

Energiatehnoloogia instituut

**KIIRPÜROLÜÜSI KATSESEADME ARVUTUSED JA  
PROJEKTEERIMINE**

**CALCULATIONS AND DESIGNING OF A PILOT-SCALE  
FAST PYROLYSIS APPARATUS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Alex Hiis

Üliõpilaskood 192076MASM

Juhendaja: Andres Siirde, professor/direktor

Tallinn 2021

# 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.

25.05.2021

Autor: Alex Hiis

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

25.05.2021

Juhendaja: Andres Siirde

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

\_\_.\_\_.2021

Kaitsmiskomisjoni esimees:

/ allkirjastatud digitaalselt /

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

Mina Alex Hiis

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kiirpürolüüsi katseseadme arvutused ja projekteerimine, mille juhendaja on Andres Siirde,

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.

---

25.05.21

---

<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 loomingu 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.

# ENERGIATEHNOLOOGIA INSTITUUT

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Alex Hiis, 192076MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/18 – Energiatehnoloogia instituut

Juhendaja: professor, Andres Siirde, PhD, +372 5556 9815

Konsultant: insener, Ants Martins, PhD, +372 515 2328

### Lõputöö teema:

Kiirpürolüüsi katseseadme arvutused ja projekteerimine

Calculations and designing of a pilot-scale fast pyrolysis apparatus

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Põlevkivi pürolüüsi, põlevkiviõli ja pürolüüsi reaktorite kirjeldamine
2. Pürolüüsiks vajalike arvutuste teostamine
3. Teha ülevaade kiirpürolüüsi katseseadme projekteerimisest ja tootmisjoonistest

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetilise osa uurimine ja kirjutamine	19.04.21
2.	Arvutuste teostamine ja kontrollimine kaasjuhendajaga	06.05.21
3.	Katseseadme projekteerimine olemasolevate eskiiside alusel	21.05.21

**Töö keel:** Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 25.05.2021

**Üliõpilane:** Alex Hiis /allkirjastatud digitaalselt/

25.05.2021

**Juhendaja:** Andres Siirde /allkirjastatud digitaalselt/

25.05.2021

**Konsultant:** Ants Martins /allkirjastatud digitaalselt/

25.05.2021

**Programmijuht:** Eduard Latõšov /allkirjastatud digitaalselt/

25.05.2021

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
Lühendite ja tähiste loetelu .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. PÜROLÜÜS .....	10
1.1 Põlevkivi kiirpürolüüs .....	11
1.1.1 Põlevkiviõli .....	13
2 REAKTORITE TEHNOLOOGIA .....	16
2.1 Liikumatu kihiga reaktorid .....	17
2.2 Keevkihtreaktorid .....	17
2.2.1 Mulliv keevkihtreaktor .....	18
2.2.2 Ringlev ehk tsirkuleeriv keevkihtreaktor .....	19
2.3 Pöörlev koonusreaktor .....	20
2.4 Ablatiiv reaktor .....	21
2.5 Tigureaktor .....	22
3 KATSESEADME ARVUTUSED .....	23
3.1 Põlevkivi ja poolkoksi erisoojused tsoonides .....	24
3.1.1 Tsoonide jaotuse kontrollimine .....	27
3.1.2 Põlevkivi ja poolkoksi kuumutamise kordarvud .....	27
3.1.3 Põlevkivi lagunemise ja õli aurustamise erisoojused .....	29
3.2 Põlevkivi retortimiseks vajalik soojushulk .....	31
3.3 Pürolüsaatori mõõtmed .....	33
3.4 Reaktorisse antav täiendav soojushulk .....	36
3.5 Pürolüsaatori soojusbilanss .....	38
4 KATSESEADME PROJEKTEERIMINE .....	43
4.1 Katseseadme kirjeldus ja tähistused .....	45
4.2 Katseseadme juhtimine .....	51
4.2.1 Ohutus .....	52
4.3 Ettepanekud tulevaste seadmete projekteerimiseks .....	53
4.3.1 3D-möödistamine, laserskaneerimine .....	54
KOKKUVÕTE .....	56
CONCLUSION .....	58
5 KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	60
LISAD .....	62

## **EESSÕNA**

Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituuti töötatakse välja projekti „Innovatiivsed põlevkivi gaasistamise, pürolüüsi ja põletamise tehnoloogiad“ raames kiirpürolüüsi katseseadet, mille projekteerimisel osalesin, sealt ka tekkis idee anda ülevaade tehtud tööst. Lõputöö jaoks vajalik teooria saadi põhiliselt elektroonilistest allikatest, arvutuste jaoks vajalikud andmeid aitas leida insener Ants Martins ning samuti tema poolt koostatud eskiisid, mille põhjal katseseadet valmistatakse.

Töö juhendajaks on Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi professor Andres Siirde ja kaasjuhendajaks Energiatehnoloogia instituudi insener Ants Martins. Autor tänab juhendajaid suurepärase juhendamise, jagatud teadmiste, ideede ja ettepanekute eest. Eriti suur tänu Ants Martinsile, kes mängis suurt rolli kogu katseseadme projekteerimise osas.

Märksõnad: kiirpürolüüs, keevkiht, katseseade, projekteerimine, magistritöö.

## Lühendite ja tähiste loetelu

$B$  – kütuse kulu, kg/h

$W^t$  – põlevkivi tarbimisaine niiskus, %

$R$  – põlevkivi orgaanilise osa sisaldus, %

$Q$  – ajaühikus kuluv soojushulk, kW

$h$  – entalpia, kJ/kg

$c$  – erisoojus, kJ/kgK

$F$  – pindala, m<sup>2</sup>

$\sigma_0$  – absoluutselt musta keha kiirgustegur, W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>

$k$  – soojuslähikandetegur, W/m<sup>2</sup>K

$\alpha$  – kiirgus soojusülekangetegur, W/m<sup>2</sup>K

$\lambda$  – soojusjuhtivustegur, W/mK

$\varepsilon$  – soojust vastuvõtva pinna kiirgustegur

## SISSEJUHATUS

1970. aastate ülemaailmse energiakriisi ajal, kui arvati, et naftavarusid jätkub vaid aastani 2010 – 2020, hakkasid paljud riigid (USA, Brasiilia, Austraalia, Jugoslaavia, Maroko, Rumeenia, Bulgaaria, Süüria jt) põlevkivi vastu huvi tundma, eelkõige just keemilis-tehnoloogilisest aspektist – õli saamiseks. Tehti laboratoorseid uuringuid, 12 riigis projekteeriti ja ehitati ligi 30 tüüpi katse- ja tööstusseadmeid, peamiselt põlevkivist mootorikütuse saamiseks [1]. Eestis on põlevkiviõli toodetud ligi 100 aastat. Selle aja jooksul on kasutatava tehnoloogia areng olnud suur ning põlevkiviõli tootmisefektiivsus ning õli puhtus on mitmekordselt tõusnud, mille tulemusena saab öelda, et Eesti põlevkivitööstus on maailmas enim arenenud.

„Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016 – 2030“ on paika pannud, et põlevkivi jääb vähemalt 15 aasta jooksul Eestis peamiseks elektri ja põlevkiviõli tootmise tooraineks, kuid üha enam karmistuvate keskkonnanõuete tõttu on tekkinud vajadus olemasolevaid põlevkivi töötlemise tehnoloogiaid, kas täiustada, edasi arendada või välja töötada uusi tehnoloogilisi lahendusi [2].

Üks olulisemaid ja enam keskkonnamõju vähendav suund põlevkivitööstuses on olnud keevkihttehnoloogia kasutuselevõtt nii elektri kui ka õli tootmisel. Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi katsehalli luuakse hetkel projekti „Innovaatiliste ja keskkonnasõbralike põlevkivi või selle saaduste töötlemise tehnoloogiate arendamine“ raames põlevkivi pürolüüsi katseseadet, mis on mõeldud keevkihttehnoloogial pürolüüsi võimaluste uurimiseks ja protsessi parandamiseks. Positiivsete katsetulemuste korral saab neid kasutada töökindlama ja keskkonnasõbralikuma pooltööstusliku/tööstusliku põlevkiviõli tootmiseseadme väljatöötamiseks. Kuigi Eesti Energia AS kui ka Viru Keemia Grupp AS on praeguseks peatanud oma isealgset kavatsused rajada rafineerimistehased põlevkiviõlist mootorikütuste tootmiseks, on üldiselt ettevõtted huvitatud põlevkivitööstusest ja on teinud suuri investeeringuid põlevkivisekori edasiseks arendamiseks, eelkõige põlevkiviõli tootmiseks. Seda ka kinnitab teiste põlevkiviga seonduvate projektide hulk Energiatehnoloogia instituudis [3].

Lõputöö põhieesmärgiks oli projekteerida katseseade varasemalt tehtud eskiiside alusel ning leida soojushulk, mis kulub põlevkivi pürolüüsiks. Täiendavalt sellele teostada pürolüüsiseadme kontrollarvutus soojusbilansi alusel, et hinnata tehnilise lahenduse vastavust ettevõtetud eeldustele. Täiendavaks eesmärgiks oli uurida põlevkivi kiirpürolüüsi ja selle saadust põlevkiviõli ning teha kirjeldav ülevaade erinevatest reaktoritest, mida pürolüüsiprotsessis on võimalik kasutada.



Projekteerimisel koostati eskiisjoonistest 3D mudel ning koostati joonised. Modelleerimine ja jooniste koostamine on tehtud tarkvaras Autodesk Inventor Professional 2019.

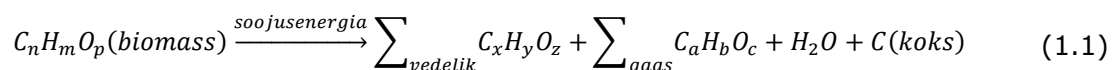
Esimeses peatükis käsitletakse pürolüüsi iseloomu ja vajaminevaid tingimusi, antakse ülevaade põlevkivi kiirpürolüüsist ja selle tulemusel saadud põlevkiviõlist. Teises peatükis antakse lühike kirjeldus erinevatest kiirpürolüüsi reaktoritest ning tuuakse välja nende kommertspotentsiaal. Kogu kolmas peatükk on suunatud soojustehniliste arvutuste teostamisele. Arvutatakse välja põlevkivi pürolüüsiks vajaminev soojushulk ning nendest tulemustest lähtuvalt vajaminev juurde antav soojushulk pürolüsaatorisse. Viimases peatükis tehakse ülevaade katseseadme projekteerimisest ning ettepanekuid tulevaste seadmete projekteerimiseks.

Lisas L3.5.1 kuni L3.5.4 on soojusülekanne arvutuste tabelid ning lisades L4.1 ja L4.2 autori koostatud projekteerimise käigus tehtud jooniste nimekiri ja materjalitabel, mille abil tootmisjoonised koostati. Graafiline osa on lisatud lõputööle eraldi failina, kus on kõik 25 katseseadme koostujoonist.

# 1. PÜROLÜÜS

Pürolüüs on aine termiline lagundamine kõrgel temperatuuril ilma hapniku juurdepääsuta või sellise väikese koguse juures, mille korral gaasistamist veel ei esine täies ulatuses. See on keemiline reaktsioon, mis hõlmab materjali keemilise koostise muutmist. Selle tulemusel eralduvad materjalist erinevad kondenseeruvad ja mitte-kondenseeruvad gaasid ning järelejäänud tahket osa nimetatakse koksiks. Erinevalt põlemisest on protsess endotermiline. Pürolüüsiks nimetatakse tihti ka mitmeid teisi keemiatööstuses kasutatavaid kõrgetemperatuurseid protsesse, sh krakkimine ja utmine (kuivdestillatsioon) [4].

Alljärgnevalt on toodud pürolüüsi protsessi kirjeldav valem, mis küll on võetud biomassi pürolüüsi käsitlevast kirjandusallikast [5], kuid valem on kehtiv pürolüüsile üldiselt:



kus  $C$  – süsinik,  
 $H$  – vesinik,  
 $O$  – hapnik,  
 $H_2O$  – vesi/veeaur.

Pürolüüsil tekivad esmalt kondenseeruvad gaasid ja koks. Kondenseeruvad gaasid võivad laguneda mitte-kondenseeruvateks ühenditeks ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ), vedelikuks ja koksiks. See lagunemine toimub osaliselt gaasi faasi homogeensete reaktsioonide (ained reageerivad samas faasis) tulemusena ja gaas-tahke faasi heterogeensete (ained reageerivad erinevate faaside piirpinnal) reaktsioonide tulemusena. Gaasi faasi reaktsiooni tulemusena kondenseeruv fraktsioon krakitakse (suured süsivesikud lagundatakse väiksemateks ühenditeks) väiksemateks mitte-kondenseeruvateks gaasimolekulideks nagu  $CO$  ja  $CO_2$  [5].

Kuumutuskiiruse järgi võib pürolüüsi jaotada erinevalt, Tabel 1.1 annab ülevaate biomassi näitel pürolüüsi protsessidest. Aeglase pürolüüsi puhul on kuumutuskiirus väike ja lähteaine osakeste reaktoris viibimise aeg on võrdlemisi pikk (minutitest tundideni). Kiirpürolüüsi puhul on kuumutuskiirus suur ( $>100$  °C/s) ja osakeste reaktoris viibimise aeg väga lühike (vaid mõni sekund). Pürolüüsitemperatuur jääb tavaliselt vahemikku 400 – 650 °C. Lendosa eraldub kiiresti ja kiirele kuumutamisele järgneb gaaside kiire jahutamine ja õliaurude kondenseerumine. Kiirpürolüüsi

optimeeritakse õli tootmise eesmärgil. Antud lõputöö kontekstis on kõikidest erinevatest pürolüüsi tüüpidest kiirpürolüüs hetkel kõige huvipakkuvam [5].

Tabel 1.1 Erinevad pürolüüsi protsessid biomassi näitel [6]

Pürolüüsi tehnoloogia	Viibeaeg	Kuumutuskiirus	Temperatuur, °C	Produkt
karboniseerimine	päevades	väga madal	400	koks
tavaline/aeglane pürolüüs	5-30 min	madal	600	õli, gaas, koks
kiirpürolüüs	0,5-5 s	väga kõrge	650	bioõli
välk-vedelik pürolüüs	<1 s	kõrge	<650	bioõli
välkpürolüüs	<1 s	kõrge	<650	kemikaalid, gaaskütus
ülikire pürolüüs	<0,5 s	väga kõrge	1000	kemikaalid, gaaskütus
vaakumpürolüüs	2-30 s	keskmise	400	bioõli
hüdropürolüüs	<10 s	kõrge	<500	bioõli
metaan-pürolüüs	<10 s	kõrge	>700	kemikaalid

Vajalikud tingimused kiirpürolüüsi protsessiks on [7]:

- väga kõrged kuumutamiskiirused,
- väga kõrged soojusülekangetegurid,
- täpne ja kontrollitav reaktsioonitemperatuur,
- kuuma auru lühike viibeaeg materjali osakese pinnal (vähendab edasisi reaktsioone),
- kiire koksi eemaldamine, et vähendada aurude krakkimist,
- kiire aurude jahutamine, et saada õli.

## 1.1 Põlevkivi kiirpürolüüs

Põlevkivi termilise lagunemise mehhanismi on kirjeldatud väga erinevalt, suuresti sõltuvalt sellest, millist päritolu põlevkivi vastavas uuringus kasutatud on. Kukersiidi lagunemist on kirjeldatud koosnevana mitmest etapist, ülevaade kogu protsessist on välja toodud Tabel 1.2. Esmalt eraldub ~100 °C juures niiskus. Põlevkivi termiline lagunemine algab juba temperatuuril 170 kuni 180 °C, mis intensiivistub temperatuuri tõusuga. 270 °C juures algab uttevee moodustumine kerogeeni hapnikust ja vesinikust

ning teatav osa CO<sub>2</sub> ja H<sub>2</sub>S vabaneb. Esmased eralduvad gaasid, mis on määratavad, on veeaur, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO ja H<sub>2</sub>. Temperatuuril umbes 325 °C tekib põlevkivi kerogeeni osalise lagunemise produktina termobituumen, mis ei lendu, kuid on eraldatav kerogeenist lahustitega ekstraktsiooni teel. Kuumutamise aja pikenedes ja/või temperatuuri edasisel tõstmisel toimub termobituumeni järkjärguline lagunemine, mille tulemusena kasvab lenduvate ühendite kogus. Lenduvateks ühenditeks on erinevad küllastunud ja küllastumata, sealhulgas hapniku ja väävlit sisaldavad süsivesinikud aga ka eespool nimetatud gaasid. 450 kuni 500 °C juures moodustub tahke jääk ehk poolkoks ning temperatuuridel üle 500 °C toimub intensiivne primaarse õli lagunemine [3].

Tabel 1.2 Põlevkivi pürolüüsil toimuvate protsesside temperatuurivahemikud

Temperatuur, °C	Protsess
100 – 105	Mehaaniliselt seotud vee eraldumine
170 – 180	Eralduvad gaasid, mis on adsorbeerunud põlevkiviosakeste vahele
270 – 290	Kerogeeni hapnikust ja vesinikust tekib lagunemisvesi, eraldub osa CO <sub>2</sub> ja SO <sub>2</sub>
325 – 350	Algab õli ja süsivesinikugaaside teke
325 – 390	Termobituumeni tekkimine
420 – 450	Termilise lagunemise aktiivne staadium
450 – 500	Protsess lõppeb ja järele jääb poolkoks
>500	Sekundaarsed protsessid

Joonis 1.1 on kirjeldatud põlevkivi retortimise skeem. Õhuvabas keskkonnas kuumutamisel eraldub esmalt jääkniiskus ning seejärel moodustub kerogeenist termobituumen. Tekkinud bituumen laguneb seejärel põlevkiviõliks, gaasiks, karbonaatseid mineraale sisaldavaks jäägiks ning pürolüüsiveeks. Samal ajal eralduvad põlevkiviosakese maatriksist õli, gaas ja vesi. Karbonaatseid mineraale sisaldav jääk jääb seotuks teiste põlevkivis sisalduvate mineraalidega, moodustades tahke jäägi – poolkoksi [3].



Tabel 1.3 Pürolüüsi saadused Ojamaa põlevkivist, wt% [10]

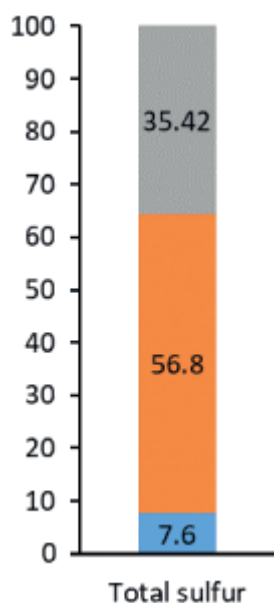
Parameeter	Ojamaa põlevkivi, Fischeri retort	Eesti kukersiit, kuiv alus
Õlisaagis, kuiv alus, %	16,8	19,29
Poolkoks, kuiv alus, %	76,3	73,81
Vesi, kuiv alus, %	1,7	1,64
Gaas + kaod, kuiv alus, %	5,2	5,26

Tabel 1.4 Fraktsioonide jagunevus Ojamaa põlevkivis [10]

Fraktsioon	Saagis Ojamaa põlevkivist, %	Väävlisisaldus, wt%
IBP – 180 °C	18,5	0,91
180 – 350 °C	44,5	0,749
>350 °C	37,0	0,644

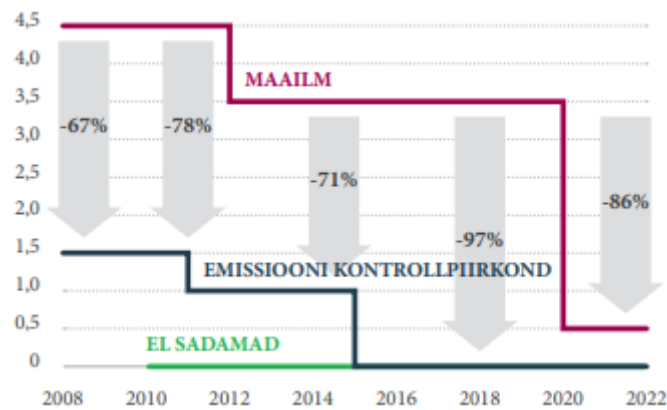
IBP –keemise algtemperatuur

Katsetulemuste põhjal järeldati, et umbes 52% kerogeenist muundus põlevkiviõliliks, mis näitas, et põlevkivi oli hea kvaliteediga. Olles kindlaks määranud kogu väävli sisalduse algmaterialis ja saagistes, järeldati, et ~57% väävlist jäi poolkoksi sisse, ~35% pürolüüsil eraldunud gaaside sisse ja ~8% jäi põlevkiviõli hulka (Joonis 1.2) [10].



