläbi keskkonnamõju. [3], [19]

Kütuse astmeline lisamine jaguneb kolmeks tsooniks [3]:

- esmane põlemistsoon, kus enamik kütusest põleb oksüdeerivas või kergelt redutseerivas keskkonnas, vältides liigse hapniku ülekandumist ümberpõlemistsooni;
- teine põlemistsoon ehk ümberpõlemistsoon, kus sekundaarne või ümberpõlev kütus süstitakse redutseerivasse atmosfääri, et reageerida primaarses tsoonis tekkinud lämmastikoksiididega;
- kolmas põlemistsoon, kus põlemine lõpetatakse, lisades lõppõhku.

4.2. Sekundarmeedmed

Sekundaarsed või lõppuotsa tehnikad on suunatud juba moodustunud NO_x-de vähendamisele suitsugaasides ning neid saab rakendada iseseisvalt või koos esmaste meetmetega. Enamik NO_x heidete vähendamise suitsugaaside tehnoloogiaid tugineb ammoniaagi, urea või muude ühendite süstimisele. Need ühendid reageerivad NO_x-ga suitsugaasides, muutes selle molekulaarseks lämmastikuks. Sekundaarsed tehnikad hõlmavad järgmist [3]:

- Selektiivne katalüütiline redutseerimine (SCR) - laialdaselt rakendatav meetod NO_x-i vähendamiseks suurtes põlemistehastes üle maailma, kasutades katalüsaatorit reaktsiooni soodustamiseks.
- Selektiivne mittekatalüütiline redutseerimine (SNCR) - meetod NO_x-i vähendamiseks ilma katalüsaatorita temperatuuriaknas, mis sõltub kasutatavast reagendist, nagu veeldatud ammoniaak, urea või anhüdriidammoniaak.

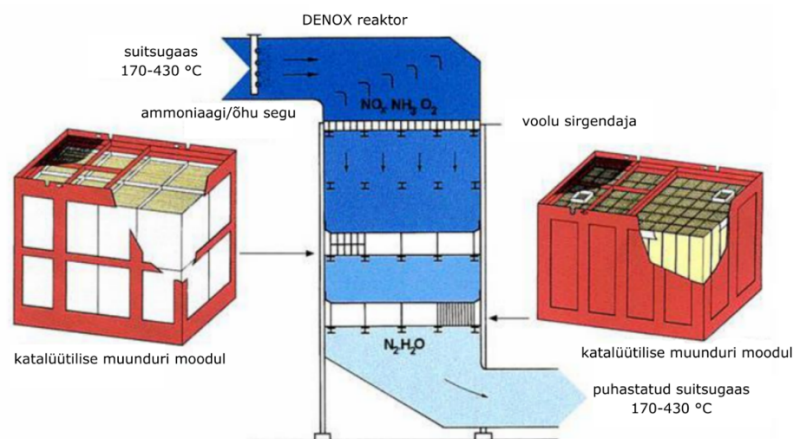
- SCR ja SNCR kombinatsioon - üha enam rakendatav meetod, kus kasutatakse mõlema meetodi kombineeritud efektiivsust.

Vastavalt elektritootmisjaamade ülemaailmsele inventuurile on umbes 1430 elektrijaama, mis kasutavad SCR-i üksi või koos teiste NO_x-i vähendamise tehnikatega, kusjuures enamik neist asub Põhja-Ameerikas ja Aasias. Ligikaudu 230 elektrijaama kasutavad SNCR-i üksi või koos teiste NO_x vähendamise tehnikatega, peamiselt Põhja-Ameerikas ja Euroopas. [3]

4.2.1. Selektiivne katalüütiline redutseerimine

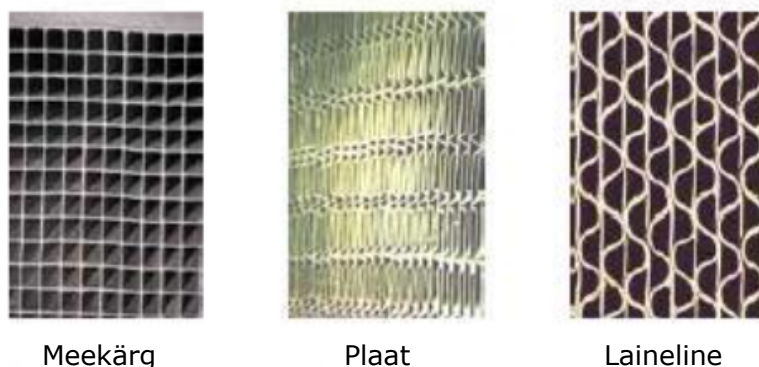
Üks optimaalne meetod NO_x eemaldamiseks on NO otsene lagundamine N₂-ks ja O₂-ks, kuid see reaktsioon on hapniku juuresolekul keeruline. Seetõttu on vajalik redutseeriv aine, mis aitab muuta NO kahjutuks lämmastikuks. Selektiivne katalüütiline reduktsioon (SCR) on üks tõhus meetod, kus kasutatakse redutseerivaid aineid nagu vesinik (H₂), süsivesinikud (HC), süsinikmonooksiid (CO) ja ammoniaak (NH₃) NO_x eemaldamiseks. SCR meetodil on kõrge efektiivsus ja seadmete paigaldamine on suhteliselt lihtne. Kuigi SCR meetodil on mõningaid puudusi, näiteks kõrged katalüsaatorite ja seadmete kulud, seadmete korrosioon, kõrge töötemperatuur ja piiratud katalüsaatori kasutusiga, on see siiski üks kõige tõhusamaid meetodeid NO_xide eemaldamiseks suitsugaasidest. [21]

Meetod põhineb NO_x-i redutseerimisel lämmastikuks katalüütilises kihis, kus ammoniaagiga (tavaliselt vesilahuses) reageeritakse optimaalsel temperatuuril umbes 300-450 °C, kuid mõnikord võib seda laiendada kuni 170-510 °C, sõltuvalt kasutatavast katalüsaatori tüübist ja konfiguratsioonist. SCR protsessis saab kasutada mitut katalüsaatorikihti, mis võimaldab suuremat NO_x-i vähendamist. Vastavalt erinevatele töötingimustele kohandatavate katalüsaatorite järjestikune kasutamine võimaldab modulaarset lähenemist (Joonis 7). [3], [19]



Joonis 7. Selektiivse katalüütilise taandamise reaktor [3], (kohandatud)