Joonis 1.2 Väävli jaotumine (massiprotsent) põlevkivi pürolüüsi saadustes [10]

Eesti tootjate põlevkiviõli väävlisisalduse on keskmiselt 0,8%, mis vastab madala väävlisisaldusega kütuse kriteeriumitele. 1. jaanuaril 2020, aga jõustus Rahvusvahelise Mereorganisatsiooni (IMO) poolt sätestatud uus väävli piirnorm laevade pardal kasutatava kütteõli jaoks, milleks on 0,50 massiprotsenti. Antud määrus nõuab kõigi kütuse tootmise, jaotamise, ladustamise ja käitlemisega seotud osapoolte põhjalikku teadlikkuse tõstmist. Karmistuvate keskkonnamääruste tõttu oleks tarvis põlevkiviõli eelrafineerida, mis võimaldaks viia õli väävlisisalduse 0,1%. Viru Keemia Grupi ja Eesti Energia koostööl selgus, aga arusaam, et eelrafineerimistehas ei tasuks ennast ära, sest lähiajal on põlevkiviõli piisavalt kvaliteetne ja väärtuslik ka ilma eelrafineerimiseta. Laeva seisukohalt on teiseks võimaluseks endiselt jätkata kõrgema väävlisisaldusega kütuse kasutamist, kui nad kasutavad samaväärset nõuetele vastavuse meetodit, näiteks gaasimärgpuhasteid [9] [11].



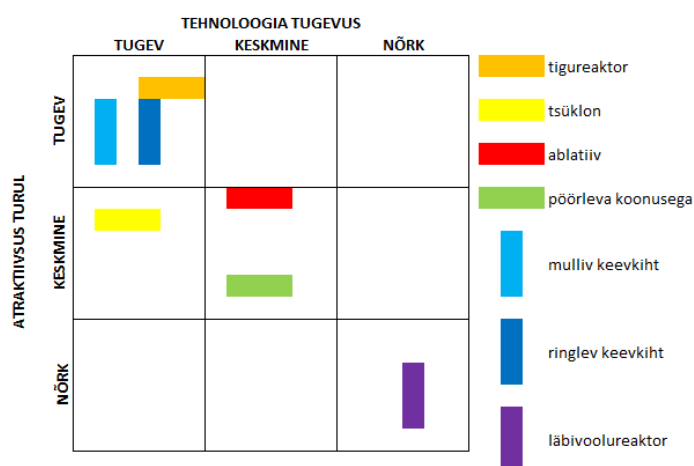
Joonis 1.3 Muutused väävli piirmääras 2008 – 2022 [9]

## 2 REAKTORITE TEHNOLOOGIA

Reaktor kui keskne komponent pürolüüsi protsessis on leidnud palju arendust, et parendada vanu meetodeid ning välja töötada patenteeritud lahendus. Reaktori disain on üks põhilisemaid protsessi aspekte, mis määrab ära saagise jaotuse nii kvaliteedilt kui ka kvantiteedilt. Üha enam on suurendatud uurimuste mahtu, mis pööraks tähelepanu erinevate reaktorite arendusele ja testimisele, paremale soojusülekandele ja materjali viibeajale. Vajalikud tingimused kiirpürolüsaatorile on väga kõrge soojusülekanne materjalile, täpselt kontrollitud temperatuur ja kiire aurude jahutamine. Reaktor peaks ka olema lihtsasti opereeritav ning selle tootlikus suurendatav [12].

Märgatav hulk kirjandust, mis annaks ülevaatliku kirjelduse kasutatavast pürolüüsireaktorist, on aga suunatud biomassi pürolüüsile. Kuna „Innovaatiliste ja keskkonnasõbralike põlevkivi või selle saaduste töötlemise tehnoloogiate arendamine“ projekti raames keskendutakse põhiliselt põlevkivi gaasistamisele ja pürolüüsile, kuid samas on alati ka võimalus katseseadmel kasutada pürolüüsitava kütusena biomassi või teostada koospürolüüsi, siis on esitatud võimalikud reaktorite tehnoloogiad nii põlevkivi kui ka biomassi korral.

Järgnevalt mainitud tehnoloogiatel on erinev tehnoloogiline tase ja atraktiivsus turul (Joonis 2.1). Tööstuslikuks kasutamiseks peetakse sobivamateks klassikalise keevkihi või tsirkuleeriva keevkihiga reaktoreid. Keeskihi eelisteks on võrdlemisi lihtne tehnoloogia ja intensiivsem soojus- ja massivahetus. Osakeste lühike reaktoris viibimise aeg ja lendosa kiire eraldumine pärsivad sekundaarsete lagunemisreaktsioonide toimumist ning seetõttu saavutatakse suurem õlisaagis [3].



Joonis 2.1 Mõnede kiirpürolüüsi tehnoloogiate kommertsipotentsiaal [3]



## **2.1 Liikumatu kihiga reaktorid**

Lihtsaid ja töökindlaid liikumatu kihiga reaktoreid kasutatakse juhul, kui materjali osakeste suurus on pürolüüsi korral ühtlane. Pürolüüsi läbiviimiseks juhitakse protsessi soojust väljastpoolt või piiratud hulgal materjali põlemisel reaktoris. Materjal liigub reaktoris vertikaalselt alla, vastassuunas kerkivate kuumade gaasidega. Reaktorid on üldjuhul valmistatud tulekindlatest telliskividest, terasest või betoonist ning on varustatud, kütuse etteande- ja tuhaarastuseseadmega ja gaasiväljundiga. Sellist tüüpi reaktoreid kasutatakse enamjaolt teadustöödeks või energia tootmiseks väikeses koguses. Pika materjali viibeaja tõttu on põhiliseks saaduseks poolkoks või biosüsi. Raskendatud on tõrvade eemaldamine reaktorist [5] [13].

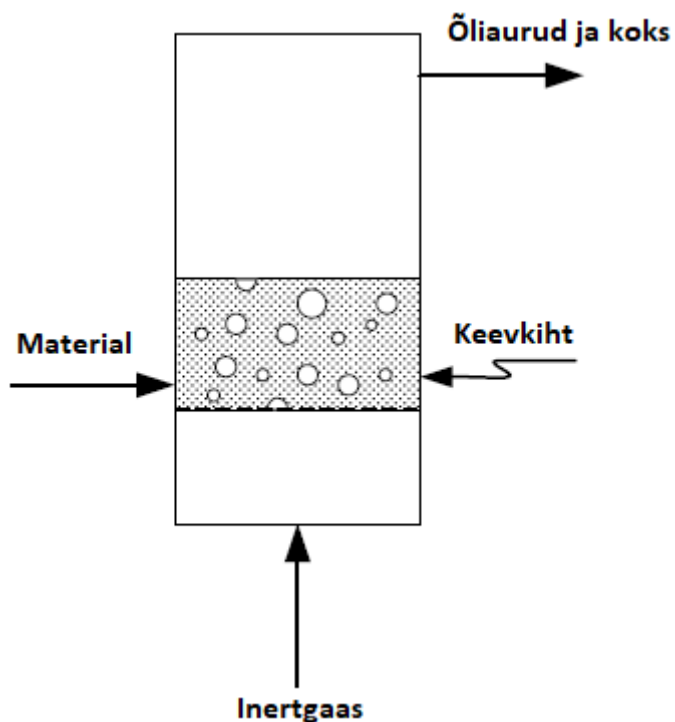
## **2.2 Keevkihtreaktorid**

Keevkihi eripära ja eelised tulenevad tahkete osakeste liikumise poolt tekitatavast intensiivsest massiülekandest. Keevkihtpõletustehnika tööstuslik rakendus on edasi liikunud peamiselt kahes suunas – mulliv ja tsirkuleeriv keevkiht. Eriti intensiivne areng on toimunud suurevõimsuselistes tsirkuleeriva keevkihiga katelde osas. Edasimineku on toetunud suurel määral tööstusseadmetel omandatud kogemustele. Ei saa alahinnata ka nende uurimistulemuste rakenduslikku väärtust, mis on saadud laboratoorsesel ja pooltööstuslikel pilootseadmetel ning keevkihtprotsesse kirjeldavatel matemaatilistel mudelitel [14].

## 2.2.1 Mulliv keevkihtreaktor

Joonis 2.2 on näha mulliv keevkihtpürolüsaatori lihtsustatud skeem. Purustatud materjal juhitakse keevkihti, mida hoitakse mullivana inertgaasi abil (lämmastik, suitsugaasid). Keevkihti moodustavad tahked osakesed on intensiivses kaootilises liikumises, mis annab hea ja ühtlase temperatuuri kontrolli, samuti tagab kõrge soojusülekanne materjali tahketele osakestele. Tahkete ainete viibeaeg on tunduvalt pikem kui pürolüsaatoris oleva gaasi oma. Pürolüüsiks vajalik soojushulk saadakse ettesoojendatud inertgaasist, põletades osa taasinglusesse võetud suitsugaasidest kihis või poolkoksi põletamise teel eraldi kambris ja selle kuumuse ülekandmisel kihti. Kuna koks käitub keevkihis kui õliaurude krakkimise katalüsaator, siis õli saagise maksimeerimiseks on tahkete koksiosakeste eraldamine õliaurudest oluline samm [5] [7].

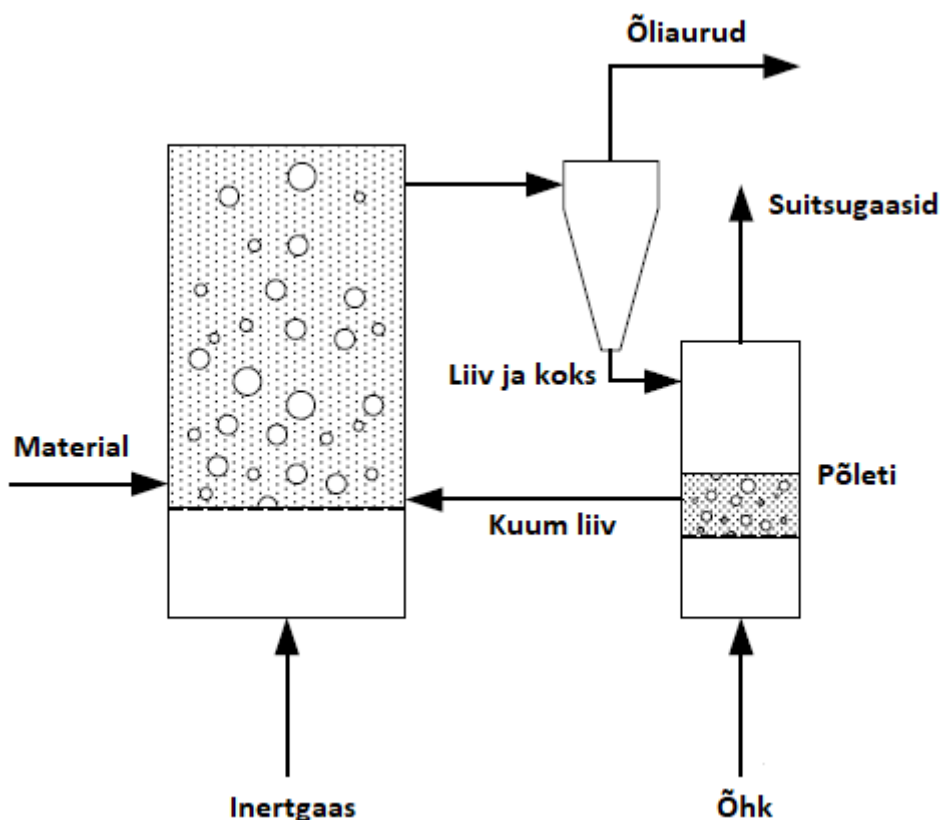
Väikese tuhasusega kütuste põletamisel on keevkihti moodustavaks materjaliks enamasti kvartsiliv, kuid suure mineraalosa sisaldusega kütuste korral ka tuhk [14].



Joonis 2.2 Mulliv keevkihtreaktor [15]

## 2.2.2 Ringlev ehk tsirkuleeriv keevkihtreaktor

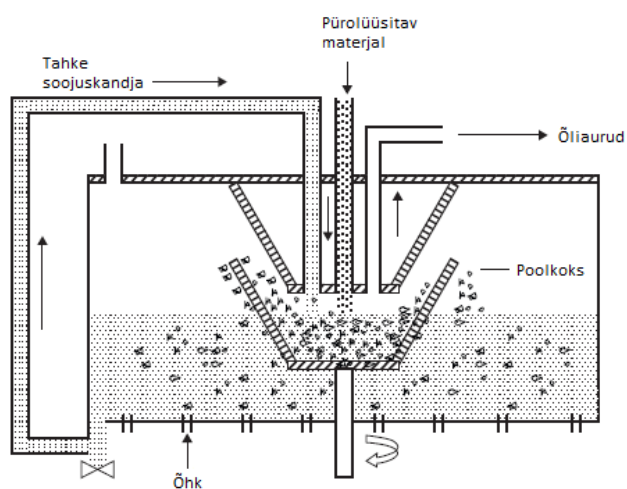
Tsirkuleeriva keevkihi pürolüsaator, nagu on näidatud Joonis 2.3, töötab samal põhimõttel kui mulliv keevkiht, välja arvatud, et keevkiht on tugevalt paisutatud ja tahked ained püütakse kinni tsüklonis ja suunatakse tagasi reaktorisse. Tsirkuleeriva keevkihi puhul on resti läbiva õhu kiirus kaks ja enam korda suurem kui klassikalise keevkihi puhul. Vajalik resti pind aga sama arv kordi väiksem. Tsirkuleeriva keevkihi puhul on gaaside kiirus kihis ja kolde ristlõikes enamiku kütuseosakeste puhul suurem kui teine kriitiline kiirus, osakesed kanduvad kihist välja ja täidavad kogu kolde mahu. See tagab hea temperatuuri reguleerimise ja ühtluse kogu seadme kõrguses. Reaktori pindmine gaasikiirus on tunduvalt suurem võrrelduna mulliva keevkihiga. Suur kiirus koos suurepärase segamisega võimaldab suurt materjali läbilaskevõimet. Gaas ja tahke aine liiguvad reaktoris ülespoole mõningase sisemise tagasijooksuga. Seetõttu on keskmiste materjali osakeste viibeag pikem kui gaasil, kuid erinevus pole nii suur kui mulliv keevkihi reaktoris. Süsteemi eeliseks saab tuua, et reaktorist kaasnev poolkoks on kergesti eraldatav ja põlevatatav välises keevkihis. Väljakantavat poolkoksi saab seejuures põletada eraldiseisvas koldes. Koksi põlemisel eralduv soojus kantakse reaktorisse kihimaterjaliga [14].



Joonis 2.3 Ringlev keevkihtreaktor [15]

## 2.3 Pöörlev koonusreaktor

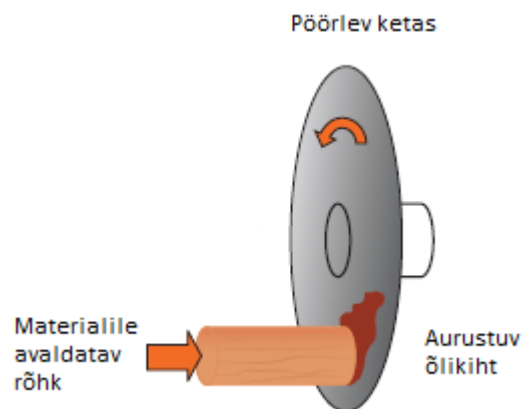
Antud protsessis (Joonis 2.4) suunatakse pürolüüsitava materjali osakesed pöörleva koonuse põhja koos soojuskandja tahkete osakestega (üldjuhul liiv). Koonus käitub kui mehaaniline segaja, mistõttu puudub kandegaasi vajadus, mis omakorda muudab järgnevad (*downstream*) seadmed väiksemaks. Tsentrifugaaljõud surub osakesed vastu kuuma seina ning lisaks spiraalselt ülespoole (koonus pöörleb 360 – 960 pöört/min). Õliaure sisaldav produktgaas väljub läbi avause, poolkoks ja liiv vajuvad üle koonuse ülemise serva keevkihti. Keevkihis toimub koksi põlemine, mis soojendab nii koonust ennast kui ka ringlevat tahket soojuskandjat. Pöörleva koonusreaktori eeliseks on kõrge tahke materjali läbilaskvus ja lühike materjali viibeaeg (0,5s) [5] [7].



Joonis 2.4 Pöörleva koonusega reaktor [5]

## 2.4 Ablatiiv reaktor

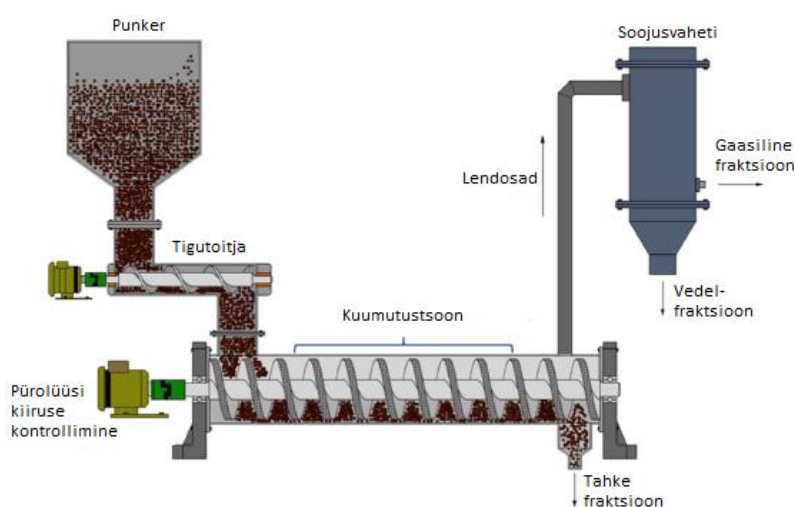
Protsess hõlmab kõrgsurve tekitamist biomassi osakese ja kuuma pöörleva seina vahel (Joonis 2.5), tekitades vahetu soojusülekanne. Pinda kuumutatakse suitsugaasidega, mis saadakse pürolüüsigaasi ja/või järele jääva poolkoksi põletamisega. Seina vastu libisev material jätab maha aurustuva vedelkirmet ja lahkeb pürolüüsi tsoonist. Ablatiivsed reaktorid võimaldavad kasutada palju suurema tükisuurusega materjali (kuni 20 mm), vähendades kulusid materjali purustamiseks. Kitsendavaks asjaoluks käesoleva tehnoloogia puhul on reaktori läbilaskevõime lineaarne sõltuvus pöörleva ketta pindalaga [13].



Joonis 2.5 Ablatiivpürolüüsreaktor [5]

## 2.5 Tigureaktor

Tigureaktorid (Joonis 2.6) on torukujulised reaktorid, kus materjali transporditakse pöörleva kruvi abil. Vajaminevat soojusenergiat saab süsteemi lisada tahke soojuskandja abil (liiv, terasabrsiiv, keraamilised pelletid) või kuumutades reaktori välisseina (näiteks põlemisgaasidega). Kruvi tagab tooraineosakeste mõningase segunemise, parandades pürolüüsi soodustamiseks osakeste ja kuumutatud seina vahelist kontakti. Materjali viibeaega reaktoris reguleeritakse vastavalt teo pöörlemiskiiruse ja inertgaasi (tavaliselt  $N_2$ ) voolukiiruse abil [16].



Joonis 2.6 Augeri ühekruvi reaktor [16]

Tigukonveierid on ka olemas kahe kruviga, mis erinevalt tavapärasest lahendusest soodustavad materjali pidevat segamist/raputamist lihtsa edasitoimetamise asemel, kuna ühe kruvi voolud segavad materjali liikumist teise kruvi voogudes. Lisaks pühivad kahe kruvi voolud pöörlemisel teise kruvi voolu vahelised ruumid, mille tulemuseks on materjalikogumite puhastamine, mis võivad tekkida üksiku kruvivooluga reaktoritel [16].

### 3 KATSESEADME ARVUTUSED

Kütuste pürolüüsi katseseade (

Joonis 4.2) on ettenähtud põlevkivist ja vajadusel ka biokütustest õli tootmise võimaluste uurimiseks. Põlevkiviõli soodsamate tootmisvõimaluste väljaselgitamiseks on antud juhul valitud keevkihttehnoloogia, lähtudes sellest, et keevkihis toimuvad soojus- ja massivahetuse protsessid on oluliselt kiiremad ja efektiivsemad kui seni kasutuses olevate põlevkiviõli tootmise tehnoloogiate puhul. Positiivsete katsetulemuste korral võib saadud tulemusi kasutada keevkihttehnoloogial põhineva suurema ühikvõimsusega, väiksema materjalimahukusega, töökindlama (puuduvad liikuvad osad pürolüüsi tsoonis) ja keskkonnasõbralikuma tööstusliku põlevkiviõli tootmiseseadme väljatöötamiseks ning ehitamiseks. Välja töötamisel olev katseseade on ettenähtud põlevkivi pürolüüsimiseks täiskoormusel kuni 20 kg/h ning põlevkivi niiskussisalduseks on valitud 3%. Katseseadme arvutused on teostatud koos seadme detailse projekteerimisega ning need on vajalikud, et kinnitada seadme vastavust valitud parameetritele ja mõõtmetele.

#### Kuiva põlevkivi kulu arvutuskäik:

$$B_{vesi} = \frac{B \cdot W^t}{100}, \quad (3.1)$$

kus  $B_{vesi}$  - aurustatava vee kogus, kg/h,

$B$  - põlevkivi kulu, kg/h,

$W^t$  - põlevkivi niiskus, %.

$$B_{vesi} = \frac{20 \cdot 3}{100} = 0,6 \text{ kg/h.}$$

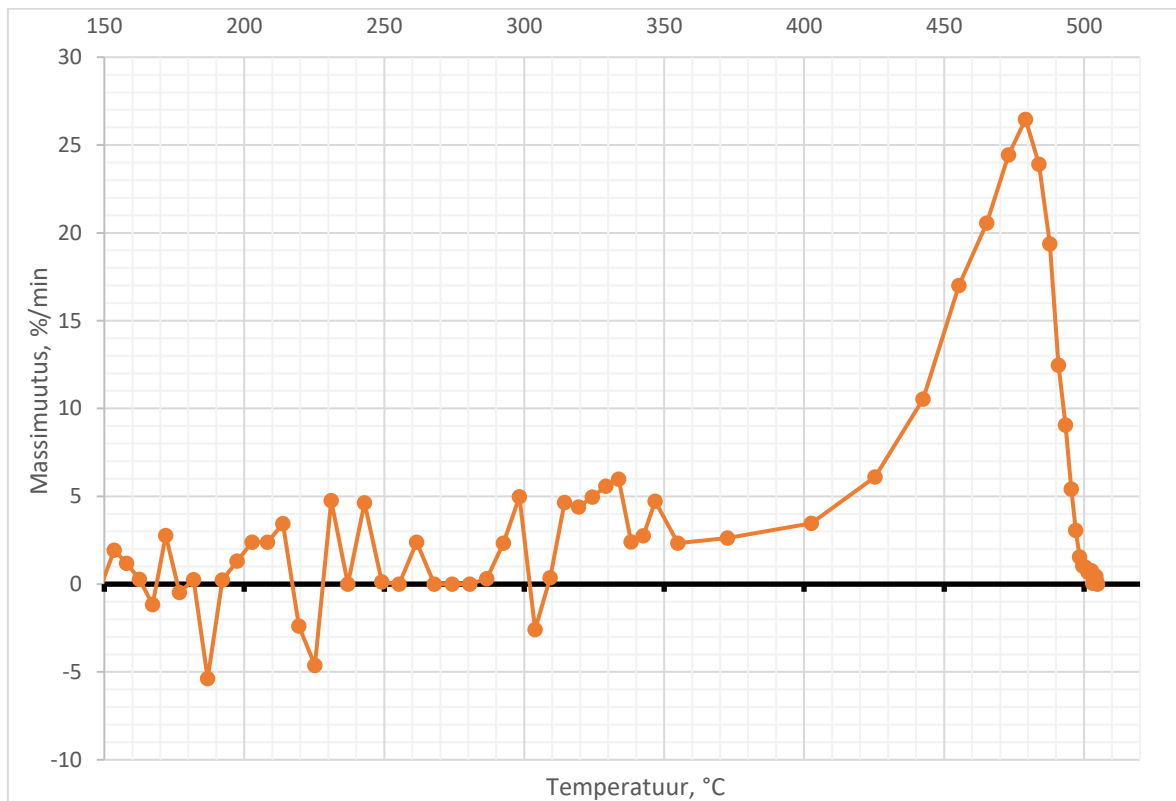
$$B^k = B - B_{vesi}, \quad (3.2)$$

kus  $B^k$  - kuiva põlevkivi kulu, kg/h.

$$B^k = 20 - 0,6 = 19,4 \text{ kg/h.}$$

### 3.1 Põlevkivi ja poolkoksi erisoojused tsoonides

Pürolüüsi lõpptemperatuuriks on valitud antud olukorras 490 °C, kõrgemal temperatuuril hakkavad toimuma juba sekundaarsed protsessid ja õli saagis langeb (Tabel 1.2). Antud arvutustes on võetud aluseks, et põlevkivi lagunemine poolkoksiks algab temperatuurist 300 °C (Joonis 3.1) ja kestab kuni 490 °C. Alloleva graafiku andmed pärinevad termogravimeetrisest analüüsist, mis sai instituudis läbiviidud 13.10.2020.



Joonis 3.1 Massimuutuse kiiruse sõltuvus temperatuurist põlevkivi pürolüüsil

Kirjandusallika [17] põhjal on valitud põlevkivi kerogeeni sisalduseks 27% ja tehtud arvutused vastavatel temperatuuridel kasutades valemit:

$$c_{o,s} = 0,746 + 0,00578 \cdot R + 0,00168 \cdot t, \quad (3.3) [14]$$

kus  $c_{o,s}$  – põlevkivi erisoojus sõltuvalt valitud temperatuurist, kJ/kgK,

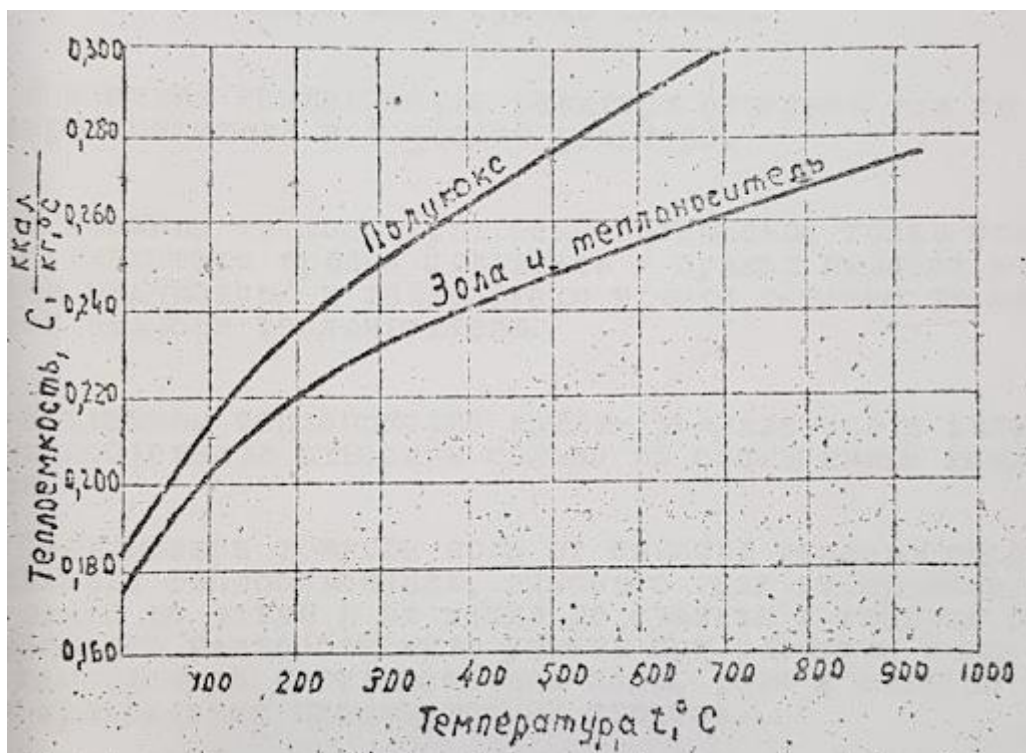
$R$  – põlevkivi orgaanilise osa sisaldus, %.

$$c_{o,s20} = 0,746 + 0,00578 \cdot 27 + 0,00168 \cdot 20 = 0,936 \text{ kJ/kgK.}$$

Ülejäänud erisoojused sõltuvalt vastavatest temperatuuridest esitatud tabelis Tabel 3.1.



Poolkoksi erisoojused  $c_{s,c}$  on võetud graafikult (Joonis 3.2), teisendatud SI-süsteemi ühikutesse ja kantud Tabel 3.1 koos põlevkivi erisoojustega.



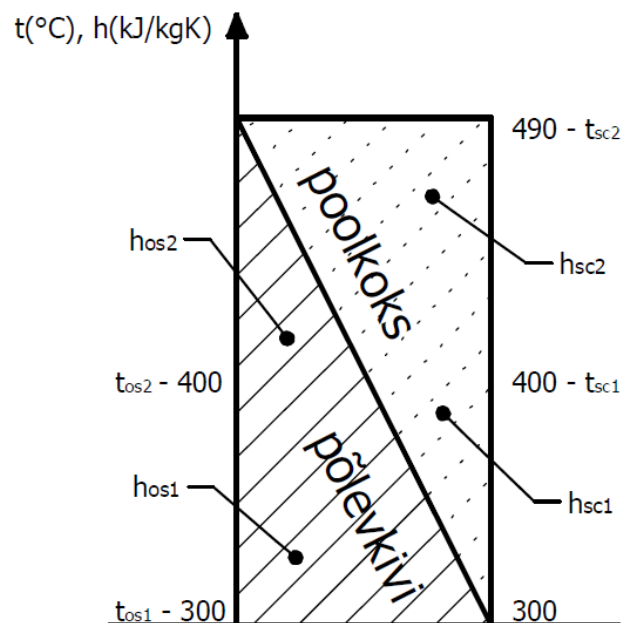
Joonis 3.2 Poolkoksi ja tuha erisoojuse [kcal/kg°C] sõltuvus temperatuurist [°C]: полукокс – poolkoks, зола и теплоноситель – tuhk ja soojuskandja [18]

Tabel 3.1 Põlevkivi ja poolkoksi erisoojused [18]

Температура, °C	Пõlevкиви erisoojus $c_{o,s}$ kJ/kgK	Poolkoksi erisoojus $c_{s,c}$ kJ/kgK	Poolkoksi erisoojus $c_{s,c}$ kcal/kg°C
20	0,936	-	-
300	1,406	1,050	0,251
395	1,566	1,100	0,263
400	1,574	1,105	0,264
405	1,582	1,109	0,265
490	1,725	1,151	0,275

Põlevkivi poolkoksiks lagunemise kirjeldamise keerukuse tõttu on tehtud mõningad lihtsustused:

- poolkoksi kuumutamiseks vajalike soojushulkade arvutustes on kasutatud keskmist poolkoksi teguri  $x = 0,76$ , mis sisuliselt tähendab seda, et kui 1 kg põlevkivi pürolüüs on lõppenud, on järele jäänud 0,76 kg poolkoksi,
- temperatuur 300 kuni ~400 °C on valitud tsooniks (Joonis 3.3), kus põhiliselt toimub põlevkivi kuumutamine ( $h_{o,s1} \approx h_{o,s2}$ ), olemasolev põlevkivi hulk on suurem moodustunud poolkoksi hulgast,
- temperatuur ~400 kuni 490 °C on valitud tsooniks (Joonis 3.3), kus põhiliselt toimub poolkoksi kuumutamine  $h_{s,c1} \approx h_{s,c2}$ , moodustunud poolkoksi hulk on suurem järelejäänud põlevkivi hulgast.



Joonis 3.3 Põlevkivi ja poolkoksi lagunemistsoonide lihtsustatud graafik

### 3.1.1 Tsoonide jaotuse kontrollimine

Kontrolli, kas põlevkivi ja poolkoksi kuumutamine temperatuurilt 300 °C → 490 °C jaotati võimalikult täpselt pooleks temperatuuril ~400 °C, on tehtud võrreldes tsoonide entalpiate erinevust  $\Delta h$ . Arvutustulemustest (Tabel 3.2) nähtub, et temperatuur 400 °C osutus sobilikuks valikuks võrreldes temperatuuridega 395 °C ja 405 °C.

$$h = (c_2 \cdot t_2 - c_1 \cdot t_1), \quad (3.4)$$

kus  $h$  – entalpia, kJ/kg,

$c_1$  – keha oleku I erisoojus, kJ/kgK,

$c_2$  – keha oleku II erisoojus, kJ/kgK,

$t_1$  – keha oleku I erisoojus, °C,

$t_2$  – keha oleku II erisoojus, °C.

Tabel 3.2 Põlevkivi ja poolkoksi entalpiad erinevatel kuumutamistemperatuuridel

Kuumutamistemperatuurid, °C	Entalpia, kJ/kg	Kuumutamistemperatuurid, °C	Entalpia, kJ/kg	$ \Delta h $ , kJ/kg
<b>Põlevkivi</b>				
300→395	196,6	395→490	226,9	30,3
300→400	207,8	400→490	215,8	7,9
300→405	219,1	405→490	204,5	14,6
<b>Poolkoks</b>				
300→395	119,6	395→490	129,1	9,5
300→400	126,8	400→490	120,3	6,5
300→405	134,0	405→490	114,7	19,2

### 3.1.2 Põlevkivi ja poolkoksi kuumutamise kordarvud

Põlevkivi tsoonis 300 °C → 400 °C:

$$Q'_{o.s2} = B^k \cdot (c_{o.s400} \cdot t_{400} - c_{o.s300} \cdot t_{300}), \quad (3.5)$$

$$Q'_{o.s2} = 19,4 \cdot (1,574 \cdot 400 - 1,406 \cdot 300) = 4031,4 \text{ kJ/h} = 1,120 \text{ kW}.$$

Põlevkivi kogu tsoonis 300 °C → 490 °C:

$$Q''_{o.s2} = B^k \cdot (c_{o.s490} \cdot t_{490} - c_{o.s300} \cdot t_{300}), \quad (3.6)$$

$$Q''_{o.s2} = 19,4 \cdot (1,725 \cdot 490 - 1,406 \cdot 300) = 8217,1 \text{ kJ/h} = 2,283 \text{ kW}.$$

Põlevkivi kuumutamise kordarv  $k_{o.s}$ :

$$k_{o.s} = \frac{Q'_{o.s2}}{Q''_{o.s2}}, \quad (3.7)$$

$$k_{o.s} = \frac{1,120}{2,283} = 0,491.$$

Poolkoks tsoonis 400 °C → 490 °C:

$$Q'_{s.c} = B^k \cdot x \cdot (c_{s.c490} \cdot t_{490} - c_{s.c400} \cdot t_{400}), \quad (3.8)$$

$$Q'_{s.c2} = 19,4 \cdot 0,76 \cdot (1,151 \cdot 490 - 1,105 \cdot 400) = 1798,2 \text{ kJ/h} = 0,50 \text{ kW}.$$

Poolkoks kogu tsoonis 300 °C → 490 °C:

$$Q''_{s.c} = B^k \cdot x \cdot (c_{s.c490} \cdot t_{490} - c_{s.c300} \cdot t_{300}), \quad (3.9)$$

$$Q''_{s.c2} = 19,4 \cdot 0,76 \cdot (1,151 \cdot 490 - 1,050 \cdot 300) = 3667,4 \text{ kJ/h} = 1,019 \text{ kW}.$$

Poolkoksi kuumutamise kordarv  $k_{s.c}$ :

$$k_{s.c} = \frac{Q'_{s.c}}{Q''_{s.c}}, \quad (3.10)$$

$$k_{s.c} = \frac{0,50}{1,019} = 0,490.$$

Poolkoksi kuumutamise kordarv  $k'_{s.c}$ :

$$k'_{s.c} = x \cdot k_{s.c}, \quad (3.11)$$

$$k'_{s.c} = 0,76 \cdot 0,490 = 0,373.$$

### 3.1.3 Põlevkivi lagunemise ja õli aurustamise erisoojused

Soojushulkade, mis kulub põlevkivi lagundamiseks ja protsessis tekkinud õli aurustamiseks, arvutamisel on kasutatud andmeid, mis on pärit kirjandusallikast [17]. Allikas on välja toodud, et 1 tonni põlevkiviõli saamiseks kulub põlevkivi lagundamiseks umbes 850,3 MJ ja õli aurustamiseks umbes 334,9 MJ soojusenergiat. Arvestades allikas välja toodud põlevkivi niiskust 11,38 % ja märja põlevkivi alumist kütteväärtust 8,17 MJ/kg on kasutatud põlevkivi ja õlisaagise vahelist seost ((3.12), et arvutada välja protsessi õlisaagis.

$$T = 1,78 \cdot Q_a^t \cdot \frac{100}{(100 - W_1^1)}, \quad (3.12) [1]$$

kus  $T$  - õlisaagis, %,

$Q_a^t$  - märja põlevkivi tarbimisaine alumine kütteväärtus, MJ/kg,

$W_1^1$  - niiskussisaldus, %.

$$T = 1,78 \cdot 8,17 \cdot \frac{100}{(100 - 11,38)} = 16,41 \%$$

1000 kg põlevkivist sai seljuhul 164,1 kg põlevkiviõli, mis annab kordarvuks:

$$k_1 = \frac{1000}{164,1} = 6,09 \quad (3.13)$$

kus  $k_1$  - põlevkivi ja põlevkiviõli kordarv

Leitud kordarvu abil on leitud põlevkivi lagundamise ja protsessis tekkinud õlide aurustamiseks kuluvad soojushulgad, mida läheb tarvis hilisemates arvutustes:

$$q_{lagund} = \frac{850,3}{6,09} = 139,5 \text{ kJ/kg.} \quad (3.14)$$

$$q_{õli} = \frac{334,9}{6,09} = 55,0 \text{ kJ/kg.} \quad (3.15)$$

kus  $q_{lagund}$  - põlevkivi lagundamiseks kuluv soojushulk, kJ/kg,

$q_{õli}$  - protsessil tekkinud õli aurustamiseks kuluv soojushulk, kJ/kg.