Ammoniaagi kasutamisel hoitakse seda tavaliselt anumates vesilahusena või veeldatud kujul, mille rõhk on suurem kui aururõhk maksimaalse temperatuuri korral. Väiksemates kateldes võib kasutada urea graanuleid, mis lahustatakse vees enne süstimist. Veeldatud ammoniaagi kasutatakse laialdasemalt kui teis andmeid, kuna selle kulud kilogrammi kohta on madalamad ja ladustamise investeeringud on väiksemad. Kuid veeldatud ammoniaagi omadused muudavad selle käitlemise keerukamaks võrreldes vesilahuselise ammoniaagiga. Kasutatavad katalüsaatorid võivad olla erineva geomeetrilise kujuga, näiteks meekärg-, plaat- või lainepõhised katalüsaatorid (Joonis 8). [3]



Joonis 8. Kasutatavate katalüsaatorite erinevad geomeetrilised kujud [3], (kohandatud)

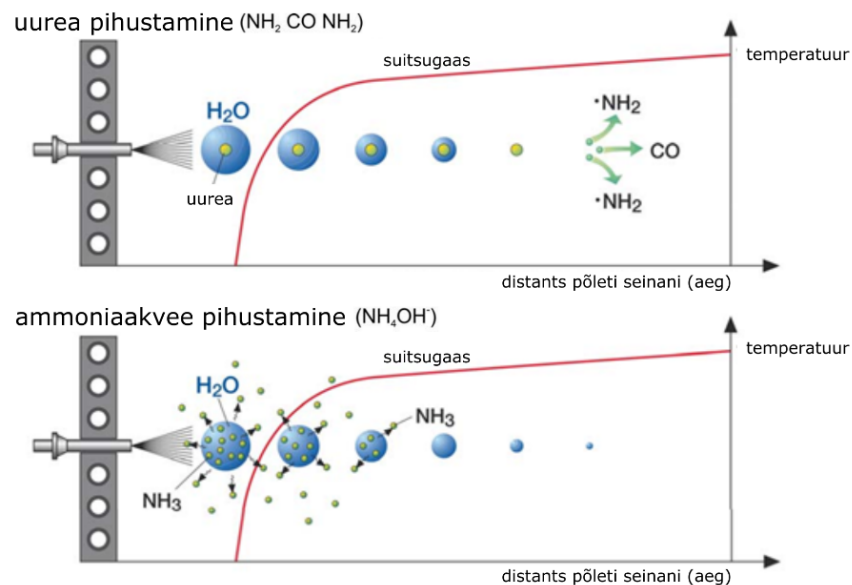
NO_x eemaldamise tase sõltub kasutatavast katalüsaatorist ja NH_3 ning NO_x suhtest. Suure NH_3 ja NO_x suhte korral võib saavutada suurema NO_x eemaldamise tõhususe, kuid see suurendab kasutamata ammoniaagi kogust puhtas suitsugaasis. Ammoniaagi lahuse hoidmine võimalikult väikesena on oluline, et vältida NH_3 reageerimist suitsugaasis oleva SO_3 -ga, mis võib põhjustada küttepindade saastumist ja korrosiooni moodustuvate ammoniumbisulfaatide tõttu. [3]

4.2.2. Selektiivne mittekatalüütiline redutseerimine

SNCR on NO_x vähendamise tehnoloogia, mis töötab ilma katalüsaatorita ja kasutab kõrgeid temperatuure. SNCR meetod põhineb NO_x keemilisel taandamisel, kus kuuma suitsugaasi segatakse redutseerimisreaktiiviga, mis aitab vähendada NO ühendeid. SNCR-protsessi efektiivsus ja temperatuurivahemik varieeruvad sõltuvalt erinevatest teguritest nagu kambrite struktuur, kasutatav kütus, pihustite geomeetria ja jõudlus. SNCR-meetodi optimaalne temperatuurivahemik on tavaliselt vahemikus 850-1100 °C. [3], [21], [19]

NO_x vähendamise keemilised reaktsioonid SNCR-meetodi abil sõltuvad suuresti kasutatavatest redutseerivatest kemikaalidest. Tavalised reaktiivid on ammoniaak ja urea. Näiteks ammoniaagi lagunemine viib NH_3 moodustumiseni, mis reageerib NO

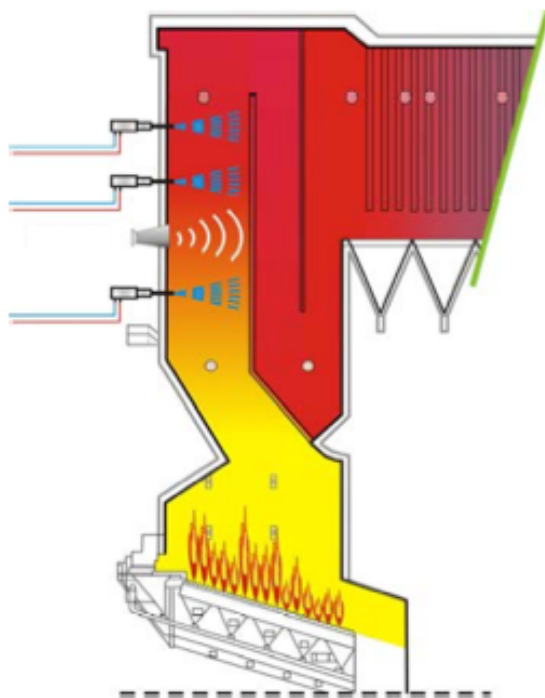
ühendiga ja muundub lõpuks N_2 ja H_2O -aurudeks. Uurea kasutamisel laguneb see NH_3 ja $HNCO$ -ks, millest NH_3 reageerib NO -ga, vähendades NO_x ühendeid N_2O -ks (Joonis 9). [21]



Joonis 9. NO_x redutsioon: Uurea versus ammoniaakvesi [22], (kohandatud)

SNCR-protsessi puhul on temperatuuriaken kriitilise tähtsusega, kuna see mõjutab otseselt reaktsiooni tõhusust. Kõrgemal temperatuuril võib ammoniaak oksüdeeruda, suurendades NO_x heitkoguseid, samas kui madalamal temperatuuril võib ammoniaaki jääda muutumata, vähendades NO_x eemaldamise määra. Seetõttu peab temperatuur olema optimaalne, et tagada efektiivne NO_x eemaldamine. Lisaks sellele võib katla koormuse muutumisel tekkida temperatuuriakende kõikumised. Seega on oluline reguleerida nõutavat temperatuuriakent ammoniaagi sissepritsega, mis võib nõuda mitme sissepritsetaseme kasutamist. [3]

SNCR-rajatis koosneb mitmest olulisest tegevusüksusest, sealhulgas reaktiivi ladustamis- ja aurustamisüksusest, kus reaktiivi säilitatakse, jahutatakse ja aurustatakse. Samuti on olemas automaatsüsteem reaktiivi sissepritse kontrollimiseks, tagades protsessi tõhusa toimimise (Joonis 10). [3]



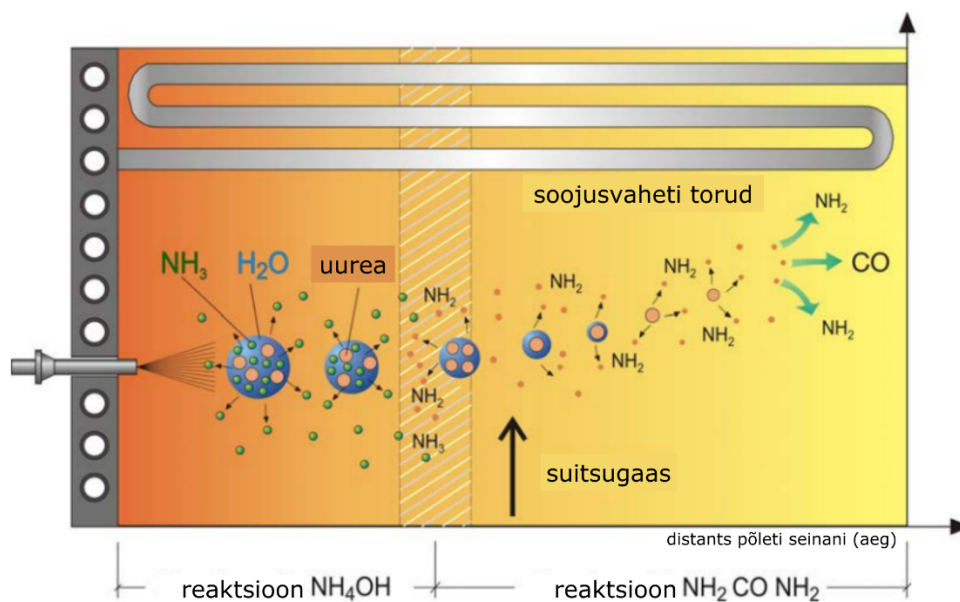
Joonis 10. Selektiivse mittekatalüütilise redutseerimise kasutamine restpõletus katlas [22]

SNCR-protsessis on oluline tagada, et reaktiiv ja NO_x oleksid piisavalt segunenud, et tagada kõrge saastetõrje määr. Lisaks mõjutab efektiivsust reaktiivi tilkade suurus, kus liiga väikesed või liiga suured tilgad võivad vähendada NO_x i eemaldamise tõhusust. Reaktiivikandjana võib kasutada rõhu all olevat õhku, aurutatud vett või aurutatud ammoniaaki, sõltuvalt konkreetsest rakendusest ja vajadustest. [3]

4.2.3. Uuenduslikud lähenemised sekundaarmeeetmetele

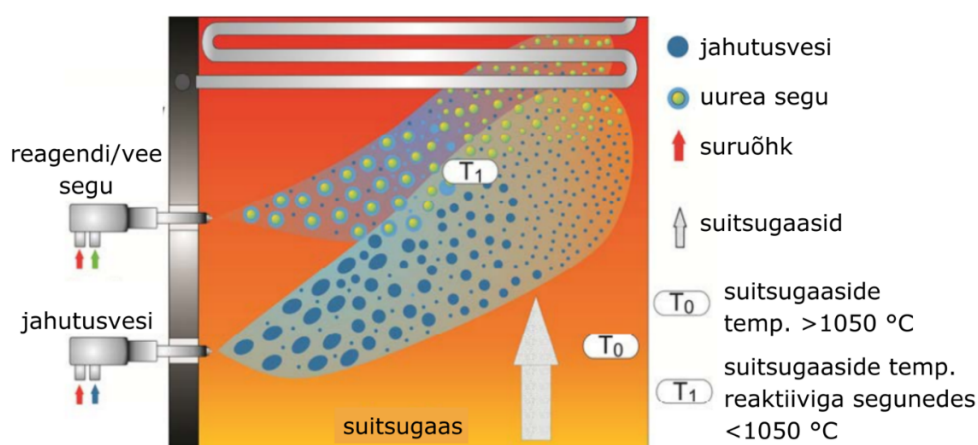
TWIN- NO_x [®] on uus protsess, mille eesmärk on parandada NO_x -heitmete vähendamist keemiliste reaktiivide abil tööstuslikes kateldes. SNCR protsessis pritsitakse suitsugaasidesse ainult ühte kindlat reagenti korraga, seega on välja töötatud uus protsess varasemate katsete põhjal, mis analüüsisid ammoniaagivee ja urealahuse erinevaid käitumisi NO_x -heitmete vähendamisel. Katsed näitasid, et madala lenduvusega reaktiivid vabanevad tilkade trajektoori lõpus, samas kui kõrge lenduvusega reaktiivid, näiteks ammoniaak (NH_3), vabanevad pihustite lähedal katla seinte juures. [22]

TWIN- NO_x [®] protsess segab ammoniaagi ja urea reaktiive, et optimeerida nende positiivseid omadusi ja saavutada tõhusam NO_x -heitmete vähendamine (Joonis 11). Sellel uuel protsessil on palju eeliseid, nagu tõhusam temperatuurivahemik, väiksem ammoniaagi mittereageerimine NO_x -iga, vähene reaktiivi tarbimine ja madal korrosioonirisk. TWIN- NO_x [®] protsess on alles arendamisjärgus, mistõttu on oodata edasisi täiustusi ja võimalusi protsessi efektiivsuse suurendamiseks. [22]



Joonis 11. NO_x redutsioon – Ammoniaakvee (NH_4OH) ja Uurea ($\text{NH}_2\text{CO NH}_2$) segamine [22], (kohandatud)

Suitsugaaside liiga kõrgete temperatuuride korral on võimalik neid jahutada. Seda on võimalik saavutada protsessivee koguse suurendamise teel, mis muudaks pihustumustrit sissepritses. Lahendus, kus lisatakse täiendavad jahutusvee injektorid olemasolevate reaktiivi pihustite lähedusse (Joonis 12). Selle kontseptsiooni kohaselt saab jahutusvee pritset lülitada sisse või välja vastavalt vajadusele, ilma reaktiivi jaotust mõjutamata. Oluline on igas piirkonnas sissepritsitava jahutusvee kogust muuta vastavalt temperatuuridele sõltuvalt suitsugaaside temperatuurist, sest see võimaldab suitsugaasi temperatuuri efektiivselt reguleerida, mis omakorda parandab SNCR-protsessi tõhusust. [22]



Joonis 12. Suitsugaaside selektiivse jahutamise põhimõte [22], (kohandatud)