Tabel 3.3 Põlevkivi retortimise arvutuste lähteandmed peale esialgseid arvutusi

Parameeter	Ühik	Väärtus
Algtemperatuur, $t_{20}$	°C	20
Põlevkivi lagunemise alguse temperatuur, $t_{300}$	°C	300
Tsoonide ülemineku temperatuur, $t_{400}$	°C	400
Pürolüüsi lõpptemperatuur, $t_{490}$	°C	490
Kuiva põlevkivi kulu, $B$	kg/h	20
Põlevkivi niiskus, $W^t$	%	3
Põlevkivi orgaanilise osa sisaldus, $R$	27	%
Põlevkivi erisoojus temperatuuril 200 °C, $c_{o.s20}$	kJ/kgK	0,936
Põlevkivi erisoojus temperatuuril 300 °C, $c_{o.s300}$	kJ/kgK	1,406
Põlevkivi erisoojus temperatuuril 400 °C, $c_{o.s400}$	kJ/kgK	1,574
Põlevkivi erisoojus temperatuuril 490 °C, $c_{o.s490}$	kJ/kgK	1,725
Poolkoksi erisoojus temperatuuril 300 °C, $c_{s.c300}$	kJ/kgK	1,050
Poolkoksi erisoojus temperatuuril 400 °C, $c_{s.c400}$	kJ/kgK	1,105
Poolkoksi erisoojus temperatuuril 490 °C, $c_{s.c490}$	kJ/kgK	1,151
Põlevkivi lagundamise erikulu, kJ/kg, $q_{lagund}$	kJ/kg	139,5
Protsessil tekkinud õli aurustamise erikulu, $q_{õli}$	kJ/kg	55,0
Põlevkivi kuumutamise kordarv, $k_{o.s}$		0,491
Poolkoksi kuumutamise kordarv, $k'_{s.c}$		0,373

## 3.2 Põlevkivi retortimiseks vajalik soojushulk

Tabel 3.4 Parameetrite tabel 1

Parameeter	Ühik	Väärtus	Allikas
Vee entalpia temperatuuril 20 °C, $h_{vesi1}$	kJ/kg	84,1	[19]
Vee entalpia temperatuuril 490 °C, $h_{vesi2}$	kJ/kg	3464,8	[19]
Välisjahtumiskadu, $q_{välis}$	%	5	valitud

### Põlevkivi kuivatamiseks ja vee aurustamiseks kuluva soojushulga arvutuskäik

$$Q_{vesi} = B_{vesi}(h_{vesi2} - h_{vesi1}), \quad (3.16)$$

kus  $Q_{vesi}$  - ajaühikus vee aurustamiseks temperatuurilt  $t_1 \rightarrow t_4$  kuluv soojushulk, MJ/h.

$$Q_{vesi} = 0,6(3464,8 - 84,1) = 2028,4 \text{ kJ/h} = 0,563 \text{ kW}.$$

### Retortimiseks vajaliku soojushulga arvutuste valemid

$$Q_{o.s1} = B^k(t_{300} \cdot c_{o.s300} - t_{20} \cdot c_{o.s20}), \quad (3.17)$$

$$Q_{o.s2} = B^k \cdot k_{o.s}(t_{490} \cdot c_{o.s490} - t_2 \cdot c_{o.s300}), \quad (3.18)$$

$$Q_{s.c} = B^k \cdot k'_{s.c}(t_{490} \cdot c_{s.c490} - t_2 \cdot c_{s.c300}), \quad (3.19)$$

$$Q_{lagund} = B^k \cdot q_{lagund}, \quad (3.20)$$

$$Q_{õli} = B^k \cdot q_{õli}, \quad (3.21)$$

$$Q_{pürolüüs} = Q_{vesi} + Q_{o.s1} + Q_{o.s2} + Q_{s.c} + Q_{lagund} + Q_{õli}, \quad (3.22)$$

$$Q_{\Sigma} = \frac{Q_{pürolüüs} + Q_{pürolüüs} \cdot q_{välis}}{1000}, \quad (3.23)$$

$$q_{pürolüüs} = \frac{Q_{\Sigma}}{B}, \quad (3.24)$$

kus  $Q_{o.s.1}$  – ajaühikus põlevkivi kuumutamiseks temperatuurilt  $t_{20} \rightarrow t_{300}$   
kulunud soojushulk, kW,

$Q_{o.s.2}$  – ajaühikus põlevkivi kuumutamiseks temperatuurilt  $t_{300} \rightarrow t_{490}$   
kulunud soojushulk, kW,

$Q_{s.c}$  – ajaühikus poolkoksi kuumutamiseks temperatuurilt  $t_{300} \rightarrow t_{490}$   
kulunud soojushulk, kW,

$Q_{lagund}$  – ajaühikus põlevkivi lagundamiseks kuluv soojushulk, kW,

$Q_{\text{õli}}$  – ajaühikus pürolüüsi protsessil tekkinud õli aurustamiseks  
kuluv soojushulk, kW,

$Q_{\text{pürolüüs}}$  – ajaühikus pürolüüsiks kuluv soojushulk, kW,

$Q_{\Sigma}$  – ajaühikus retortimiseks kuluv kogu soojushulk koos  
välisjahtumiskadudega, kW,

$q_{\text{pürolüüs}}$  – soojuse erikulu põlevkivi retortimiseks, MJ/kg.

$Q_{o.s.1} = 19,4 \cdot (300 \cdot 1,406 - 20 \cdot 0,936) = 7820,2 \text{ kJ/h} = 2,127 \text{ kW},$
$Q_{o.s.2} = 19,4 \cdot 0,491(490 \cdot 1,725 - 300 \cdot 1,406) = 4031,4 \text{ kJ/h} = 1,120 \text{ kW},$
$Q_{s.c} = 19,4 \cdot 0,373(490 \cdot 1,151 - 300 \cdot 1,050) = 1798,2 \text{ kJ/h} = 0,50 \text{ kW},$
$Q_{lagund} = 19,4 \cdot 139,5 = 2707,0 \text{ kJ/h} = 0,752 \text{ kW},$
$Q_{\text{õli}} = 19,4 \cdot 55,0 = 1066,2 \text{ kJ/h} = 0,296 \text{ kW},$
$Q_{\text{pürolüüs}} = 0,563 + 2,127 + 1,120 + 0,50 + 0,752 + 0,296 = 19451,5 \text{ kJ/h} = 5,403 \text{ kW},$
$Q_{\Sigma} = 5,403 + 5,403 \cdot 0,05 = 5,673 \text{ kW} = 20,424 \text{ MJ/h},$
$q_{\text{pürolüüs}} = \frac{20,424}{20} = 1,021 \text{ MJ/kg}.$



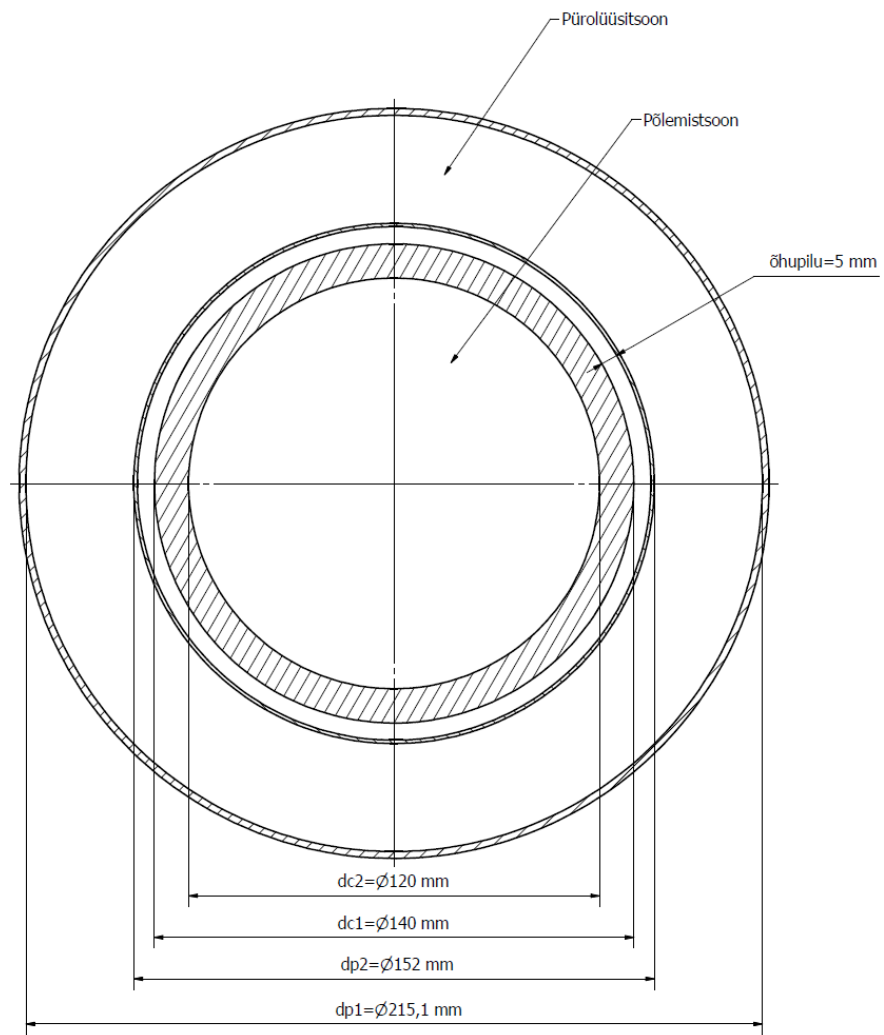
Põlevkivi retortimiseks kuluva soojuse erikulu  $\sim 1$  MJ/kg on heaks indikatsiooniks, et arvutuskäik on läinud õiges suunas. Leitud põlevkivi retortimiseks kuluva soojushulga alusel sai hinnata, mis on täiendav vajaminev soojushulk kolde ja eelsoojendatud lämmastiku kaudu.

### 3.3 Pürolüsaatori mõõtmed

Põlevkivi pürolüsaator kujutab endast ringkanalit, mille keskosas on gaasikäik (põlemistsoon), mida läbivad keevkihtkoldest väljuvad põlevkivi kuumad põlemisproduktid. Keevkihtkoldes põletatakse põlevkivi, selleks et kuumade põlemisproduktidega kuumutada pürolüsaatori välimises osas (pürolüüsitsoon) põlevkivi (Joonis 3.4).

Tabel 3.5 Pürolüsaatori ja keraamilise toru mõõtmed

Parameeter	Ühik	Väärtus
Pürolüsaatori kõrgus, $H_p$	mm	2486
Pürolüsaatori välimise terastoru siseläbimõõt, $d_{p1}$	mm	215,1
Pürolüsaatori sisemise terastoru välisläbimõõt, $d_{p2}$	mm	152
Keraamilise toru välisläbimõõt, $d_{c1}$	mm	140
Keraamilise toru siseläbimõõt, $d_{c2}$	mm	120
Keraamilise toru seinapaksus, $\delta_c$	mm	10
Õhupilu pürolüsaatori sisemise toru ja keraamilise toru vahel, $\delta_0$	mm	5



Joonis 3.4 Pürolüsaatori ristlõige

### Pürolüsaatori arvestuliku pindala arvutuskäik

$$F_r = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{p1}^2 - d_{p2}^2), \quad (3.25)$$

$$F_{ps} = \pi \cdot d_{p2} \cdot H_p, \quad (3.26)$$

$$F_{kv} = \pi \cdot d_{k1} \cdot H_p, \quad (3.27)$$

$$F_{ks} = \pi \cdot d_{k2} \cdot H_p, \quad (3.28)$$

$$F_p = \frac{(F_{ps} + F_{ks})}{2}, \quad (3.29)$$

kus

$F_r$  – pürolüsaatori resti pindala, m<sup>2</sup>,

$F_{ps}$  – pürolüsaatori sisemise terastoru pindala, m<sup>2</sup>,

$F_{kv}$  – keraamilise toru välimine pindala, m<sup>2</sup>,

$F_{ks}$  – keraamilise toru sisemine pindala, m<sup>2</sup>,

$F_p$  – arvestuslik keskmine soojusvahetuspind, m<sup>2</sup>.

$$F_r = \frac{\pi}{4} \cdot (0,2151^2 - 0,152^2) = 0,0182 \text{ m}^2,$$

$$F_{ps} = \pi \cdot 0,152 \cdot 2,486 = 1,1871 \text{ m}^2,$$

$$F_{kv} = \pi \cdot 0,14 \cdot 2,486 = 1,0934 \text{ m}^2,$$

$$F_{ks} = \pi \cdot 0,12 \cdot 2,486 = 0,9372 \text{ m}^2,$$

$$F_p = \frac{(1,1871 + 0,9372)}{2} = 1,0622 \text{ m}^2.$$

### 3.4 Reaktorisse antav täiendav soojushulk

Tabel 3.6 Inertgaasi parameetrid

Parameeter	Ühik	Väärtus	Allikas
Eelsoojendatud lämmastiku temperatuur, $t_{N_2}$	°C	600	valitud
Lämmastiku erisoojus temperatuuril 600 °C, $c_{N_2}$	kJ/kgK	1,128	[20]
Lämmastiku tihedus temperatuuril 600 °C, $\rho_{N_2}$	kg/m <sup>3</sup>	0,392	[20]

Pürolüsaatorisse antava lämmastiku kiirus kihis on valitud praktiliste kogemuste alusel. Lämmastikku võiks ka võimalusel kõrgemale temperatuurile eelsoojendada, et kolde kaudu vähem soojust läbi juhtida, kuid kasutusel oleva eelsoojendi (Joonis 3.5) maksimaalne teadaolev temperatuur on 650 °C ja ohutuse huvides on sellest madalam temperatuur valitud.



Joonis 3.5 Lämmastiku eelsoojendi

**Eelsoojendatud lämmastikuga pürolüsaatorisse antava soojushulga arvutuskäik**

$$V_{N_2} = w_{N_2} \cdot 3600 \cdot F_{T,r} \quad (3.30)$$

$$Q_{N_2} = V_{N_2} \cdot c_p \cdot \rho_{N_2} \cdot t_{N_2,r} \quad (3.31)$$

$$Q_{kolle} = Q_{\Sigma} - Q_{N_2}, \quad (3.32)$$

kus  $V_{N_2}$  – lämmastiku kogus, m<sup>3</sup>/h,

$w_{N_2}$  – lämmastiku kiirus, m/s,

$Q_{N_2}$  – ajaühikus lämmastikuga pürolüsaatorisse antav soojushulk, MJ/h,

$Q_{kolle}$  – ajaühikus soojushulk, mis tuleb koldest pürolüsaatorisse anda, MJ/h.

Arvutusnäide kui  $w_{N_2} = 0,4$  m/s:

$$V_{N_2} = 0,4 \cdot 3600 \cdot 0,0182 = 26,198 \text{ m}^3/\text{h},$$

$$Q_{N_2} = 26,198 \cdot 1,128 \cdot 0,392 \cdot 600 = 6953,1 \text{ kJ/h} = 1,931 \text{ kW},$$

$$Q_{kolle} = 5,673 - 1,931 = 3,742 \text{ kW}.$$

Tabel 3.7 Soojushulgad erinevatel gaasi kiirustel

Jrk nr	Gaasi kiirus $w$ , m/s	Gaasi kogus $V_{N_2}$ , m <sup>3</sup> /h	$Q_{N_2}$ , kW	$Q_{kolle}$ , kW
1	0,30	19,648	1,449	4,225
2	0,35	22,923	1,690	3,983
3	0,40	26,198	1,931	3,742
4	0,45	29,473	2,173	3,501
5	0,50	32,747	2,414	3,259

### 3.5 Pürolüsaatori soojusbilanss

Tabel 3.8 Soojusbilansi kontrollarvutuste parameetrid

Parameeter	Ühik	Väärtus	Allikas
Pürolüsaatori gaaside temperatuur, $t_p$	°C	490	
Pürolüsaatori gaaside temperatuur, $T_p$	K	763	
Pürolüsaatorisse antav täiendab soojushulk, $Q_{kolle}$	MJ/h	13,471	
Absoluutselt musta keha kiirgustegur, $\sigma_0$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	$5,67 \cdot 10^{-8}$	[21]
Keraamilise toru keskmine soojusjuhtivustegur, $\lambda_k$	W/mK	0,8141	[20]
Õhu keskmine soojusjuhtivustegur, $\lambda_{\delta}$	W/mK	0,066291	[20]
Keraamilise toru seinapaksus, $\delta_k$	m	0,01	
Õhupilu pürolüsaatori sisemise toru ja keraamilise toru vahel, $\delta_{\delta}$	m	0,005	
Arvestuslik keskmine soojusvahetuspind, $F_{ps}$	m <sup>2</sup>	1,1871	
Metalltoru arvestuslik pindala, $F_p$	m <sup>2</sup>	1,0622	
Keraamilise toru välimine pindala, $F_{kv}$	m <sup>2</sup>	1,0934	
Keraamilise toru välimine pindala, $F_{ks}$	m <sup>2</sup>	1,0622	
Pürolüsaatori poolse keskkonna ekvivalentne kiirgustegur, $\varepsilon_p$		0,9	[14]
Kolde poolse keskkonna ekvivalentne kiirgustegur, $\varepsilon_k$		0,6	[14]

## Kontrollarvutusteks kasutatavad valemid

$$Q_{kolle} = k_p \cdot (t_{kolle} - t_p) \cdot F_p, \quad (3.33)$$

$$k_p = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_k} + \frac{\delta_k}{\lambda_c} + \frac{\delta_{\delta}}{\lambda_{\delta}} + \frac{1}{\alpha_p}\right)}, \quad (3.34)$$

$$\alpha_p = \frac{\sigma_0 \cdot \varepsilon_p \cdot (T_{ps}^4 - T_p^4)}{(T_{ps} - T_p)}, \quad (3.35)$$

$$\alpha_k = \frac{\sigma_0 \cdot \varepsilon_k \cdot (T_{kv}^4 - T_{ks}^4)}{(T_{kv} - T_{ks})}, \quad (3.36)$$

$$t_{ps} = t_p + \frac{Q_{kolle}}{(\alpha_p \cdot F_{ps})}, \quad (3.37)$$

$$t_{kv} = t_{ps} + \frac{Q_{kolle} \cdot \delta_{\delta}}{(\lambda_{\delta} \cdot F_{kv})}, \quad (3.38)$$

$$t_{ks} = t_{kv} + \frac{Q_{kolle} \cdot \delta_c}{(\lambda_c \cdot F_{ks})}, \quad (3.39)$$

$$t_{kolle} = t_{ks} + \frac{Q_{kolle}}{(\alpha_k \cdot F_{ks})}, \quad (3.40)$$

kus  $k_p$  – pürolüsaatori soojusläbikandetegur, W/m<sup>2</sup>K,

$t_{kolle}$  – koldegaaside temperatuur, °C,

$\alpha_k$  – koldegaaside poolne kiirgus soojusülekangetegur, W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>,

$\alpha_p$  – pürolüsaatori poolne kiirgus soojusülekangetegur, W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>,

$T_{ps}$  – pürolüsaatori sisemise metalltoru pinnatemperatuur, K,

$T_{kv}$  – koldegaaside temperatuur, K,

$T_{ks}$  – keraamilise toru sisepinna temperatuur, K.

Kontrollarvutusteks on valitud Tabel 3.7 lämmastiku pürolüsaatorisse antavaks soojushulgaks  $Q_{N_2} = 1,931 \text{ kW}$  (gaasi kiirus  $0,4 \text{ m/s}$ ), millest tulenevalt pürolüsaatorisse antav täiendav soojushulk  $Q_{kolle} = 3,742 \text{ kW} = 3741,9 \text{ W}$ .

### Pürolüsaatori sisemise terastoru pinna temperatuuri arvutamine

Valem (3.37) teisendatud kujule:

$$t_{ps} - t_p = \frac{Q_{kolle}}{\alpha_p \cdot F_{ps}}. \quad (3.41)$$

Tehtud asendusega  $t_{ps} - t_p = \Delta T_1$  on arvatud valemiga (3.35) pürolüsaatori poole kiirus soojusülekannekoefitsiendi  $\alpha_p$ . Leitud  $\alpha_p$  väärtus on viidud valemisse (3.41) ja kontrollitud, kas selle järgi leitud  $\Delta T_1$  väärtus vastab valitud suurusele. Juhul kui leitud  $\Delta T_1$  ei lange kokku valitud suurusega, tuleb  $\Delta T_1$  väärtust suurendada 1 Kelvini võrra kuni kokkulangevus on saavutatud.

Antud arvutusnäite korral on korduva valimise tulemusena (L3.5.1) saadud  $\Delta T_1 = \sim 33 \text{ K}$ . Sel juhul on valemiga (3.35) arvatud soojusülekannekoefitsient:

$$\alpha_p = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9 \cdot (796^4 - 763^4)}{(796 - 763)} = 96,723 \text{ W/m}^2\text{K}^4,$$

Arvatud  $\Delta T_1 = 32,59 \text{ K}$  ja valitud  $\Delta T_1 = 33 \text{ K}$  ligikaudse võrdsuse tõttu saame leida pürolüsaatori sisemise metalltoru pinna temperatuuri:

$$t_{ps} = 490 + 33 = 523 \text{ }^\circ\text{C}.$$

### Keraamilise toru välis- ja sisepinna temperatuuride arvutamine

Pürolüsaatori sisemise roostevaba terastoru (EN. 14401) välisseina temperatuuri on võetud võrdseks selle toru sisepinna temperatuuriga, kuna toru sein on õhukene (seinapaksus  $1 \text{ mm}$ ) ja metalli soojusjuhtivus on väga väike.