Selektiivne suitsugaaside jahutamine võib olla lahenduseks probleemile, kus suitsugaaside temperatuur on katlast väljumisel sageli SNCR-protsessi jaoks liiga kõrge, eriti

täiskoormuse korral. Eksisteerivate katelde puhul on keeruline ja kallis suunata reaktiive soojusvahetite vahelisse piirkonda, kus temperatuurid on sobivamad SNCR-protsessi jaoks. Kui uute katelde puhul saab sellise ruumi olemasolu tagada projekti varajases etapis, siis juba olemasolevate kateldegagi seda võimalust ei ole. [22]

5. METOODIKA

Selgitamaks välja, milline on nelja Eesti suurima koostootmisjaama NO_x heitmete vähendamise võimekus, on kasutatud kvalitatiivset uurimismeetodit, kus andmete kogumisel viidi läbi dokumendianalüüs keskkonnaotsuste infosüsteemis KOTKAS. Käitised valiti arvestades aspekti, et väiksematel kui 30 MW_{th} käitistel ei teki probleeme NO_x heite piirnormide saavutamiseks. Antud väikesemahulise uuringu andmeid sai edukalt analüüsida tabelarvutusprogrammi Microsoft Exceli abil. Dokumendianalüüsi põhjal koostati koondtabel (Lisa 1), kus on välja toodud keskkonnakomplekslubades kirjeldatud andmed. Samuti koondati käitiste 2024. aasta esimese kvartali välisõhu pidevseire andmed tabelisse (Tabel 4, lk 29):

- valideeritud kuu keskmine NO_x kontsentratsioon (mg/Nm³);
- keskmistamise aeg mõõtmisel;
- suurim valideeritud mõõtmistulemus (mg/Nm³);
- kuu keskmine heite piirväärtus (mg/Nm³).

Töö kirjanduse ülevaade põhineb teemakohastel rahvusvahelistel teadusartiklidel, milleni jõuti kasutades Google Scholar ja ScienceDirect platvorme. Artiklitele saadi juurdepääs läbi kooli võrgu ning otsimisel kasutati märksõnu: NO_x, biomass, *combustion*, *district heating*. Samuti uuriti omakorda nendes artiklites viidatud allikaid. Lõputöö teemani jõudis autor 2023. aasta suvel toimunud erialase praktika jooksul ettevõttes AS Utilitas Tallinn. Ettevõtte töötajate jaoks oli teema sel hetkel aktuaalne ning seetõttu pakuti välja, et hetkeolukorda võiks rohkem uurida. Teoreetiliste allikate otsimise ja läbitöötamisega alustati 2023. aasta augustis. Käitiste keskkonnakomplekslubade uurimine, analüüsimine ja tulemuste vormistamine toimus 2024. aasta jaanuarist kuni 2024. aasta aprillini. Töö analüüsi osas võrreldi käitiste kohta kogutud andmeid, et tuua välja erinevused ja sarnasused. Sellest tulenevalt võrreldi analüüsi tulemusi erialase kirjandusega ning anti hinnang, milliseid tehnoloogiaid võiksid kasutada koostootmisjaamad tulevikus NO_x heitmete vähendamiseks.

6. EESTI NELJA SUURIMA KOOSTOOTMISJAAMA LÄMMASTIKOKSIIDIDE VÄHENDAMISE TEHNOLOOGIAD

Tulenevalt kirjanduse ülevaatest saadud informatsioonist koostati SCR-i ja SNCR-i omavaheline võrdlus (Tabel 3).

Tabel 3. Selektiivse katalüütilise redutseerimise ja selektiivse mittekatalüütilise redutseerimise võrdlus [21], [22]

	Selektiivne katalüütiline redutseerimine (SCR)	Selektiivne mittekatalüütiline redutseerimine (SNCR)
Tegevuskulud	Kõrged	Madalad
Paigaldamine	Keeruline	Lihtsam
Tõhusus	Kõrge	Madala
Töötemperatuurid	Madalad	Kõrged töötemperatuurid
Vajadus järgnevate puhastusseadmete järele	Pole vaja, sest põhiprotsess on piisavalt efektiivne	Jah

SCR-protsessiga võrreldes on SNCR-l mitmeid eeliseid, sealhulgas madalamad tegevuskulud, lihtsam moderniseerimine ja paigaldamine, samuti võimalus kasutada seda suure tahkete osakeste sisaldusega suitsugaaside puhul. See muudab SNCR protsessi atraktiivseks valikuks NO_x vähendamiseks, eriti suure väävlisisaldusega ja saastunud keskkonnatingimustes ning elektrijaamades. SNCR meetodi puudused on madal tõhusus, kõrged temperatuurinõuded, vajadus järgnevate puhastusseadmete järele ning piiratud kasutamine madala NO_x-kontsentratsiooniga suitsugaaside puhul. Tabeli 2 järgi on kõige efektiivsem NO_x heitmetest vabanemise viis SCR, kuid selle kulude ja tulude suhe on tavaliselt vähem soodne kui SNCR-tehnoloogia puhul. SCR-elektrijaamade ehitamise kulud on väga suured ja sama raha eest saaks ehitada vähemalt kümme SNCR-elektrijaama, mis täidaksid tulevasi NO_x-eeskirju ning pakuksid keskkonnale suuremat leevendust võrreldes ühe SCR-elektrijaamaga. [21], [22]

Mustamäe koostootmisjaam kuulub AS Utilitas Tallinnale ning on nimekirjas ainukene restpõletuskoldega koostootmisjaam. Selles jaamas asuvad lisaks biomassi katlale ka gaasipõletus seadmed, mis teevad kokku jaama summaarseks võimsuseks 307,98 MW_{th}. Biomassi katla võimsuseks on 54,2 MW_{th}. Kütuse kogused on aastas hinnanguliselt 150 838,86 tonni. Suitsugaaside puhastamiseks kasutab Mustamäe koostootmisjaam põlemisõhu optimeerimist, õhu astmelist lisamist ja suitsugaaside ringlust. Keskkonnaloast

tuleb välja, et hetkeline NO₂ kogus on ühes korstnas 43,057 g/s ning teises korstnas 31,973 g/s. Restpõletus koldes ei ole põlemisprotsess sama hästi kontrollitud kui keevkiht kateldes. Seega on täiesti võimalik, et restpõletuskoldes tekib rohkem NO₂ heitmeid. Antud asjaolu kinnitab ka see, et olenevalt asukohast põlemisrestil võivad sama liiki kütuseosakestel põlemiskeemia ja temperatuur varieeruda. Kõik teised kaitised peale Mustamäe kasutavad sekundaarmeetmeid, mis vähendavad NO_x heitmeid suitsugaasist peale põlemist kas katalüütilisel või mittekatalüütilisel meetodil. Seega võib sekundaarmeetmete mitterakendamine samuti olla põhjus, miks Mustamäe koostootmisjaama NO_x-i heitmete hulk on palju suurem kui ülejäänud kaitistel. [3], [23]

Mustamäe koostootmisjaama 2024. aasta esimese kvartali NO₂ valideeritud kuu keskmine kontsentratsioon oli 168,11 mg/Nm³. Selle mõõtmise keskmistamise aeg oli 24 tundi ja suurim valideeritud keskmine kontsentratsioon oli 194,07 mg/Nm³. See jääb alla kehtestatud piirmäära, milleks on 200 mg/Nm³. [24]

Lohkva koostootmisjaam asub Tartus ning kuulub ettevõttele Gren Tartu AS. Kevvkihtpõletusega koostootmisjaama summaarne võimsus on 84 MW_{th}, millest biomassil töötava katla võimsus on 76 MW_{th}. Kütuse kogused selle kaitise loal puudusid. Tehnoloogiad, mida kasutatakse suitsugaaside eemaldamiseks, on kütuse põletamine keevkihtpõletuse meetodil, lisandite (ammoniaak või urea) lisamine koldesse ja õhu ühtlane lisamine või suitsugaaside retsirkuleerimine. [25]

Lohkva koostootmisjaama mõõtmistulemuste keskmiseks mõõdeti 209,9 mg/Nm³. Keskmistamise aega mõõtmistele ega suurimat valideeritud mõõtmistulemust ei ole märgitud. Kuu keskmine jääb alla kehtestatud kuu keskmise NO₂ piirnormide, milleks on 275 mg/Nm³. [26]

Pärnu elektri ja soojuse koostootmisjaam kuulub ettevõttele Gren Eesti AS. See on samuti keevkihtpõletusega koostootmisjaam, millel summaarne võimsus on kokku 81,66MW_{th}, millest 76 MW_{th} on puitu põletava keevkihtkatla võimsus. Aastas kasutatud kütusekoguseks on märgitud 231 773 tonni. Suitsugaaside puhastamise tehnoloogiatest kasutatakse Pärnu koostootmisjaamas põlemisprotsesside optimeerimist, vähe lämmastikoksiide tekitavat põletit (LNB), õhu ja kütuse astmelist lisamist, suitsugaaside ringlust, selektiivset mittekatalüütilist redutseerimist ja reagendi (NH₃) sissepritsimist katlasse. Pärnu koostootmisjaama kompleksloast tuleb veel välja, et alates 2018. aastast on NO_x-de heitmed järjest tõusnud. Kui 2018. aasta keskmine emissioon 6% O₂ sisaldusega põlemisel 210,1 mg/Nm³, siis 2019. aasta keskmiseks emissiooniks oli see tõusnud 233,8 mg/Nm³. 2020. aasta 16. jaanuaril mõõdetud emissiooni hulgaks mõõdeti 265,7 mg/Nm³ kohta. See näitab kasvutrende heitmete suurenemisel. Koondtabelis (Lisa 1) on märgitud, et kuni 01.08.2021 aastani, mil hakati lisama rohkem ammoniaakvett, on

käitise emissioonid täpselt aasta keskmise $\leq 225 \text{ mg/Nm}^3$ ja ööpäeva proovivõtu keskmiste piirmääradeni $\leq 275 \text{ mg/Nm}^3$. [27]

Pärnu elektri ja soojuse koostootmisjaamas 2024. aasta esimese kvartali NO_2 mõõtmistulemuste keskmiseks saadi $176,96 \text{ mg/Nm}^3$ kohta. Keskmistamise aeg oli sellel mõõtmisel 10 minutit ning suurim valideeritud keskmine kontsentratsioon oli $321,098 \text{ mg/Nm}^3$ kohta. Tabelis 2 on välja toodud, et piirväärtuste suurim ületamine oli 16,76% ning mõõteperioodil oli piirmäärade ületamise kordusi viis. Eelnevate tulemustele tuginedes on 2024. aasta esimese kvartali mõõtmistulemused palju madalamad kui viimased teadaolevad mõõtmised aastal 2020. See näitab, et ammoniaakvee pritsimine koldesse SNCR protsessis annab tulemusi ning on põhjendatud meede NO_2 heitmete vähendamiseks. [28]

Väo 1. koostootmisjaam on OÜ Utilitas Tallinna Elektri jaamale kuuluv keevkihtpõletus katel, mis on omakorda kõige suurema puitkatla võimsusega koostootmisjaam selles analüüsis. Jaama summaarne võimsus on 82MW_{th} , mis on samuti puitkatla võimsus. Aastane kütuse tarbimine on selles jaamas 280 000 tonni. Tallinna elektri jaamas kasutatavad suitsugaaside puhastamise tehnoloogiad on põlemisprotsessi optimeerimine, õhu astmeline lisamine ja selektiivne mittekatalüütiline redutseerimine. [29]

Väo 1. koostootmisjaama mõõtmistulemustest puudus valideeritud keskmine kontsentratsioon, kuid suurim valideeritud mõõtmistulemus $223,5 \text{ mg/Nm}^3$ jääb alla kuu keskmise heite piirväärtuse 275 mg/Nm^3 . Seda on välja toodud ka mõõtmistele lisatud kaaskirjas, et ükski heide ei ületanud sellel perioodil piirmäärasid. [30]

Kokkuvõtvalt on esitatud käitiste eelpool kirjeldatud välisõhu NO_2 pidevseire andmed. Analüüsitavate käitiste 2024. aasta esimese kvartali mõõtmistulemused ei ole üle piirmäärade (Tabel 4). Seega võib oletada, et kirjanduse ülevaates esitatud tehnoloogiad NO_x heitmete vähendamiseks on hetkel tõhusad ja rakendatavad päriselulistel oludes.