Valem (3.38) teisendatud kujule:

$$\lambda'_{\delta} = \frac{Q_{kolle} \cdot \delta_{\delta}}{t_{kv} - t_{ps} \cdot F_{kv}}, \quad (3.42)$$

kus  $\lambda'_{\delta}$  – arvutuslik keskmine õhupilu soojusjuhtivustegur,  $\text{W/mK}$ .



Tehtud asendusega  $t_{kv} - t_{ps} = \Delta T_2$  on valitud  $\Delta T_2$  väärtust sammuga 1 Kelvin kuni (L3.5.2), kuni  $\lambda'_0 \approx \lambda_0$ .

$\Delta T_2 = 258$  K korral tuleb keskmiseks arvutuslikuks soojusjuhtivusteguriks:

$$\lambda'_0 = \frac{3736,1 \cdot 0,005}{(1054 - 796) \cdot 1,0934} = 0,06632 \text{ W/mK},$$

ning keraamilise toru välispinna temperatuur sellest tulenevalt  $t_{kv} = 523 + 258 = 781$  °C.

Keraamilise toru sisepinna arvutustel on käitunud analoogselt välispinna omaga: avaldatud valemist (3.39) muutuja  $\lambda_c$  ja korduvalt sisestatud valemisse  $\Delta T_3 = t_{ks} - t_{kv}$  väärtust, kuni on kokkulangevus saavutatud allikast [20] pärit keraamilise toru soojusjuhtivusteguriga. Lisast (L3.5.3) nähtub, et kokkulangevus toimub  $\Delta T_3 = 49$  K korral. Tulemuseks keraamilise toru välispinna temperatuur  $t_{ks} = 781 + 49 = 830$  °C

### Kolde temperatuuri arvutamine

Valem (3.40) teisendatud kujule:

$$t_{kolle} - t_{ks} = \frac{Q_{kolle}}{\alpha_k \cdot F_{ks}}. \quad (3.43)$$

Tehtud asendusega  $t_{kolle} - t_{ks} = \Delta T_4$  on arvutatud valemiga (3.36) pürolüsaatori poolse kiirgus soojusülekande teguri  $\alpha_k$ . Leitud  $\alpha_k$  väärtuse on viidud valemisse (3.43) ja kontrollitud, kas selle järgi leitud  $\Delta T_4$  väärtus vastab valitud suurusele. Juhul kui leitud  $\Delta T_4$  ei lange kokku valitud suurusega, tuleb  $\Delta T_4$  väärtust suurendada 1 Kelvini võrra kuni kokkulangevus on saavutatud.

Korduva valimise tulemusena (L3.5.4) on saadud  $\Delta T_4 \approx 18$  K. Sel juhul on valemiga (3.36) arvutatud soojusülekande tegur:

$$\alpha_k = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9 \cdot (1121^4 - 1103^4)}{(1121 - 1103)} = 187,127 \text{ W/m}^2\text{K}^4,$$

Arvutatud  $\Delta T_4 = 18,36$  K ja valitud  $\Delta T_4 = 18$  K ligikaudse võrdsuse tõttu saab leida pürolüsaatori sisemise metalltoru pinna temperatuuri:

$$t_{kolle} = 830 + 18 = 848 \text{ °C}.$$

### Soojusbilansi kontrollarvutus

Pürolüsaatori soojuslähikandeteguri on arvatud ülalpool leitud parameetrite ja pürolüsaatori mõõtmete alusel valemiga (3.34):

$$k_p = \frac{1}{\left(\frac{1}{187,127} + \frac{0,01}{0,81483} + \frac{0,005}{0,06632} + \frac{1}{96,723}\right)} = 9,68 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q_{kolle} = 9,68 \cdot (848 - 490) \cdot 1,0622 = 3679,5 \text{ W} = 3,680 \text{ kW}$$

Koldesse juurde antava soojushulga 3,742 kW ja kontrollarvutustes saadava 3,680 kW erinevuseks tuleb 0,062 kW, mis teeb veaprotsendiks 1,68 %. Arvestades, et arvutused on tehtud täiskoormusel töötavale seadmele ning muid olulisi parameetreid ei ole optimeeritud, et paremat tulemust saada, võib teostatud arvutusi lugeda piisavalt täpseks.

Kontrollarvutuste põhjal võib järeldada, et soojusülekanDED, mis on vajalikud seadme täiskoormusel töötamiseks, on teoreetiliselt saavutatavad.

## 4 KATSESEADME PROJEKTEERIMINE

Projekteerimise lähtepunktiks oli inseneri Ants Martinsi poolt käsitsi koostatud joonised katseseadme detailidest ja koostudest. Eesmärk oli luua millimeetripaberile tehtud eskiisjoonistest 3D keskkonnas mudel, mille alusel valmistada 2D tootmisjoonised. Digitaliseeritud jooniste abil sai Energiatehnoloogia instituut teha päringu seadme detailide ja keeviskoostude valmistamiseks, kuna detailide lõikamine ja sellele järgnev võimalik järeltöötlus käsitsi tehtud jooniste põhjal on tänapäeval ebaotstarbekas. Joonised digitaalselt kujul annavad mugava ja täpse ülevaate seadme gabariitidest ja teistest mõõduliselt parameetritest, mida kasutada referentsina tulevaste katseseadmete projekteerimisel.

Modelleerimine ja jooniste koostamine on tehtud tarkvaras Autodesk Inventor Profesional 2019 ja algas juuni 2019. Seadmete koostamise järjekorra seadis paika koostatud jooniste nimekiri (L4.1), kus on näidatud nende hierarhiline paigutuvus ning millistes koostudes on korduvkasutatud detailid. Korduvate detailide kasutamisel säästab küll jooniste arvult, sest vaja on teha ainult üks joonis antud detailist, kuid seljuhul on tähtis jälgida, et antud detaili joonise kirjanurka saaks ka märgitud kõikide koostujooniste number, kus detaili kasutatakse. Oluline on seda jälgida, sest Autodesk Inventoris ei toimu see automaatselt, mistõttu on alati enne jooniste saatmist valmistajale oluline üle vaadata kõikide jooniste peanumbrid (*parent drawing*). Jooniste nimekirjast on näha, et viimased joonised said saadetud 06.08.2020. Unikaalsete jooniste arv projekti lõpuks oli 208. Materjali tabel (L4.2) sai koostatud, et ülevaatlikult näha:

- millistest keeviskoostus olevatest detailidest tuleb joonised valmistada,
- detailidele valitud materjali ning kontrollida, kas see vastab joonise kirjasnurgas oleva materjaliga,
- detailidele gabariitmõõtmeid ning kontrollida, kas see vastab joonise kirjasnurgas olevate mõõtmetega,
- detailide koguseid keeviskoostus,
- kas kasutusel olevatele torudele vastab standardmõõde ehk kas valmistajal on võimalik hankida toru standardmõõtme ja pikkuse järgi.

Valmistamisega (välja arvatud tuhaeraldajad) ja seadmete monteerimisega tegeles Flow Service OÜ, kellega sai ka 02.07.2020 koosolek peetud, et arutada seadmete omavahelisi ühendusi ja keerulisemate detailide valmistusviise. Seadmete kohapealne monteerimine sujus valmistaja/monteerija poolt antud tagasiside põhjal kiirelt ja plaanipäraselt ning monteerimisel tehtud eksimused olid marginaalsed, mistõttu ei kajastada neid lõputöös.

Katseseadme projekteerimisel on lähtunud nendest üldisematest põhimõtetest:

- mõelda töökindluse/hoolduse peale,
- mõelda valmistamise maksumuse peale ja seda optimeerida,
- võimalikult paljude jooniste taaskasutamine erinevates koostudes,
- ostukomponentide otstarbekas valik,
- arvestada keevisõmbluste jaoks vajaminevate varudega ja nende teostamise ligipäätavusele,
- pikad keevitused on kallimad kui poltliited,
- ei ole mõtet projekteerida liiga täpselt istuvat mudelit, kuna see tõstab tootmise hinda ja suurendab eksimise võimalust,
- igasuguste muudatuste tegemine on kohapeal on kallim, kui töökojas.

## 4.1 Valmistusmaterjal

Katseseadme projekteerimisel on kaheks põhiliselt kasutatavaks materjaliks EN 1.4301 ja EN 1.4401 (Euroopa standardnimetus), USA standarditele vastavalt AISI 304 ja AISI 316. Kasutatavad materjalid on lisatud nikli tõttu austeniitse struktuuriga, mis annab projekteeritavate seadmete puhul järgnevad omadused:

- väga head omadused madalatel temperatuuridel,
- head omadused kõrgetel temperatuuridel,
- korrosioonikindluse normaalsetes ja kergelt agressiivsetes oludes,
- väga hea keevitavuse,
- hea sitkuse ja töödeldavuse.

Tabel 4.1 EN 1.4301 ja EN 1.4401 keemiline koostis [22]

	EN 1.4301	EN 1.4401
Keemiline element	Elementide sisaldus, %	
Süsinik (C)	≤ 0,06	≤ 0,03
Räni (Si)	≤ 1,00	≤ 1,00
Mangaan (Mn)	≤ 2,00	≤ 2,00
Kroom (Cr)	17,0 – 19,0	16,5 – 18,5
Molübdeen (Mb)	–	2,00 – 2,50
Nikkel (Ni)	11,0 – 13,0	10,0 – 13,0

Molübdeeni sisaldus EN 1.4401 margis annab sellele parema korrosioonikindluse võrreldes EN 1.4301, kuid vastukaaluks muudab ka kallimaks (umbes 25%). Seetõttu otsustati ainult toru- ja nelikantprofiilide materjaliks valida EN 1.4401, kuna neil on pikemaajalisem ja otsesem kontakt kõrgtemperatuurse gaasilise keskkonnaga. Ainukese erandina võib välja tuua ühe valmistajapoolsest eksimusest, nimelt tuhaeraldajad tehti konstruktsiooniterasest S355, nii-öelda mustast terasest, kuigi joonistele sai märgitud materialiks EN 1.4301.



Joonis 4.1 Mustast terasest valmistatud tuhaeraldaja

## 4.2 Katseseadme kirjeldus ja tähistused

Kütuste pürolüüsi katseseadme (Joonis 4.2) keskne osa koosneb keevkihtkoldest B ja selle kohal paiknevast pürolüsaatorist D. Põlevkivi juhitakse nii keevkihtkoldesse kui ka pürolüsaatorisse kütuse punkritest J tigutoitjatega B1 ja B2.

Keevkihtkoldes põletatakse põlevkivi (või põlevkivi ja põlevkivi poolkoksi), selleks et kuumade põlemisproduktidega kuumutada pürolüsaatoris põlevkivi. Põlevkivi põlemisproduktid, mis väljuvad pürolüsaatori gaasikäigust DG, puhastatakse lendtuhaast tuhatsüklonis I, jahutatakse koldegaaside jahutajas N ja puhastatakse lõplikult kottfiltris F ning suunatakse tõmbeventilaatori V2 abil korstnasse. Jämedateraline alttuhk eraldadakse keevkihtkoldest tuhaeraldajaga Y1.

Põlevkivi pürolüsaator kujutab endast ringkanalit, mille keskosas on gaasikäik, mida läbivad keevkihtkoldest väljuvad põlevkivi kuumad põlemisproduktid. Kandegaasina

kasutatav ettesoojendatud lämmastik juhitakse läbi gaasikarbi ja resti C pürolüsaatorisse. Pürolüsaatori ringkanali keevkihis ja kihi kohal toimub põlevkivi kuumutamine esiteks ettesoojendatud kandegaasiga ja teiseks kuumade koldegaasidega läbi pürolüsaatori siseseina, mille tulemusna toimub põlevkivi pürolüüs. Jämedateraline poolkoks eraldatakse pürolüsaatori alt poolkoksieraldajaga Y2. Pürolüsaatorist väljuvad õliaurud puhastatakse peeneteralisest poolkoksist kahes järjestikku paiknevas tsüklonis G. Selleks, et hoida ära õliaurude jahtumist ja õli väljakondenseerumist tsüklonites, kasutatakse tsüklonites vajaliku temperatuuri hoidmiseks elektrikütet (E1 – E4). Tsüklonites poolkoksist puhastatud õliaurud sisenevad jahutajasse H, kus gaasidest kondenseeruvad välja õli ja vesi, kogunedes õlinõusse H12. Jahutajast väljuvad jääkgaasid segatakse põlemisõhuga põletis S ja põletatakse koldes P. Jääkgaasi leegi kustumise vältimiseks on kolde allosas vedelgaasi põleti, milles gaas põleb püsivalt. Gaaside põlemisproduktid jahutatakse jahutajas R ja suunatakse tõmbeventilaatori V2 abil korstnasse.

Antud katseseadme konstruktsiooni puhul keevkivikoldest väljuvad põlevkivi kuumad põlemisproduktid ja kuum lendtuhk ning pürolüüsi käigus tekkivad õliaurud ja lendkoks omavahel kokku ei puutu.

Katseseade käivitatakse käsitsi juhtimisega. Peale stabiilse töörežiimi saavutamist peab olema võimalik katseseadme parameetreid hoida stabiilsena nii käsitsi kui ka automaatjuhtimise teel. Katseseadme režiimide automaatsele juhtimisele saab üle minna ilmselt järk-järgult, olenevalt sellest kui hästi seade allub käsitsi juhtimisele.

Käesoleva katseseadme puhul on kütuste pürolüüsi protsess lahendatud uudsel viisil, seepärast võib katsetööde käigus kerkida üles probleeme nii mõõtmiste kui ka režiimide juhtimise poole pealt, mis vajavad täiendavaid lahendusi.





Joonis 4.3 Katseseadme mudel 3D keskkonnas



Katseseadme põhisõlmed:

- A – kolde rest ja õhukarp,
- B – kolde kest,
- C – gaasikarp ja rest,
- D – pürolüsaator,
- DG – pürolüsaatori gaasikäik,
- E – ülemine koldetoru,
- F – kottfilter,
- G – poolkoksi tsüklon (2x),
- H – õli- ja veeaurude jahutaja,
- I – tuhatsüklon
- J – tigutoitja ja kütusepunker (2x),
- K – tuha- ja poolkoksipunker (2x),
- L – tuhapunker (2x),
- M – tuhapunker (2x),
- N – koldegaaside jahuti,
- O – ühendus gaasitoru,
- P – jääkgaaside kolle,
- R – jääkgaaside jahuti,
- S – jääkgaaside põleti.

Katseseadme abiseadmed:

- B1 – kolde tigutoitja,
- B2 – pürolüsaatori tigutoitja,
- Y1 – alttuhaeraldaja,
- Y2 – poolkoksieraldaja,
- EÕ – õhu eelsoojendi,
- EW1 – õhu eelsoojendi koormuse regulaator,
- Õk – õhu kulumõõtja,
- Õv – suruõhu ventiil (õhk suruõhu süsteemist),
- EN – lämmastiku eelsoojendi,
- EW2 – lämmastiku eelsoojendi koormuse regulaator,
- Nk – lämmastiku kulumõõtja,
- Nv – lämmastiku ventiil (N<sub>2</sub> balloonist),
- E1, E2, E3, E4 – poolkoksi tsüklonite soojendid,
- EW3 – poolkoksi tsüklonite soojendite koormuse regulaator,
- V1, V2 – tõmbeventilaator,
- GK1, GK2 – gaasiklapp.

Katseseadme temperatuurid:

- Tõ – põlemisõhu temperatuur,
- Tk – kolde B temperatuur,
- Tn – lämmastiku temperatuur,
- Tg – gaasikarbi C temperatuur,
- Tp – pürolüsaatori D temperatuur,
- T01 – õliaurude temperatuur enne poolkoksitsükcloneid G,
- T02 – õliaurude temperatuur peale poolkoksitsükcloneid G,
- Tjg – jääkgaaside temperatuur enne põletit S,
- Tgk – jääkgaaside temperatuur peale põletit S,
- Tp1 – suitsugaaside temperatuur peale jäägaaside jahutit R,
- Tp2 – suitsugaaside temperatuur peale kottfiltrit F,
- Tg1 – suitsugaaside temperatuur enne tuhatsüklonit I,
- Tg2 – suitsugaaside temperatuur enne kottfiltrit F,
- Tv1 – jahutisse N siseneva jahutusvee temperatuur (võrguveesi),
- Tv2 – jahutist N väljuva jahutusvee temperatuur,
- Tv3 – jahutisse R siseneva jahutusvee temperatuur (võrguveesi),
- Tv4 – jahutist R väljuva jahutusvee temperatuur,
- Tv5 – jahutisse H siseneva jahutusvee temperatuur (jahutusüsteemist),
- Tv6 – jahutist H väljuva jahutusvee temperatuur.

Õhu ja gaaside rõhud katseseadmes:

- Pa – rõhk õhukarbis A, RÕHK
- Pb – rõhk/tõmme koldes B,
- Pc – rõhk gaasikarbis C, RÕHK
- Pd – rõhk/tõmme pürolüsaatoris D,
- Pg – rõhk/tõmme peale poolkoksitsükcloneid G,
- Pi – rõhk/tõmme enne tuhatsüklonit I.

#### Olulised mõõteparameetrid:

- põlevkivi kulu B1 koldesse (kg/h),
- põlevkivi kulu B2 pürolüsaatorisse (kg/h),
- Põlemisõhu kulu  $\ddot{O}k$  ja rõhk Pa (m<sup>3</sup>/h, MPa),
- Lämmastiku kulu Nk, rõhk Pc (m<sup>3</sup>/h, MPa),
- Kolde B temperatuur Tk ja rõhk Pb (°C, Mpa),
- Õliaurude temperatuur T3 ja rõhk P (puudu jooniselt) (°C, Mpa),
- Jääkgaaside temperatuur T4 ja rõhk P4 (°C, Mpa),
- Pürolüsaatori temperatuur T8 ja rõhk P8 (°C, Mpa),
- Õliaurude temperatuur T9 ja rõhk P9 peale pürolüsaatorit (°C, Mpa),
- Koldegaaside I temperatuur T5 ja rõhk P5 (°C, Mpa),
- Koldegaaside II temperatuur T6 ja rõhk P6 (°C, Mpa),
- Põlemisõhu eelsoojendi E1 temperatuur T $\ddot{o}$  (°C),
- Lämmastiku eelsoojendi E2 temperatuur Tn (°C)
- Poolkoksi tsüklonite soojendite temperatuur T7 (kõigil sama temp ja tähis) (°C).

### **4.3 Katseseadme juhtimine**

Katseseadme põhilised juhtimisahelad on järgmised:

1. kolde temperatuuri Tk hoitakse soovitud tasemel (~850 °C) reguleerides põlevkivi kulu B1 ja õhukulu  $\ddot{O}k$ ,
2. tõmme koldes Pb hoitakse soovitud tasemel (~50 MPa) tõmbeventilaatori V1 abil,
3. keevkihi paksust koldes reguleeritakse rõhkude vahe Pa – Pb järgi tuhaeraldaja Y1 kuli reguleerimise teel; kihi sobiv paksus reguleeritakse välja käsitsi juhtimise teel seadme käivitamise ajal,
4. keevkihi paksust pürolüsaatoris reguleeritakse rõhkude vahe Pc – Pd järgi tuhaeraldaja Y2 kulu reguleerimise teel; kihi sobiv paksus reguleeritakse välja käsitsi juhtimise teel seadme käivitamise ajal,
5. õliaurude vajalik pürolüsaatorist väljumise temperatuur To1 (470 °C või enam) tagatakse kandegaasi N2 temperatuuri regleerimisega eelsoojendi võimsuse EN ja/või kütuse kulu B2 muutmise teel; kandegaasi N2 vajalik kulu reguleeritakse

välja seadme käivitamise käigus ja stabiilse töörežiimi ajal seda enam ei muudeta või siis muudetakse väga väikeses ulatuses käsitsi;

6. õliaurude temperatuuri  $T_{o2}$  peale poolkoksi tsükloneid hoitakse vajalikul tasemel (430 – 450 °C) soojendite E1, E2, E3 ja E4 koormuse reguleerimisega regulaatoriga EW3,
7. tõmme pürolüsaatoris Pd hoitakse soovitud tasemel (~30 Pa) tõmbeventilaatoriga V2

### 4.3.1 Ohutus

Katseseadme töö ohutuse tagamiseks peavad helisignaalid käivituma juhul kui:

- tõmme koldes B kaob ja tekib ülerõhk  $P_b > 0$  Pa,
- kui tõmme pürolüsaatoris D kaob ja tekib ülerõhk  $P_d > 0$  Pa,
- kui õliaurude temperatuur enne tsükloneid G langeb  $T_{o1} < 450$  °C,
- kui õli- ja veeaurude jahutaja H välisjahutusüsteemist väljuva jahutusagensi temperatuur  $T_{v5}$  tõuseb üle 30 °C.

Katseseadme töö ohutuse tagamiseks peavad rakenduma blokeeringud juhul kui:

- seiskub üks või mõlemad tõmbeventilaatorid V1 ja V2. Antud olukorras tuleb seisata mõlemad tigutoitjad B1 ja B2 ning sulgeda õhu ja lämmastiku ventiilid  $\check{O}v$  ja  $Nv$ ,
- kui pürolüsaatoris D tekib järsult ülerõhk  $P_d > 500$  Pa. Antud olukorras tuleb samuti seisata mõlemad tigutoitjad B1 ja B2 ning sulgeda õhu ja lämmastiku ventiilid  $\check{O}v$  ja  $Nv$ .

## 4.4 Ettepanekud tulevaste seadmete projekteerimiseks

Põhiliseks riskiteguriks katseseadme projekteerimisel ja selle hilisemal monteerimisel nähti referentskeskkonna ja uute lisaseadmete puudumist 3D mudeli keskkonnas (edaspidi mudel). Referents keskkonna ja lisaseadmete all mõeldatakse antud projekti kontekstis:

- kõik kolm olemasolevat platvormi ja nende tugitalad,
- uus platvorm ja selle tugitalad,
- keevisrest, mis paikneb platvormide peal,
- tigutoitjate mootorid ning nende toetus,
- õhu ja lämmastiku eelsoojendid,
- tugiprofiilid katseseadme toestamiseks,
- toruklambrid katseseadme fikseerimiseks,
- ventilaatorid ja nende ühendus korstnaga.

Ainult mudeli projekteerimisel ilma reaalsuses ümbritsevat arvestamata tekitab modelleerimisel pettekujutus, et paigaldamiseks on ruumi lõputult ning seadmete omavaheline ühendus on lihtsasti lahendatav. Eksisteerivate platvormide ja uue platvormi modelleerimine mudeli keskkonda andnuks tunduvat parema ülevaate katseseadme paiknevusest, monteerimise võimalikust järjekorrast ning nendest tulenevatest võimalikest kitsaskohtadest, katseseadme tegelikest gabariitidest ja katseseadme toestamise tugipunktidest. Märkimata ei saa ka jätta võimalust kogu uue platvormi modelleerimisel koos käsipuude ja keevisrestidega, millest hiljem tootmisjoonised valmistada.

Referentskeskkonna puuduse tõttu on näiteks põlevkivi punker ja jääkgaaside põleti vaateava (Joonis 4.4) kaotanud oma funktsionaalsust, sest neile on keeruline ligipääseda. Täiendava näitena saab tuua tuhapunkrite vertikaalteljeline paigutuse kuna nende paigutuse puhul tuleb arvestada kuulkraanide hoobade liikumisulatusega. Lisaseadmete ja toestuste visuaalne nägemine mudelis võimaldanuks näha, kas kuulkraani hoob läheb kokkupuutesse (*collision*'i) olemasoleva keskkonnaga.



Joonis 4.4 Vaateava ja ülemise põlevkivipunkri ebafunktsionaalne asukoht

#### 4.4.1 3D-mõõdistamine, laserskaneerimine

Juhul kui Energiatehnoloogia instituudil peaks tekkima tarvidus ehitada olemasolevate katseseadmete kõrvale uus seade või näiteks teha täiendusi olemasolevatele seadmetele oleks mugav juba eelnevalt näha, mis võivad olla ruumilised piirangud seadmete paigutamisel. Antud olukorras oleks abiks, kui vastav keskkond oleks 3D-mõõtmestatud, siis see oleks ka jäädavalt koguaeg olemas. Laserskaneerimise ehk 3D-mõõdistamise abil on võimalik luua keskkonnast või objektidest täpne ruumiline punktipilv. Tulemust saab kasutada olemasolevate hoonete ja pindade kaardistamiseks ning analüüsimiseks erinevates valdkondades. Tulemus vähendab projektijuhtidel ja inseneridel objektil käimist, kuna punktipilvest on võimalik igast asukohast mõõta objektide vahelisi kaugusi ning ka igast skaneerimispunktist on võimalik vaadata panoraampilte.

Üldiselt kasutatakse skaneerimise tulemust erinevates projekteerimistarkvarades, kuid pakutakse ka võimalust punktipilvedega töötada veebikeskkonnas, mis võimaldab skaneeritud tulemust vaadata veebibrauseris ning ei vaja eraldi tarkvara.

Veebikeskkonnas on võimalik:

- liikuda ringi punktipilves,
- vaadata panoraampilte skaneerimispunktidest,
- vaadata skaneerimise plaani,
- mõõta vahemaid ja nurkasid,
- lisada kommentaare infovahetuseks erinevate osapoolte vahel.

3D-mõõtmistamist saab teostada näiteks FARO Focus S70 skanneriga, mida iseloomustavad järgnevad parameetrid [23]:

- tööraadius 0,6 – 70 m,
- mõõtekiirus kuni 976000 punkti sekundis,
- mõõtetäpsus  $\pm 1$  mm (kuni 25 meetri raadiuses),
- horisontaalne nägemisväli  $360^\circ$
- vertikaalne nägemisväli  $300^\circ$



Joonis 4.5 Näide 3D-mõõdistatud keskkonnast

## KOKKUVÕTE

Antud magistritöö põhieesmärk oli projekteerida katseseade varasemalt tehtud eskiiside alusel ning leida soojusenergia hulk kulub põlevkivi pürolüüsiks. Leitud soojushulga põhjal teostada pürolüüsiseadme kontrollarvutus soojusbilansi alusel. Täiendavateks eesmärkideks oli seatud põlevkivi kiirpürolüüsi ja sellest saadava põlevkiviõli uurimine ning ülevaatliku kirjelduse koostamine reaktoritest, mida kasutatakse pürolüüsi protsessis.

Kiirpürolüüsi protsessi alguses eraldub põlevkivist esmalt niiskus, temperatuuri järkjärgulisel tõusul hakkab toimuma materjali termiline lagunemine, moodustades esmased kondenseeruvad ja mitte kondenseeruvad gaasid. Hilisemal gaaside kiirel jahutamisel saadakse põlevkiviõli, mis on suhteliselt madala väävlisisaldusega võrrelduna naftamasuudiga. Protsessi lõpus jääb põlevkivist järele poolkoks ning mitte kondenseerunud gaasid. Üle 500 °C hakkab juba toimuma primaarse õli lagunemine, mistõttu on pürolüüsi korral tähtis täpne ja kontrollitav reaktsioonitemperatuur.

Ülevaade sai tehtud liikumatu kihiga reaktorist, keevkihtreaktorist, pöörleva koonusega reaktorist, ablatiiv reaktorist ning tigurektorist. Kuigi neil kõigil on erinev tehnoloogiline tase ja atraktiivsus turul, siis tööstuslikuks kasutamiseks peetakse sobivamateks hetkel keevkihtreaktoreid nende lihtsuse ja intensiivse soojus- ja massivahetus tõttu.

Katseseadme soojustehniliste arvutuste jaoks leiti erinevatest kirjandusallikatest vajalikud põlevkivi ja poolkoksi erisoojused ning arvutati välja, et põlevkivi pürolüüsiks on tarvis 5,673 kW soojusenergiat, kui seadme käitamisel on valitud põlevkivi kütuse kuluks 20 kg/h. Kontrollimiseks, kas katseseade on võimeline täiskoormusel töötama ning soojusbilanss pürolüsaatoris on saavutatav, sooritati arvutusnäide. Näites valiti eelsoojendatud (600 °C) lämmastiku kiiruseks 0,4 m/s, mis moodustas pürolüsaatorisse juurde antavaks soojushulgaks 1,931 kW. Koldest oli seljuhul vajaminev soojushulk 3,742 kW. Soojusülekanne kontrollarvutuste tulemuse 3,680 kW põhjal võib väita et katseseadme töötamine täiskoormusel on arvutuslikult võimalik. Soojusbilansi kontrollarvutuste veaprotsendiks tuli alla 2%.

Energiatehnoloogia instituudi katsehalli projekteeritav katseseade on põhiliselt ettenähtud põlevkiviõli soodsamate tootmisvõimaluste väljaselgitamiseks, kus reaktoris kasutatavaks tehnoloogiaks on valitud keevkiht. Katseseade sai valmistatud varasemate eskiiside põhjal luues neist tarkvaras Autodesk Inventor Professional 2019 3D mudel, mille alusel valmistati samas tarkvaras tootmisjoonised. Kokku tuli unikaalseid jooniseid 208 ning nende hierarhia on esitatud tehtud jooniste nimekirjas. Ettepanek tulevaste seadmete projekteerimisel oleks modelleerida ka ümbritsev referents keskkond või kasutada laserskaneeritud keskkonda, et näha kohapealseid olemasolevaid seadmeid.



Katseseadme ohutusautomaatika paigaldamise ja tarrerimise lõppedes, kui seadet käivitatakse, saadakse täpsemad parameetrid, mis tõenäoliselt lükkavad ümber arvutatud tulemused. Loodetavasti, aga annavad arvutatud parameetrid referents suurusjärgud, millele esialgsetel katsetustel toetuda.

Üks viis ressursside/kütuste kasutamisest tingitud tagajärgede vähendamiseks on tõsta ressursside kasutamise efektiivsust. Keevkihttehnoloogia on täna teadaolev efektiivseim ja parim lahendus, mis oleks sobilik kohandada ka ringmajanduse põhimõttele plastide/rehvide ja muude lendosade rikaste jääkmaterjalide taaskasutamisel. Vastavaid uuringuid ja katseid saaks läbi viia projekteeritud kiirpürolüüsi katseseadmel.

# CONCLUSION

The aim of this master's thesis was to design a pilot-scale test apparatus based on previously done sketches and to find the amount of heat energy required for oil shale pyrolysis. Heat balance control calculations were performed based on the amount of heat for pyrolysis. Additional objectives were to study oil shale fast pyrolysis and its main product shale oil, and to compile an overview of reactors used in pyrolysis process. At the beginning of fast pyrolysis, moisture from the oil shale is first evaporated, and as the temperature gradually increases, thermal decomposition of the material begins, forming condensable and non-condensable gases. Subsequent rapid cooling of the gases at the next stage gives shale oil, which has a relatively low sulfur content compared to petroleum fuel oil. Remaining product at the end of the process are semi coke and non-condensable gases. At temperatures above 500 °C secondary cracking of the shale oil begins, which is why accurate and controlled reaction temperatures are important when trying to maximize oil yield.

Overview was performed on fixed bed reactor, fluidized bed reactor, rotating cone reactor, ablative reactor and auger reactor. Although the all have different technology readiness levels and market attractiveness, fluidized bed reactors are currently considered more suitable for industrial use due to their simplicity and intensive heat and mass transfer.

Oil shale and shale oil specific heat necessary for the calculations, were gathered from various literature sources. Calculated quantity of heat necessary for the process of oil shale pyrolysis was 5,673 kW if the chosen oil shale feed rate was 20 kg/h. To verify that the test apparatus is capable of operating at full load and that the heat balance in the pyrolyser is achievable, a calculation example was performed. In the example, the preheated (600 °C) nitrogen gas speed was chosen 0,4 m/s, which was equivalent of 1,931 kW of heat added to the pyrolyser. In that case, the amount of heat required from the furnace was 3,742 kW. Based on control calculation result of 3,680 kW, it can be stated that it is computationally possible to operate the test apparatus at full load. The error rate of the heat balance control calculations was less than 2%.

Pyrolysis test apparatus designed for use in the Department of Energy Technology is mainly intended for determining more favorable production possibilities of shale oil. Designing of the apparatus, based on previously done sketches, was done using Autodesk Inventor Professional 2019 by creating a 3D model which was the basis of manufacturing drawings. A total of 208 unique drawings were made and their hierarchy was presented in a drawing list. A proposal for future similar designing processes would be to model the surrounding reference environment or to use a laser scanner environment to see existing equipment on site.

At the end of the safety automation installation when the design apparatus is started, new and more detailed parameters will be received. These will likely override the calculated result. Hopefully, however, the calculated parameters will provide a reference points which to base initial experiments.

One way to reduce the consequences of resource/fuel use is to increase resource efficiency. Fluidized bed technology is the most efficient and best solution known today, which would also be suitable for adapting to the principle of circular economy in the recycling of waste materials such as plastics/tires. These tests and studies could be performed on the designed fast pyrolysis test apparatus.

## 5 KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] V. Kattai, Põlevkivi - õlikivi, Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus, 2003.
- [2] Keskkonnaministeerium, „Põlevkivi kasutamise riiklik arengukava 2016 - 2030,“ Tallinn, 2015.
- [3] Taltech, Tartu Ülikool, „ETAG Rita projekti "Innovaatiliste ja keskkonnasõbralike põlevkivi või selle saaduste töötlemise tehnoloogiate arendamine" vahearuanne,“ Eesti Teadusinfosüsteem, 2020.
- [4] Estivo OÜ; ÅF-Consulting AS, „Eesti Põlevkiviõli tootmise parim,“ Eesti Keemiatööstuse Liit, Tallinn, 2013.
- [5] P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, London: Elsevier Inc, 2013.
- [6] D. Mohan, „Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review,“ Energy & Fuels, 2006.
- [7] V. K. Guda, P. H. Steele, V. K. Penmetsa ja Q. Li, „Fast Pyrolysis of Biomass: Recent Advances in Fast Pyrolysis Technology,“ %1 *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass*, 2015, pp. 177-211.
- [8] X. Han, I. Kulaots, X. Jiang ja E. M. Suuberg, „Review of oil shale semicoke and its combustion utilization,“ *Fuel*, kd. 126, pp. 143-161, 2014.
- [9] Eesti Energia, Viru Keemia Grupp, Põlevkivi Kompetentsikeskus, „Eesti põlevkivitööstuse aastaraamat 2019,“ 2020.
- [10] B. Maaten, O. Järvik, O. Pihl, A. Konist ja A. Siirde, „Oil shale pyrolysis products and the fate of sulfur,“ *Oil Shale*, kd. 37, pp. 51-69, 2020.
- [11] International Maritime Organization, „IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions,“ [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>. [Kasutatud 1 mai 2021].
- [12] A. V. Bridgwater ja G. V. C. Peacocke, „Fast pyrolysis processes for biomass,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd. 4, nr 1, pp. 1-73, 2000.
- [13] M. Jahirul, M. Rasul, A. Chowdhury ja N. Ashwath, „Biofuels Production through Biomass Pyrolysis –A Technological Review,“ *Energies*, pp. 4952-5001, 2012.
- [14] A. Ots, Tahkekütuste keevkihtpõletustehnika, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2016.
- [15] C. J. Ellens, „Design, optimization and evaluation of a free-fall biomass fast pyrolysis reactor and its products,“ Iowa State University, 2009.

- [16] F. Campuzanoa, R. C. Brown ja J. D. Martíneza, „Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd. 102, pp. 372-409, 2019.
- [17] A. Siirde, M. Eldermann, P. Rohumaa ja J. Gusca, „Analysis of greenhouse gas emissions from Estonian oil shale based energy production processes. Life cycle energy analysis perspective,” *Oil Shale*, kd. 30, nr 2S, pp. 268-282, 2013.
- [18] Л. отделение, „Энерготехнологическая установка на эстонской грэс часть III-A,” Министерство энергетики и электрификаций СССР, Ленинград, 1978.
- [19] Д. Л. Тимрот, С. Л. Рувкин, А. М. Сирота ja Н. Б. Варгафтик, Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, Ленинград, Москва: Государственное энергетическое издательство, 1958.
- [20] С. С. Кутателадзе ja В. М. Боришанский, „Справочник по теплоперебаче,” Государственное энергетическое издательство, Ленинград, Москва, 1959.
- [21] A. Kull, I. Mikk ja A. Ots, *Soojustehnika*, Tallinn: Valgus, 1974.
- [22] P. Kulu, *Mehaanikainseneri käsiraamat*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012.
- [23] Faro, „Focus Laser Scanner,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/2021/01/15/22/34/Tech-Sheet-FARO-Focus-Laser-Scanners-ENG.pdf?rev=cb02264ffc4123b82a5c42f29b14be>. [Kasutatud 23 Mai 2021].

# LISAD

**Lisa 3.5.1 Soojusülekande teguri  $\alpha_p$  arvutustabel**

$\Delta T, K$	$T_{pr}, K$	$T_{psr}, K$	$\alpha_p, W/m^2K^4$	arvutatud $\Delta T, K$
1	763	764	90,847	34,70
2		765	91,026	34,63
3		766	91,205	34,56
4		767	91,385	34,49
5		768	91,564	34,43
6		769	91,744	34,36
7		770	91,924	34,29
8		771	92,105	34,22
9		772	92,286	34,16
10		773	92,467	34,09
11		774	92,649	34,02
12		775	92,831	33,96
13		776	93,013	33,89
14		777	93,195	33,82
15		778	93,378	33,76
16		779	93,561	33,69
17		780	93,745	33,62
18		781	93,928	33,56
19		782	94,112	33,49
20		783	94,297	33,43
21		784	94,481	33,36
22		785	94,666	33,30
23		786	94,852	33,23
24		787	95,037	33,17
25		788	95,223	33,10
26		789	95,410	33,04
27		790	95,596	32,97
28		791	95,783	32,91
29		792	95,971	32,84
30		793	96,158	32,78
31		794	96,346	32,72
32		795	96,534	32,65
33		796	96,723	32,59
34		797	96,912	32,53

**Lisa 3.5.2 Keraamilise toru välispinna temperatuuri arvutustabel**

$\Delta T, K$	$T_{ps}, K$	$T_{kv}, K$	$\lambda_{\bar{o}}, W/mK$
1	796	797	17,11146
224		1020	0,07639
225		1021	0,07605
226		1022	0,07571
227		1023	0,07538
228		1024	0,07505
229		1025	0,07472
230		1026	0,07440
231		1027	0,07408
232		1028	0,07376
233		1029	0,07344
234		1030	0,07313
235		1031	0,07281
236		1032	0,07251
237		1033	0,07220
238		1034	0,07190
239		1035	0,07160
240		1036	0,07130
241		1037	0,07100
242		1038	0,07071
243		1039	0,07042
244		1040	0,07013
245		1041	0,06984
246		1042	0,06956
247		1043	0,06928
248		1044	0,06900
249		1045	0,06872
250		1046	0,06845
251		1047	0,06817
252		1048	0,06790
253		1049	0,06763
254		1050	0,06737
255		1051	0,06710
256		1052	0,06684
257		1053	0,06658
258		1054	0,06632
259		1055	0,06607



**Lisa 3.5.3 Soojusülekande teguri  $\alpha_p$  arvutustabel**

$\Delta T, K$	$T_{kv}, K$	$T_{ks}, K$	$\lambda_{cr} W/mK$
1	1054	1055	39,92674
18		1072	2,21815
19		1073	2,10141
20		1074	1,99634
21		1075	1,90127
22		1076	1,81485
23		1077	1,73595
24		1078	1,66361
25		1079	1,59707
26		1080	1,53564
27		1081	1,47877
28		1082	1,42596
29		1083	1,37678
30		1084	1,33089
31		1085	1,28796
32		1086	1,24771
33		1087	1,20990
34		1088	1,17432
34		1088	1,17432
35		1089	1,14076
36		1090	1,10908
37		1091	1,07910
38		1092	1,05070
39		1093	1,02376
40		1094	0,99817
41		1095	0,97382
42		1096	0,95064
43		1097	0,92853
44		1098	0,90743
45		1099	0,88726
46		1100	0,86797
47		1101	0,84951
48		1102	0,83181
49		1103	0,81483
50		1104	0,79853