Tabel 4. Käitiste 2024. aasta esimese kvartali välisõhu NO₂ pidevseire andmed [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]

	Mustamäe koostootmis- jaam	Lohkva koostootmis- jaam	Pärnu elektri ja soojuse koostootmis- jaam	Väo 1. koostootmisj- aam
Puitkatla võimsus (MW _{th})	54,2	75	76	82
Katla tüüp	Restkolde põletus	Keevkiht põletus	Keevkiht põletus	Keevkiht põletus
NO _x vähendamise meetodid	Primaar- meetmed	Primaar- ja sekundaar- meetmed	Primaar- ja sekundaar- meetmed	Primaar- ja sekundaar- meetmed
Valideeritud kuu keskmine kontsentratsioon (mg/Nm ³)	168,1	209,9	176,7	puudub
Keskmistamisaeg mõõtmistel	24 h	puudub	10 min	24 h
Suurim valideeritud mõõtmistulemus (mg/Nm ³)	194,0	puudub	321,0	223,5
Kuu keskmine heite piirväärtus (mg/Nm ³)	200	275	275	275

Käitiste komplekslubade analüüsist tuleb välja, et kõige rohkem kasutatakse NO_x heitmete vähendamiseks primaarmetmeid. Nendest kõige levinum on põlemisprotsessi optimeerimine, mis hõlmab põlemistemperatuuride kontrollimist, õhu ja kütuse astmelist lisamist ning suitsugaaside retsirkuleerimist. Kõikides koostootmisjaamades kasutatakse lämmastikoksiidide vähendamiseks vähemalt kahte primaarmetmet. Kirjanduse ülevaates käsitletud allikates ei kirjeldatud otseselt, millised on eelised ühe või teise primaarmetme kasutamisel. Iga primaarmetme hõlmab erinevaid tehnikaid ning sellest aspektist vaadatuna saab öelda, et rohkemate primaarmetmete kasutamine annab ka paremaid tulemusi. [3]

Sekundaarmetmeid kasutab uuritud neljast käitisest kolm (Lohkva, Pärnu ja Väo), millest kõik rakendavad keevkihtpõletuse tehnoloogiat. Kõigis kolmes käitis kasutatakse sekundaarmetmena NO_x-de vähendamiseks selektiivset mittekatalüütilist redutseerimist. Tuginedes kirjanduse ülevaatele on võimalik oletada, et see meetod on valitud just peamiselt odavate ülalpidamiskulude pärast ning see suudab koos primaarmetoditega saavutada hetkel nõutavad piirnormid. Samas restpõletuskoldega käitis (Mustamäe), kus tekib põletustehnoloogia põhiselt palju rohkem NO_x heitmeid, seda ei kasutata. Kirjalikest allikatest tuleb välja, et restpõletusega kolded on palju sobivamad SNCR kasutamiseks, sest ruum resti kohal annab suitsugaasidele aega saavutada optimaalsema

temperatuuri kemikaalide (ammoniaakvee ja urea) reageerimiseks suitsugaasidega enne kui need jõuavad soojusvahetisse [22]. Seega võiks Mustamäe koostootmisjaam tulevikus NO_x heitmete vähendamiseks kaaluda SNCR-tehnoloogia rakendamist.

Käesolevas töös kirjeldatud uuenduslikke sekundaarmeetemeid, nagu TWIN-NO_x[®] ja selektiivne suitsugaaside jahutamine, Eesti käitistes ei kasutata. Need tehnoloogiad on veel arendamisjärgus, kuid kirjalikele allikatele tuginedes on katsetuste teel tõestatud nende tehnikate tulemuslikkust. Seega võib oletada, et tulevikus on NO_x heitmete vähendamine suuremamahulisem ja efektiivsem vähendades negatiivset mõju keskkonnale ning inimestele.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks oli tuua välja olemasolevad lämmastikoksiidide heitmete vähendamise meetodid, võrrelda nelja Eesti suurima koostootmisjaama juba kasutusele võetud NO_x heitmete vähendamise protsesse ja võrrelda neid kirjanduses välja toodud parimate praktikatega. Eesmärgi saavutamiseks analüüsiti Eesti nelja suurima koostootmisjaama keskkonnakomplekslube ja võrreldi seda eelnevalt uuritud erialasest kirjandusest koostatud kirjanduse ülevaatega.

NO_x heitmed tekivad praktiliselt kõikides põlemisprotsessides [2]. NO_x ühendid avaldavad negatiivset mõju looduskeskkonnale, põhjustades näiteks osoonikihi hõrenemist, happesademeid ja eutrofeerumist. Osoonikihi hõrenemise tõttu on maapinnale langev UV kiirgus suurem, mis mõjutab nahavähi esinemise kasvu. Happesademed ja eutrofeerumine mõjutavad veekogude ökoloogilist tasakaalu ning NO_x ühendite kõrge kontsentratsioon sissehingatavas õhus võib põhjustada hingamisteede haigusi ning tekitada silmade ärritust. [5], [6], [7], [8], [9],

Lämmastikoksiidide heitmete vähendamise meetodeid puidu põletamisel on kahesuguseid: primaarsed meetmed ning sekundaarsed meetmed. Primaarseid meetodeid rakendatakse põlemisprotsessi ajal ning neist enim kasutatavamad on õhu astmeline lisamine ja suitsugaaside ringlus. Sekundaarmetmeid SCR ja SNCR rakendatakse aga põlemisprotsesside järgselt. [3], [19], [20], [21], [22]

Eesti nelja suurima koostootmisjaama (Mustamäe, Lohkva, Pärnu ja Vão 1.) NO_x heitmete mõõtmistulemused jäävad alla seadusandlusega määratud piirväärtusi. Seega võib oletada, et kasutatavad vähendamise meetmed on piisavalt tõhusad. Kui Lohkva, Pärnu ja Vão 1. koostootmisjaamad kasutavad nii primaar- kui ka sekundaarmetmeid, siis Mustamäe käitis kasutatakse ainult primaarmetmeid. Teisalt, arvestades Mustamäe jaama kõrgeid NO_x heitmete mõõtmistulemusi, võiks sekundaarmetmete rakendamine neid oluliselt vähendada. Erinevusi kirjanduses esitatud ja analüüsi tulemuste vahel ei esinenud. Teisalt leiti sekundaarmetmete uuenduslikke tehnoloogiaid TWIN-NO_x[®] ja selektiivne suitsugaaside jahutamine, mida ei kasutata veel Eestis. Soovides jääda tulevastesse piirmääradesse, tuleks siiski hakata planeerima nende rakendamisvõimalusi. [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]

SUMMARY

The title of this bachelor's thesis is *Reduction of Nitrogen Oxide Emissions from Biomass Combustion*.

The European Union (EU) is making it mandatory for renewable energy to account for at least 32% of total energy consumption by 2030, forcing Member States to increase the share of renewable energy. To achieve this, the heating and cooling sector will need to reduce its use of fossil fuels and the use of biofuels, including solid biomass, will be an important component of the EU's heating and cooling strategy. [1]

In 2017, solid biomass energy accounted for 43% of the energy produced for the residential sector in the EU. The use of solid biomass is attractive not only because of its high share of renewable energy in heat production, but also because of its lower energy costs compared to fossil fuels. It can help to reduce carbon dioxide emissions and act as an alternative to fossil fuels as a renewable and carbon neutral energy source. [1]

The combustion of solid biomass for heat production can reduce environmental sustainability by directly affecting air quality. The main pollutants in this context are particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NO_x). Particulate emissions are often considered as the main source of air pollution, leading to increasingly stringent restrictions on the use of biomass heating installations. Although NO_x emissions have received less attention, studies show that a large part of the environmental impact of modern biomass heating systems can be attributed to NO_x emissions. [1]

The aim of this thesis is to identify the existing methods for reducing NO_x emissions, to compare the NO_x emission reduction processes already implemented by the four largest cogeneration plants in Estonia and to compare them with the best practices reported in the literature.

In order to achieve the objective, the following research questions have been set:

- What are the impacts of NO_x on the natural environment and humans?
- What are the methods for reducing nitrogen oxide emissions from wood combustion?
- How are nitrogen oxide emissions reduced in wood combustion? What are the processes for reducing nitrogen oxide emissions in the four largest cogeneration plants in Estonia?

NO_x emissions are produced in virtually all combustion processes [2]. NO_x compounds have a negative impact on the natural environment, for example by causing ozone depletion, acid deposition and eutrophication. Due to ozone depletion, the UV radiation incident on the ground is higher, which influences the increase in skin cancer. Acid deposition and eutrophication affect the ecological balance of water bodies, and high concentrations of NO_x compounds in inhaled air can cause respiratory diseases and eye irritation. [5], [6], [7], [8], [9],

There are two types of methods to reduce NO_x emissions from wood combustion: primary measures and secondary measures. Primary methods are applied during the combustion process and the most commonly used are staged air injection and flue gas recirculation. Secondary measures SCR and SNCR, on the other hand, are applied after the combustion processes. [3], [19], [20], [21], [22]

The four largest cogeneration plants in Estonia (Mustamäe, Lohkva, Pärnu and Vão 1.) have NO_x emissions below the limit values set by legislation. It can therefore be assumed that the abatement measures used are sufficiently effective. While the Lohkva, Pärnu and Vão 1. cogeneration plants use both primary and secondary measures, the Mustamäe plant uses only primary measures. On the other hand, given the high NO_x emission measurements at Mustamäe, the implementation of secondary measures could significantly reduce them. There were no discrepancies between the literature and the results of the analysis. On the other hand, TWIN-NO_x[®] and selective flue gas cooling were found to be innovative technologies for secondary measures, which are not yet used in Estonia. However, in order to stay within future thresholds, it would be worthwhile to start planning for their application. [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] S. Ozgen, S. Cernuschi, ja S. Caserini, „An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd 135, lk 110113, jaan 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110113.
- [2] P. Glarborg, J. A. Miller, B. Ruscic, ja S. J. Klippenstein, „Modeling nitrogen chemistry in combustion”, *Progress in Energy and Combustion Science*, kd 67, lk 31–68, juuli 2018, doi: 10.1016/j.pecs.2018.01.002.
- [3] European Commission. Joint Research Centre., *Best Available Techniques (BAT) reference document for large combustion plants: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. LU: Publications Office, 2017. Vaadatud: 10. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/949>
- [4] „Nitrous oxide emissions”, Our World in Data. Vaadatud: 10. august 2023. [Online]. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/nitrous-oxide-emissions>
- [5] T. Boningari ja P. G. Smirniotis, „Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO_x abatement”, *Current Opinion in Chemical Engineering*, kd 13, lk 133–141, aug 2016, doi: 10.1016/j.coche.2016.09.004.
- [6] O. US EPA, „Basic Information about NO₂”. Vaadatud: 10. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>
- [7] P. Krecl, A. C. Targino, T. P. Landi, ja M. Ketzel, „Determination of black carbon, PM_{2.5}, particle number and NO_x emission factors from roadside measurements and their implications for emission inventory development”, *Atmospheric Environment*, kd 186, lk 229–240, aug 2018, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.05.042.
- [8] L. Zhang, J. Wang, S. Wang, C. Wang, F. Yang, ja T. Li, „Chemical characteristics of long-term acid rain and its impact on lake water chemistry: A case study in Southwest China”, *Journal of Environmental Sciences*, kd 138, lk 121–131, apr 2024, doi: 10.1016/j.jes.2023.03.028.
- [9] W. De Vries, „Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review”, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, kd 21, lk 100249, juuni 2021, doi: 10.1016/j.coesh.2021.100249.
- [10] I. Naureen et al., „Potential Impact of Smog on Human Health”, *Haya: Saudi J. Life Sci.*, kd 7, nr 3, lk 78–84, märts 2022, doi: 10.36348/sjls.2022.v07i03.002.
- [11] „Archive:Wood as a source of energy”. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Wood_as_a_source_of_energy
- [12] T. V. Vares, „Puitkütuste kasutaja käsiraamat”.
- [13] K. Rayaprolu, *Boilers for Power and Process*.
- [14] „Wellons Fei”. Vaadatud: 13. mai 2024. [Online]. Available at: <http://www.wellonsfei.ca/en/reciprocating-grate.aspx>
- [15] „Keskkonnaseadustiku üldosa seadus–Riigi Teataja”. Vaadatud: 13. mai 2024. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/130122023011>
- [16] „Suurte põletusseadmete saasteainete heite piirväärtused, nende kohaldamine mitme kütuse põletusseadme korral ja väävliärastuse astme nõuded–Riigi Teataja”. Vaadatud: 15. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/112092018005?leiaKehtiv>
- [17] „Väljaspool tööstusheite seaduse reguleerimisala olevatest põletusseadmetest väljutatavate saasteainete heite piirväärtused, saasteainete heite seirenõuded ja heite piirväärtuste järgimise kriteeriumid–Riigi Teataja”. Vaadatud: 15. august 2023. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/110112017018?leiaKehtiv>
- [18] „Keskkonnaministri määruse nr 44 seletuskiri.pdf”.
- [19] „KOMISJONI RAKENDUSOTSUS (EL) 2017/ 1442, - 31. juuli 2017, - millega kehtestatakse Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2010/ 75/ EL alusel parima võimaliku tehnika (PVT) alased järeldused suurte põletusseadmete jaoks - (teatavaks tehtud numbri C (2017) 5225 all)”.