**Lisa 3.5.4 Soojusülekande teguri  $\alpha_k$  arvutustabel**

$\Delta T, K$	$T_{kv}, K$	$T_{kolle}, K$	$\alpha_k, W/m^2K^4$	arvutatud $\Delta T, K$
1	763	1104	182,857	18,79
2		1105	183,106	18,76
3		1106	183,355	18,74
4		1107	183,604	18,71
5		1108	183,854	18,68
6		1109	184,104	18,66
7		1110	184,354	18,63
8		1111	184,605	18,61
9		1112	184,856	18,58
10		1113	185,107	18,56
11		1114	185,358	18,53
12		1115	185,610	18,51
13		1116	185,862	18,48
14		1117	186,115	18,46
15		1118	186,367	18,43
16		1119	186,620	18,41
17		1120	186,874	18,38
18		1121	187,127	18,36
19		1122	187,381	18,33

**Lisa 4.1 Jooniste nimekiri**

Jooniste nimekiri		xxxxxxx	Peajoonis	Staat	Tähis						
		xxxxxx	Esmakordne esinemine	m	Missing						
<b>Objekt:</b>		xxxxx	Korduv esinemine	ip	In progress						
<b>Kiirpürolüüsi katseseade</b>				r	Ready						
				c	Checked						
				d	Delivery						
				s	Sent earlier	Kuupäev	06-08-2020				
No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
1	X0						s	Katlastendi montaaž	X0	0	04.08.2020
2		X1					s	Katlastendi poltamine 1	X1	0	07.02.2020
3			A0				s	Kolde rest + õhukarp	A0	1	07.07.2020
4				A1			s	Õhukarbikülg	A1	0	11.06.2020
5				A2			s	Düüs avadega	A2	0	11.06.2020
6				A3			s	Kolde rest	A3	0	11.06.2020
7				A4			s	Õhutoru äärik	A4	0	11.06.2020
8				A5			s	Tuhatoru äärik	A5	0	11.06.2020
9				A6			s	Õhukarbi põhi	A6	0	11.06.2020
10			B0				s	Kolde kest	B0	0	04.08.2020
11				B1			s	Kolde kesta keeviskoost	B1	0	04.08.2020
12					B2		s	Kolde kesta korpus	B2	0	04.08.2020
13					B3		s	Kütuse toru äärik	B3	0	04.08.2020
14					B4		s	Kolde kesta alumine äärik	B4	0	04.08.2020
15					B5		s	Kolde kesta ülemine äärik	B5	0	04.08.2020
16					B6		s	Kolde luugiava korpus	B6	0	04.08.2020
17						B7	s	Plaat 1	B7	0	04.08.2020
18						B8	s	Plaat 2	B8	0	04.08.2020
19				B9			s	Koldeluuk	B9	0	04.08.2020
20					B10		s	Koldeluugi keeviskoost 1	B10	0	04.08.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
21						B11	s	Koldeluugi kinnitusõlg	B11	0	04.08.2020
22						B12	s	Plaat 3	B12	0	04.08.2020
23						B13	s	Plaat 4	B13	0	04.08.2020
24						B14	s	Plaat 5	B14	0	04.08.2020
25					B15		s	Koldeluugi keeviskoost 2	B15	0	04.08.2020
26						B16	s	Plaat 6	B16	0	04.08.2020
27						B17	s	Plaat 7	B17	0	04.08.2020
28				B18			s	Koldeluugi kinnituspolt	B18	0	04.08.2020
29					B19		s	Kinnituspolt	B19	0	04.08.2020
30				B20			s	Kinnituspoldi hoidja	B20	0	04.08.2020
31			C0				s	Gaasikarp + rest	C0	1	07.07.2020
32				C1			s	Gaasikarbi välimine külg	C1	0	11.06.2020
33				C2			s	Gaasidüüs	C2	0	11.06.2020
34				C3			s	Gaasikarbi äärik	C3	0	11.06.2020
35				C4			s	Gaasikarbi rest	C4	0	11.06.2020
36				C5			s	Gaasitoru äärik	C5	0	11.06.2020
37			J0				s	Põlevkivi toitesõlm	J0	0	07.07.2020
38				J1			s	Põlevkivikruvi koost	J1	0	07.07.2020
39					J2		s	Põlevkivikruvi	J2	0	07.07.2020
40					J3		s	Liugelaager	J3	0	07.07.2020
41					J4		s	Põlevkivikruvi korpus	J4	0	07.07.2020
42					J5		s	Põlevkivikruvi kinnitusmuhv	J5	1	09.07.2020
43					J6		s	Seib	J6	0	07.07.2020
44				J7			s	Põlevkivipunker	J7	0	07.07.2020
45					J8		s	Eessein	J8	0	07.07.2020
46					J9		s	Küljesein 1	J9	0	07.07.2020
47					J10		s	Küljesein 2	J10	0	07.07.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
21						B11	s	Koldeluugi kinnitusõlg	B11	0	04.08.2020
22						B12	s	Plaat 3	B12	0	04.08.2020
23						B13	s	Plaat 4	B13	0	04.08.2020
48					J11		s	Tagasein	J11	0	07.07.2020
49					J12		s	Punkri kaas	J12	0	07.07.2020
50					J13		s	Käepide 2	J13	0	07.07.2020
51				J14			s	Äärik 4	J14	0	07.07.2020
52			K0				s	Suitsugaaside jahutaja tuhapunker 1	K0	0	07.07.2020
53				K1			s	Äärik 5	K1	0	07.07.2020
54				K2			s	Tuhapunkri katteplaat 1	K2	0	07.07.2020
55				K3			s	Tuhapunkri kooniline osa	K3	0	07.07.2020
56			Y0				s	Tuhaeraldaja	Y0	0	26.11.2019
57				Y1			s	Katteplaat	Y1	0	26.11.2019
58				Y2			s	Vaheplaat	Y2	0	26.11.2019
59				Y3			s	Põhjaplaat	Y3	0	26.11.2019
60				Y4			s	Toru	Y4	0	26.11.2019
61				Y5			s	Toru, Ø33,7	Y5	0	26.11.2019
62				Y6			s	Äärik	Y6	0	26.11.2019
63				Y7			s	Siiber	Y7	0	26.11.2019
64				Y8			s	Regulaator	Y8	0	26.11.2019
65				Y9			s	Muhv	Y9	0	26.11.2019
66				Y10			s	Hoob	Y10	0	26.11.2019
67				Y11			s	Polt	Y11	0	26.11.2019
68				Y12			s	Tikkpolt	Y12	0	26.11.2019
69		X2					s	Katlastendi poltimine 2	X2	0	07.02.2020
70			D0				s	Pürolüsaator	D0	1	07.07.2020
71				D1			s	Pürolüsaatori välimine kest	D1	1	07.07.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
72				D2			s	Gaasikäik	D2	0	11.06.2020
73				D3			s	Pürolüsaatori ülemine äärik	D3	0	11.06.2020
74				D4			s	Pürolüsaatori alumine äärik	D4	0	11.06.2020
75				D5			s	Gaasikäigu äärik	D5	0	11.06.2020
76				D6			s	Ringkanali ülemine ots	D6	0	11.06.2020
77				D7			s	Poolkoksi keeviskoost	D7	0	11.06.2020
78					D8		s	I poolkoksitoru	D8	0	11.06.2020
79					D9		s	II poolkoksitoru äärik	D9	0	11.06.2020
80					D10		s	I poolkoksitoru äärik	D10	0	11.06.2020
81					D11		s	Gaasitoru äärik	D11	0	11.06.2020
82					D12		s	Gaasitoru	D12	0	11.06.2020
83						D13	s	Ümarlatt Ø12	D13	0	11.06.2020
84						D14	s	Plaat 8	D14	1	07.07.2020
85				B3			s	Kütuse toru äärik	B3	0	04.08.2020
86			J0				s	Põlevkivi toitesõlm	J0	0	07.07.2020
87			K0				s	Suitsugaaside jahutaja tuhapunker 1	K0	0	07.07.2020
88			Y0				s	Tuhaeraldaja	Y0	0	26.11.2019
89		X3					s	Katlastendi poltimine 3	X3	0	07.02.2020
90			E0				s	Ülemine koldetoru	E0	1	07.07.2020
91				E1			s	Ülemise koldetoru korpus	E1	0	11.06.2020
92				E2			s	Ülemise koldetoru alumine äärik	E2	0	11.06.2020
93				E3			s	Ülemise koldetoru ülemine äärik	E3	0	11.06.2020
94				E4			s	Ülemise koldetoru kaas	E4	0	11.06.2020
95				E5			s	Suitsugaasikäik	E5	0	11.06.2020
96				E6			s	Suitsugaasikäigu äärik	E6	0	11.06.2020
97			F0				s	Kottfilter	F0	0	07.07.2020
98				F1			s	Äärik 1	F1	0	07.07.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
99				F2			s	Äärik 2	F2	0	07.07.2020
100				F3			s	Elementide hoidja	F3	0	07.07.2020
101				F4			s	Põrkesein	F4	0	07.07.2020
102				F5			s	Kottfiltri kest	F5	0	07.07.2020
103					F6		s	Vinkel 1	F6	0	07.07.2020
104					F7		s	Vinkel 2	F7	0	07.07.2020
105					F8		s	Otsasein 1	F8	0	07.07.2020
106					F9		s	Otsasein 2	F9	0	07.07.2020
107					F10		s	Külgsein	F10	0	07.07.2020
108					F11		s	Plaat 9	F11	0	07.07.2020
109				F12			s	Kottfiltri kate	F12	0	07.07.2020
110					F13		s	Katteplaat	F13	0	07.07.2020
111					F14		s	Kaas	F14	0	07.07.2020
112					F15		s	Käepide 1	F15	0	07.07.2020
113			I0				s	Tuhatsüklon	I0	1	07.07.2020
114				G6			s	Äärik 3	G6	0	09.07.2020
115				I1			s	Tuhatsükloni kest	I1	0	11.06.2020
116				I2			s	Tuhatsükloni äärik	I2	0	11.06.2020
117				I3			s	Tuhatsükloni koonuse äärik	I3	1	07.07.2020
118				I4			s	Tsükloni kooniline osa	I4	1	07.07.2020
119				I5			s	Tuhatsükloni suitsukanal plaat 1	I5	1	07.07.2020
120				I6			s	Tuhatsükloni suitsukanali montaaž	I6	1	07.07.2020
121					I7		s	Tuhatsükloni suitsukanali plaat 2	I7	1	07.07.2020
122					I8		s	Tuhatsükloni suitsukanali plaat 3	I8	1	07.07.2020
123				I9			s	Kaane montaaž	I9	1	07.07.2020
124					I10		s	Tsükloni suitsugaaside toru	I10	1	07.07.2020
125					I11		s	Tsükloni suitsutoru jätk	I11	1	07.07.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
126					I12		s	Tuhatsükloni kaas	I12	1	07.07.2020
127					I13		s	Pime äärik	I13	1	07.07.2020
128					F1		s	Äärik 1	F1	0	07.07.2020
129				E6			s	Suitsugaasikäigu äärik	E6	0	11.06.2020
130			L0				s	Suitsugaaside jahutaja tuhapunker 2	L0	0	07.07.2020
131				L1			s	Tuhapunkri katteplaat 2	L1	0	07.07.2020
132				F1			s	Äärik 1	F1	0	07.07.2020
133				K3			s	Tuhapunkri kooniline osa	K3	0	07.07.2020
134			N0				s	Koldegaaside jahuti	N0	0	07.07.2020
135				N1			s	Koldegaaside jahuti keeviskoost 1	N1	0	07.07.2020
136					N2		s	Jahutaja kest 2	N2	0	07.07.2020
137					N3		s	Äärik-torulaud	N3	0	07.07.2020
138					H3		s	Keermestatud toru	H3	0	07.07.2020
139				N4			s	Gaaside sõlme montaaž	N4	0	07.07.2020
140					N5		s	Suitsugaaside sisenemistoru	N5	0	07.07.2020
141					N6		s	Suitsugaaside toru	N6	0	07.07.2020
142					N7		s	Katteplaat	N7	0	07.07.2020
143					F2		s	Äärik 2	F2	0	07.07.2020
144					H4		s	Jahutaja äärik	H4	0	07.07.2020
145				N8			s	Koldegaaside jahuti keeviskoost 2	N8	0	07.07.2020
146					N9		s	Väljundi kooniline osa	N9	0	07.07.2020
147					F2		s	Äärik 2	F2	0	07.07.2020
148					H4		s	Jahutaja äärik	H4	0	07.07.2020
149					H9		s	Õli ja vee väljumistoru	H9	0	07.07.2020
150					H10		s	Gaaside väljumistoru	H10	0	07.07.2020
151		X4					s	Katlastendi poltimine 4	X4	0	07.02.2020
152			G0				s	Poolkoksi tsüklonid I ja II	G0	1	06.08.2020



No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
153				G1			s	I tsükloni monaaž 1	G1	0	09.07.2020
154					G2		s	Tsüklonite silindriline korpus	G2	0	09.07.2020
155					G3		s	I tsükloni gaasikanal 1	G3	0	09.07.2020
156					G4		s	I tsükloni gaasikanal 2	G4	0	09.07.2020
157					G5		s	Tsüklonite sisemine äärik	G5	0	09.07.2020
158					G6		s	Äärik 3	G6	0	09.07.2020
159					G7		s	Tsüklonite kooniline korpus	G7	0	09.07.2020
160					D5		s	Gaasikäigu äärik	D5	0	11.06.2020
161				G8			s	I tsükloni montaaž 2	G8	0	09.07.2020
162					G9		s	I tsükloni gaaside väljumistoru	G9	0	09.07.2020
163					G10		s	I tsükloni gaasikanal 3	G10	0	09.07.2020
164					G11		s	Tsüklonite kaas	G11	0	09.07.2020
165					D5		s	Gaasikäigu äärik	D5	0	11.06.2020
166					F1		s	Äärik 1	F1	0	07.07.2020
167				G12			s	Plahvatusklapi montaaž	G12	0	09.07.2020
168					G13		s	Plahvatusklapi äärik	G13	0	09.07.2020
169					G14		s	Plahvatusklapi koonus	G14	0	09.07.2020
170					F2		s	Äärik 2	F2	0	07.07.2020
171				G15			s	I tsükloni poolkoksitoru	G15	0	09.07.2020
172					G16		s	II tsükloni gaasikanal 1	G16	0	09.07.2020
173					D5		s	Gaasikäigu äärik	D5	0	11.06.2020
174					G2		s	Tsüklonite silindriline korpus	G2	0	09.07.2020
175					G5		s	Tsüklonite sisemine äärik	G5	0	09.07.2020
176					G6		s	Äärik 3	G6	0	09.07.2020
177					G7		s	Tsüklonite kooniline korpus	G7	0	09.07.2020
178				G17			s	II tsükloni montaaž 2	G17	0	09.07.2020
179					F2		s	Äärik 2	F2	0	07.07.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
180					G11		s	Tsüklonite kaas	G11	0	09.07.2020
181			H0				s	Õli- ja veeaurude jahutaja	H0	0	07.07.2020
182				H1			s	Jahutaja keeviskoost 1	H1	0	07.07.2020
183					H2		s	Jahutaja kest 1	H2	0	07.07.2020
184					H3		s	Keermestatud toru	H3	0	07.07.2020
185					H4		s	Jahutaja äärik	H4	0	07.07.2020
186					H5		s	Jahutaja torulaud	H5	0	07.07.2020
187				H6			s	Jahutaja keeviskoost 2	H6	0	07.07.2020
188					H7		s	Sisendi kooniline osa	H7	0	07.07.2020
189					F2		s	Äärik 2	F2	0	07.07.2020
190					H4		s	Jahutaja äärik	H4	0	07.07.2020
191				H8			s	Jahutaja keeviskoost 3	H8	0	07.07.2020
192					H9		s	Õli ja vee väljumistoru	H9	0	07.07.2020
193					H10		s	Gaaside väljumistoru	H10	0	07.07.2020
194					H11		s	Väljundi kooniline osa	H11	0	07.07.2020
195					F2		s	Äärik 2	F2	0	07.07.2020
196					H3		s	Keermestatud toru	H3	0	07.07.2020
197					H4		s	Jahutaja äärik	H4	0	07.07.2020
198				H12			s	Õlinõu	H12	0	07.07.2020
199					H13		s	Õlinõu ots	H13	0	07.07.2020
200					H3		s	Keermestatud toru	H3	0	07.07.2020
201			M0				s	Suitsugaaside jahutaja tuhapunker 3	M0	0	07.07.2020
202				M1			s	Äärik 6	M1	0	07.07.2020
203				M2			s	Tuhapunkri katteplaat 3	M2	0	07.07.2020
204					K3		s	Tuhapunkri kooniline osa	K3	0	07.07.2020
205			O0				s	Ühendus gaasitoru	O0	0	07.07.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
206				O1			s	Torupõlve esimene pool	O1	0	07.07.2020
207				O2			s	Torupõlve teine pool	O2	0	07.07.2020
208				F1			s	Äärik 1	F1	0	07.07.2020
209		X5					s	Katlastendi poltimine 5	X5	0	07.02.2020
210			P0				s	Jääkgaaside kolle	P0	0	04.08.2020
211				P1			s	Kolde korpus	P1	0	04.08.2020
212				P2			s	Vaateava toru	P2	0	04.08.2020
213				P3			s	Vaateava äärik 1	P3	1	06.08.2020
214				P4			s	Jääkgaaside alumine äärik	P4	0	04.08.2020
215				P5			s	Jääkgaaside ülemine äärik	P5	0	04.08.2020
216				P6			s	Vaateava äärik 2	P6	0	04.08.2020
217			R0				s	Jääkgaaside jahutaja	R0	0	28.07.2020
218				R1			s	Jahutaja kest	R1	0	28.07.2020
219				R2			s	Gaasitoru	R2	0	28.07.2020
220				R3			s	Jahutusvee toru	R3	0	28.07.2020
221				R4			s	Alumine torulaud-äärik	R4	0	28.07.2020
222				R5			s	Ülemine äärik	R5	0	28.07.2020
223				R6			s	Ülemine torulaud	R6	0	28.07.2020
224				R7			s	Jahutaja kaas	R7	0	28.07.2020
225				F1			s	Äärik 1	F1	0	07.07.2020
226			S0				s	Jääkgaaside põleti	S0	0	28.07.2020
227				S1			s	Jääkgaaside põleti sisemine kest	S1	0	04.08.2020
228					S2		s	Abipõleti toru tugi	S2	0	04.08.2020
229						S3	s	Plaat 10	S3	0	04.08.2020
230						S4	s	Plaat 11	S4	0	04.08.2020
231					S5		s	Õhukarbi sisemine kest	S5	0	04.08.2020
232					S6		s	Abipõleti fiksaator	S6	0	04.08.2020

No.	I	II	III	IV	V	VI	Staat	Kirjeldus:	Number	rev	Kuupäev
232					S6		s	Abipõleti fiksaator	S6	0	04.08.2020
233					S7		s	Õhukarbi põhi	S7	0	04.08.2020
234				S8			s	Põleti kest	S8	0	04.08.2020
235				S9			s	Suitsugaasi toru	S9	0	04.08.2020
236				S10			s	Puhastusava toru	S10	0	04.08.2020
237				S11			s	Õhutoru	S11	0	04.08.2020
238				S12			s	Põleti äärik	S12	0	04.08.2020
239				S13			s	Põleti põhi	S13	0	04.08.2020
240				S14			s	Abipõleti toru äärik	S14	0	04.08.2020
241				S15			s	Gaasitoru äärik	S15	0	04.08.2020
242				F1			s	Äärik 1	F1	0	07.07.2020

Lisa 4.2 Materjalitabel

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
A0	Kolde rest + õhukarp				1	
A1	Õhukarbikülg	Ümartoru Ø219,1 t=3	L=100	EN 1.4404	1	DN200
A2	Düüs avadega	Ümarlatt Ø15	L=26	EN 1.4404	15	
A3	Kolde rest	Plaat t=12	370x370	EN 1.4301	1	
A4	Õhutoru äärik	Plaat t=6	112x112	EN 1.4301	1	
A5	Tuhatoru äärik	Plaat t=6	100x100	EN 1.4301	1	
A6	Õhukarbi põhi	Plaat t=4	215x215	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø48,3 t=2	L=130	EN 1.4404	1	DN40
		Ümartoru Ø33,7 t=2	L=240	EN 1.4404	1	DN25
B0	Kolde kest				1	
B1	Kolde kesta keeviskoost				1	
B2	Kolde kesta korpus	Ø273, t=2	L=800	EN 1.4404	1	DN250
B3	Kütuse toru äärik	Plaat t=8	120x120	EN 1.4301	1	
B4	Koldekesta alumine äärik	Plaat t=12	370x370	EN 1.4301	1	
B5	Koldekesta ülemine äärik	Plaat t=12	370x370	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø60,3 t=2	L=60	EN 1.4404	1	DN50
B6	Kolde luugiava korpus				1	
B7	Plaat 1	Plaat t=2	140x89,3	EN 1.4301	2	
B8	Plaat 2	Plaat t=2	116x74,3	EN 1.4301	2	
B9	Koldeluugi korpus			EN 1.4301	1	
B10	Koldeluugi keeviskoost 1				1	
B11	Koldeluugi kinnitusõlg	Plaat t=4	83,1x33	EN 1.4301	2	
B12	Plaat 3	Plaat t=2	178,6x150	EN 1.4301	1	
B13	Plaat 4	Plaat t=2	135x87,3	EN 1.4301	2	
B14	Plaat 5	Plaat t=2	112x73,7	EN 1.4301	2	

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
B15	Koldeluugi keeviskoost 2				1	
B16	Plaat 6	Plaat t=2	76,1x75,8	EN 1.4301	2	
B17	Plaat 7	Plaat t=2	75,6x71	EN 1.4301	2	
		Kvartstoru Ø25	L=70	Kvarts	1	
B18	Koldeluugi kinnituspolt				2	
B19	Kinnituspolt	Ümarlatt Ø10	L=50	EN 1.4404	1	
		Ümarlatt Ø10	L=36	EN 1.4404	1	
B20	Kinnituspoldi hoidja	Ümarlatt Ø16	L=10	EN 1.4404	4	
C0	Gaasikarp + rest				1	
C1	Gaasikarbi välimine külg	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=126	EN 1.4404	1	DN200
C2	Gaasidüüs	Ümartoru Ø15	L=34	EN 1.4404	18	
C3	Gaasikarbi äärik	Plaat t=12	370x370	EN 1.4301	1	
C4	Gaasikarbi rest	Plaat t=12	300x300	EN 1.4301	1	
C5	Gaasitoru äärik	Plaat t=6	90x90	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø154 t=2	L=144	EN 1.4404	1	
		Ümartoru Ø42,4 t=2	L=125	EN 1.4404	1	DN32
D0	Pürolüsaator				1	
B3	Kütusetoru äärik	Plaat t=6	120x120	EN 1.4301	1	
D1	Pürolüsaatori välimine kest	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=2486	EN 1.4404	1	DN200
D2	Gaasikäik	Nelikanttoru 120x80x3	L=250	EN 1.4301	1	
D3	Pürolüsaatori ülemine äärik	Plaat t=12	370x370	EN 1.4301	1	
D4	Pürolüsaatori alumine äärik	Plaat t=12	300x300	EN 1.4301	1	
D5	Gaasikäigu äärik	Plaat t=6	190x140	EN 1.4301	1	
D6	Ringkanali ülemine ots	Plaat t=2	215,5x215,5	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø152 t=1	L=2490	EN 1.4404	1	
		Ümartoru Ø60,3 t=2	L=120	EN 1.4404	1	DN50

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
D7	Poolkoksi keeviskoost				1	
D8	I poolkoksitoru	Nelikanttoru 50x50x2	L=250	EN 1.4301	1	
D9	II poolkoksitoru äärik	Plaat t=6	100x100	EN 1.4301	1	
D10	I poolkoksitoru äärik	Plaat t=6	120x120	EN 1.4301	1	
D11	Gaasitoru äärik	Plaat t=6	120x120	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø48,3 t=2	L=85	EN 1.4404	1	DN40
D12	Gaasitoru				1	
D13	Ümarlatt Ø12	Ümarlatt Ø12	L=200	EN 1.4404	1	
D14	Plaat 8	Plaat t=2	9x9	EN 1.4404	1	
E0	Ülemine koldetoru				1	
E1	Ülemise koldetoru korpus	Ümartoru Ø273	L=495	EN 1.4404	1	DN250
E2	Ülemise koldetoru alumine äärik	Plaat t=12	370x370	EN 1.4301	1	
E3	Ülemise koldetoru ülemine äärik	Plaat t=12	370x370	EN 1.4301	1	
E4	Ülemise koldetoru kaas	Plaat t=8	370x370	EN 1.4301	1	
E5	Suitsugaasikäik	Plaat t=2	575,6x246,3	EN 1.4301	1	
E6	Suitsugaasikäigu äärik	Plaat t=6	250x195	EN 1.4301	1	
F0	Kottfilter				1	
F1	Äärik 1	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	2	
F2	Äärik 2	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
F3	Otsasein 1	Plaat t=2	1847,1x600	EN 1.4301	1	
F4	Otsasein2	Plaat t=2	1847,1x600	EN 1.4301	1	
F5	Külgsein	Plaat t=2	1762,7x996	EN 1.4301	2	
F6	Elementide hoidja	Plaat t=2	996x596	EN 1.4301	1	
F7	Pörkesein	Plaat t=2	704x596	EN 1.4301	1	
F8	Plaat 9	Plaat t=2	155x155	EN 1.4301	1	
	Kottfiltri kate				1	
F10	Katteplaat	Plaat t=2	1000x600	EN 1.4301	1	

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
F11	Kaas	Plaat t=2	800x500	EN 1.4301	1	
F12	Käepide 1				1	
		Ümarlatt Ø25	L=450	EN 1.4404	1	
		Nurkraud 70x70x7	L=30	EN 1.4404	2	
		Ümartoru Ø114,3 t=2	L=100	EN 1.4404	3	DN100
G0	Poolkoksitsüklonid I ja II				1	
G1	I tsükloni monaaž 1				1	
D5	Gaasikäigu äärik	Plaat t=6	190x140	EN 1.4301	1	
G2	Tsüklonite silindriline korpus	Ümartoru Ø273,0 t=2	L=385	EN 1.4404	1	DN250
G3	I tsükloni gaasikanal 1	Nelikanttoru 120x80x3	L=240	EN 1.4301	1	
G4	I tsükloni gaasikanal 2	Nelikanttoru 120x80x3	L=185	EN 1.4301	1	
G5	Tsüklonite sisemine äärik	Plaat t=10	273x273	EN 1.4301	1	
G6	Äärik 3	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
G7	Tsüklonite kooniline korpus	Plaat t=2	678x646,8	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø88,9	L=100	EN 1.4404	1	DN80
G8	I tsükloni montaaž 2				1	
D5	Gaasikäigu äärik	Plaat t=6	190x140	EN 1.4301	1	
F1	Äärik 1	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
G9	I tsükloni gaaside väljumistoru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=500	EN 1.4404	1	DN100
G10	I tsükloni gaasikanal 3	Nelikanttoru 120x80x3	L=91	EN 1.4301	1	
G11	Tsüklonite kaas	Plaat t=8	273x273	EN 1.4301	1	
G12	Plahvatusklapi montaaž				1	
F2	Äärik 2	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
G13	Plahvatusklapi äärik	Plaat t=8	390x390	EN 1.4301	2	
G14	Plahvatusklapi koonus	Plaat t=2	381,1x378,6	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø114,3 t=2	L=400	EN 1.4404	1	DN100



Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
G15	II tsükloni montaaž 1				1	
D5	Gaasikäigu äärik	Plaat t=6	190x140	EN 1.4301	1	
G2	Tsüklonite silindriline korpus	Ümartoru Ø273,0 t=2	L=385	EN 1.4404	1	DN250
G5	Tsüklonite I ja II sisemine äärik	Plaat t=10	273x273	EN 1.4301	1	
G6	Äärik 3	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
G7	Tsüklonite kooniline korpus	Plaat t=2	678x646,8	EN 1.4301	1	
G16	II tsükloni gaasikanal 1	Nelikanttoru 120x80x3	L=91	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø88,9	L=365	EN 1.4404	1	DN80
G17	II tsükloni montaaž 2				1	
F2	Äärik 2	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
G11	Tsüklonite kaas	Plaat t=8	273x273	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø114,3 t=2	L=200	EN 1.4404	1	DN100
		Teraspoogen 90°	Ø114,3	EN 1.4404	1	DN100
H0	Õli- ja veeaurude jahutaja				1	
H1	Jahutaja keeviskoost 1				1	
H2	Jahutaja kest 1	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=2045	EN 1.4404	1	DN200
H3	Keermestatud toru	Ümartoru Ø33,7 t=3,2	L=60	EN 1.4404	2	DN25
H4	Jahutaja äärik	Plaat t=8	320x320	EN 1.4301	2	
H5	Jahutaja torulaud	Plaat t=8	214x214	EN 1.4301	2	
		Ümartoru Ø48,3 t=1,5	L=2000	EN 1.4404	7	DN40
H6	Jahutaja keeviskoost 2				1	
F2	Äärik 2	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
H4	Jahutaja äärik	Plaat t=8	320x320	EN 1.4301	1	
H7	Sisendi kooniline osa	Plaat t=2	314,8x302	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø114,3 t=2	L=70	EN 1.4404	1	DN100
		Ümartoru Ø219,1 t=2	L=25	EN 1.4404	1	DN200

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
H8	Jahutaja keeviskoost 3				1	
F2	Äärik 2	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
H3	Keermestatud toru	Ümartoru Ø33,7 t=3,2	L=60	EN 1.4404	1	DN25
H4	Jahutaja äärik	Plaat t=8	320x320	EN 1.4301	1	
H9	Õli ja vee väljumistoru	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=250	EN 1.4404	1	DN200
H10	Gaaside väljumistoru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=148	EN 1.4404	1	DN100
H11	Väljundi kooniline osa	Plaat t=2	252x252	EN 1.4301	1	
H12	Õlinõu				1	
H3	Keermestatud toru	Ümartoru Ø33,7 t=3,2	L=60	EN 1.4404	2	DN25
H13	Õlinõu ots	Plaat t=4	165x165	EN 1.4301	2	
		Ümartoru Ø168,3 t=2	L=250	EN 1.4404	1	DN150
I0	Tuhatsüklon				1	
E6	Suitsugaasikäigu äärik	Plaat t=6	250x195	EN 1.4404	1	
G6	Äärik 3	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
I1	Tuhatsükloni kest	Ümartoru Ø355,6 t=2,6	L=440	EN 1.4404	1	DN350
I2	Tuhatsükloni äärik	Plaat t=10	440x440	EN 1.4404	1	
I3	Tuhatsükloni koonuse äärik	Plaat t=4	358x358	EN 1.4404	1	
I4	Tsükloni kooniline osa	Plaat t=2	742,6x760,1	EN 1.4404	1	
I5	Tuhatsükloni suitsukanal plaat 1	Plaat t=2	575,1x190	EN 1.4404	1	
I6	Tuhatsükloni suitsukanali montaaž			EN 1.4404	1	
I7	Tuhatsükloni suitsukanali plaat 2	Plaat t=2		EN 1.4404	1	
I8	Tuhatsükloni suitsukanali plaat 3	Plaat t=2		EN 1.4404	1	
I9	Kaane montaaž				1	
F1	Äärik 1	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
I12	Tuhatsükloni kaas	Plaat t=10	440x440	EN 1.4404	1	
I10	Tsükloni suitsugaaside toru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=640	EN 1.4404	1	DN100
I11	Tsükloni suitsutoru jätk	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=265	EN 1.4404	1	DN100
I13	Pime äärik	Plaat t=6	200x200	EN 1.4301	1	
	Tuhatoru	Ümartoru Ø88,9	L=150	EN 1.4404	1	DN80
J0	Põlevkivi toitesõlm				2	
J1	Põlevkivikruvi koost				1	
J2	Põlevkivikruvi	Ümarlatt Ø40	L=505	EN 1.4404	1	
J3	Liugelaager	Ümarlatt Ø48	L=120	Pronks	1	
J4	Põlevkivikruvi korpus	Ümartoru Ø48,3 t=2	L=450	EN 1.4404	1	DN40
J5	Põlevkivikruvi kinnitusmuhv	Plaat t=12	48x48	EN 1.4301	1	
J6	Seib	Plaat t=2	48x48	Pronks	1	
J7	Põlevkivipunker				1	
J8	Eessein	Plaat t=2	735,3x402,4	EN 1.4301	1	
J9	Küljesein 1	Plaat t=2	677,8x402,4	EN 1.4301	1	
J10	Küljesein 2	Plaat t=2	677,8x402,4	EN 1.4301	1	
J11	Tagasein	Plaat t=2	649,9x402,4	EN 1.4301	1	
J12	Punkri kaas	Plaat t=2	467,4x467,4	EN 1.4301	1	
J13	Käepide 2				1	
		Ümarlatt Ø25	L=200	EN 1.4404	1	
		Nurkraud 70x70	L=30	EN 1.4404	2	
J14	Äärik 4	Plaat t=6	120x120	EN 1.4301	1	DN40
K0	Suitsugaaside jahutaja tuhapunker 1				2	
K1	Äärik 5	Plaat t=8	100x100	EN 1.4301	1	

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
K2	Tuhapunkri katteplaat 1	Plaat t=6	216x216	EN 1.4301	1	
K3	Tuhapunkri kooniline osa	Plaat t=2	509,3x452,3	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø219,1 t=2	L=250	EN 1.4404	1	DN200
		Ümartoru Ø42,4 t=2	L=125	EN 1.4404	1	DN32
		Keevitatud kuulkraan	DN100	EN 1.4404	1	
		Keevitatud kuulkraan	DN32	EN 1.4404	1	
L0	Suitsugaaside jahutaja tuhapunker 2				3	
F1	Äärik 1	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
K3	Tuhapunkri kooniline osa	Plaat t=2	509,3x452,3	EN 1.4301	1	
L1	Tuhapunkri katteplaat 2	Plaat t=6	216x216	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø219,1 t=2	L=250	EN 1.4404	1	DN200
		Keevitatud kuulkraan	DN100	EN 1.4404	2	
M0	Suitsugaaside jahutaja tuhapunker 3				2	
K3	Tuhapunkri kooniline osa	Plaat t=2	509,3x452,3	EN 1.4301	1	
M1	Äärik 6	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
M2	Tuhapunkri katteplaat 3	Plaat t=6	216x216	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø219,1 t=2	L=250	EN 1.4404	1	DN200
		Keevitatud kuulkraan	DN100	EN 1.4404	1	
		Keevitatud kuulkraan	DN80	EN 1.4404	1	
N0	Koldegaasi jahuti				1	
N1	Koldegaaside jahuti keeviskoost 1				1	
H3	Keermestatud toru	Ümartoru Ø33,7 t=3,2	L=60	EN 1.4404	2	DN25
N2	Jahutaja kest 2	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=2086	EN 1.4404	1	DN200
N3	Äärik-torulaud	Plaat t=8	320x320	EN 1.4404	2	
		Ümartoru Ø42,4 t=2	L=2092	EN 1.4404	9	DN32

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
N4	Gaaside sõlme montaaž				1	
F2	Äärik 2	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	1	
H4	Jahutaja äärik	Plaat t=8	320x320	EN 1.4301	2	
N5	Suitsugaaside sisenemistoru	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=275	EN 1.4404	1	DN200
N6	Suitsugaaside toru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=268	EN 1.4404	1	DN100
N7	Katteplaat	Plaat t=8	320x320	EN 1.4301	1	
N8	Koldegaaside jahuti keeviskoost 2				1	
F2	Äärik 2	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	2	
H4	Jahutaja äärik	Plaat t=8	320x320	EN 1.4301	1	
H9	Õli ja vee väljumistoru	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=250	EN 1.4404	1	DN200
H10	Gaaside väljumistoru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=148	EN 1.4404	1	DN100
N9	Väljundi kooniline osa	Plaat t=2	507,5x451,9	EN 1.4301	1	
		Ümartoru Ø114,3 t=2	L=50	EN 1.4404	1	DN100
O0	Ühendus gaasitoru				1	
F1	Äärik 1	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	2	
O1	Torupõlve esimene pool	Teraspoogen 90°	Ø114,3	EN 1.4404	1	DN100
O2	Torupõlve teine pool	Teraspoogen 90°	Ø114,3	EN 1.4404	1	DN100
	Torupõlvede ühendustoru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=270	EN 1.4404	1	DN100
P0	Jääkgaaside kolle				1	
P1	Kolde korpus	Ümartoru Ø219,1 t=2	L=1000	EN 1.4404	1	DN200
P2	Vaateava toru	Ümartoru Ø48,3 t=3,2	L=60	EN 1.4404	1	DN40
P3	Vaateava äärik 1	Plaat t=20	110x110	EN 1.4301	1	
P4	Jääkgaaside alumine äärik	Plaat t=12	330x330	EN 1.4301	1	
P5	Jääkgaaside ülemine äärik	Plaat t=8	330x330	EN 1.4301	1	
P6	Vaateava äärik 2	Plaat t=6	110x110	EN 1.4301	1	
R0	Gaaside jahutaja				1	
F1	Äärik 1	Plaat t=8	200x200	EN 1.4301	2	

Joonise no.	Nimi	Kirjeldus	Mõõdud	Materjal	Kogus	Standard- mõõde
R1	Jahutaja kest	Ümartoru Ø168,3 t=2	L=2300	EN 1.4404	1	DN150
R2	Gaasitoru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=172,5	EN 1.4404	1	DN100
R3	Jahutusvee toru	Ümartoru Ø26,9 t=2,6	L=60	EN 1.4404	2	DN20
R4	Alumine torulaud-äärik	Plaat t=12	162x162	EN 1.4301	1	
R5	Ülemine äärik	Plaat t=8	280x280	EN 1.4301	1	
R6	Ülemine torulaud	Plaat=8	162x162	EN 1.4301	1	
R7	Jahutaja kaas	Plaat t=6	280x280	EN 1.4301	1	
	Jahutaja toru	Ümartoru Ø48,3 t=2	L=2100	EN 1.4301	4	DN40
S0	Jäägaaside põleti				1	
F1	Äärik 1				1	
S1	Jääkgaaside põleti sisemine kest				1	
S2	Abipõleti toru tugi				1	
S3	Plaat 10	Plaat t=2	158,9x12	EN 1.4301	1	
S4	Plaat 11	Plaat t=2	28,5x12	EN 1.4301	4	
S5	Õhukarbi sisemine kest	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=88	EN 1.4404	1	DN100
S6	Abipõleti fiksaator	Plaat t=4	44x44	EN 1.4301	1	
S7	Õhukarbi põhi	Plaat t=2	164x164	EN 1.4301	1	
S8	Põleti kest	Ümartoru Ø168,3 t=2	L=264	EN 1.4404	1	DN150
S9	Suitsugaasi toru	Ümartoru Ø114,3 t=2	L=200	EN 1.4404	1	DN100
S10	Puhastusava toru	Ümartoru Ø42,4 t=3,2	L=40	EN 1.4404	1	DN32
S11	Õhutoru	Ümartoru Ø33,7 t=3,2	L=170	EN 1.4404	1	DN25
S12	Põleti äärik	Plaat t=10	330x330	EN 1.4301	1	
S13	Põleti põhi	Plaat t=6	164x164	EN 1.4301	1	
S14	Abipõleti toru äärik	Plaat=6	110x110	EN 1.4301	1	
S15	Gaasitoru äärik	Plaat t=4	110x110	EN 1.4301	1	