- [20] E. Houshfar, T. Løvås, ja Ø. Skreiberg, „Experimental Investigation on NOx Reduction by Primary Measures in Biomass Combustion: Straw, Peat, Sewage Sludge, Forest Residues and Wood Pellets“, *Energies*, kd 5, nr 2, lk 270–290, veebr 2012, doi: 10.3390/en5020270.
- [21] F. Gholami, M. Tomas, Z. Gholami, ja M. Vakili, „Technologies for the nitrogen oxides reduction from flue gas: A review“, *Science of The Total Environment*, kd 714, lk 136712, apr 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136712.
- [22] „2013.06-PG-Europe__Vienna-SNCR-Process-for-Coal-Fired-Boilers-Experiences-and-Potential-for-the-Future.pdf“.
- [23] „Mustamäe koostootmisjaama keskkonnakaitaseluba nr KKL-506902“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?permit_assignment_submission_id=48141&permit_id=133622&permit_id=133622
- [24] „Mustamäe Välisõhu pidev heiteseire, 01.01.2024 - 31.03.2024“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_permit_assignments_view?permit_assignment_submission_id=48141&represented_id=&permit_id=133622
- [25] „Lohkva koostootmisjaama keskkonnakaitaseluba nr. L.KKL.TM-148737“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?permit_assignment_submission_id=47997&permit_id=135250&permit_id=135250
- [26] „Lohkva koostootmisjaama Välisõhu pisteline heiteseire 01.01.2024 - 31.03.2024“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_permit_assignments_view?permit_assignment_submission_id=47997&represented_id=&permit_id=135250
- [27] „Pärnu elektri ja soojuse koostootmisjaama Keskkonnakaitaseluba nr KKL/318381“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?permit_assignment_submission_id=47931&permit_id=132070&permit_id=132070
- [28] „Pärnu elektri ja soojuse koostootmisjaama Välisõhu pidev heiteseire 01.01.2024 - 31.03.2024“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_permit_assignments_view?permit_assignment_submission_id=47931&represented_id=&permit_id=132070
- [29] „OÜ Utilitas Tallinna Elektri jaama Keskkonnakaitaseluba nr L.KKL.HA-162843“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?permit_assignment_submission_id=47397&permit_id=144008&permit_id=144008
- [30] „OÜ Utilitas Tallinna Elektri jaama Välisõhu pidev heiteseire 01.01.2024 - 31.03.2024“. Vaadatud: 3. mai 2024. [Online]. Available at: https://kotkas.envir.ee/permits/public_permit_assignments_view?permit_assignment_submission_id=47397&represented_id=&permit_id=144008

LISAD

Lisa 1. Kätiste koondtabel

Nimi	Mustamäe tootmisüksus	Lohkva koostootmisjaam	Pärnu elektri ja soojuse koostootmisjaam	Väo 1. koostootmisjaam
Link	https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=8&search=1&permit_nr=15083886	https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=8&search=1&permit_nr=10248	https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=8&search=1&permit_nr=231773	https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?represented_id=8&search=1&permit_nr=79224608
Ettevõtte	Utilitas Tallinn AS	Gren Tartu AS	Gren Eesti AS	OÜ Utilitas Tallinna Elektri- ja Kütus
Tehnoloogia	restpõletus katel	keevkiht katel	keevkiht katel	keevkiht katel
Kompleksluba jah/ei	jah	jah	jah	jah
Käitise summaarne võimsus (MWth)	307,98	84	81,66	82
Puitkatla võimsus (MWth)	54,2	75	76	82
Kütuse kogused (t)	150 838,86	?	231 773	280 000
Hetkeline NO ₂ kogus (g/s)	43,057/31,973	10,248	18,772	7,922/4,608
Saasteainete püüdeseadmed	2x elektrifilter	elektrifiltrid ja suitsugaaside pesur	kottfiltrid, naatriumkarbonaat ja amoniakvee pritsimine	elektrifiltrid, SNCR
Tööaeg tundides ööpäevas	24	24	24	24
Tööaeg tundides aastas	8760	8424	8760	8250
PVT selgitus				
Tehnoloogiad, mida kasutatakse suitsugaaside puhastamiseks	põlemisprotsessi optimeerimist; õhu astmelist lisamist; suitsugaasi ringlust	kütuse põletamine keevkiht meetodil (ühtlane, madal temperatuur); lisandite (ammoniaak või urea) lisamine koldesse; õhu ühtlane jaotus või suitsugaaside retsirkuleerimine.	põlemisprotsessi optimeerimist; vähe lämmastikoksiide tekitavat põletit (LNB); õhu astmelist lisamist; kütuse astmelist lisamist; suitsugaasi ringlust; selektiivset mittekatalüütilist taandamist; sorbendi sissepritsimist katlasse (NOx vähendamiseks pritsitakse koldesse NH ₃ vesilahust).	põlemisprotsessi optimeerimine; õhu astmeline lisamine; selektiivne mittekatalüütiline taandamine (SNCR)
Käitise KKJS-i ja tehnoloogia kirjeldused	NO _x emissioon 6% O ₂ juures: NO _x – ööpäevakeskmine heite piirväärtus - 200 mg/Nm ³ , aasta keskmine heite piirväärtus 140 mg/Nm ³ ;	50-100 MW põletusseadmetes NO _x heite piirväärtus 300 mg/Nm ³ .	aasta keskmine ≤ 225 mg/Nm ³ ning ööpäeva või proovivõtuperioodi keskmine ≤ 275 mg/Nm ³ . Hiljemalt 01.08.2021 viiakse heide madalamale tasemele ammoniaakvee rohkema lisamisega.	Käitise tehnoloogiaga saavutatav NO _x heite tase on: Aasta keskmine tase – 225 mg/Nm ³
PVT vliide, KKJS-i ja tehnoloogia kirjeldused	PVTga saavutatav uues põletusseadmes, kui põletusseadmete summaarne nimisoojusvõimsus on vahemikus 100-300 MWth, 100-200 mg/Nm ³ ja aasta keskmine õhkuheite tase 50-140 mg/Nm ³ .	PVTga saavutatav olemasolevas põletusseadmes, kui põletusseadmete summaarne nimisoojusvõimsus on vahemikus 50-100 MWth, 120-275 mg/Nm ³ ja aasta keskmine õhkuheite tase 70-225 mg/Nm ³ .	PVTga saavutatav olemasolevas põletusseadmes, kui põletusseadmete summaarne nimisoojusvõimsus on vahemikus 50-100 MWth, 120-275 mg/Nm ³ ja aasta keskmine õhkuheite tase 70-225 mg/Nm ³ .	Tabel 9 PVTga saavutatav NO _x -i õhkuheite tase tahke biomassi ja/või turba põletamisel Põletusseadme summaarne nimisoojusvõimsusega 50-100 MWth PVTga saavutatav heitetasemed (mg/Nm ³) on järgmised: aasta keskmine 70-225 mg/Nm ³ ja ööpäeva või proovivõtuperioodi keskmine 120-275 mg/Nm ³

[23], [25], [27], [29]