



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut

Soojusjõuseadmete õppetool

MST40LT

Jan Mustjõgi

**TUHA MASSIVOOGUDE ANALÜÜS KOLDES KÜLMKATSETAMISEL
60kW TSIRKULEERIVA KEEVKIHIGA KATLASTENDIL**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb

tehnikateaduste

bakalaureuse kraadi

Tallinn 2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Dmitri Nešumajevi juhendamisel

“.....”2015 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”2015 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”2015 a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

Soojusjõuseadmete õppetool

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2015. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Jan Mustjõgi, 112475

Õppekava: MASB02/09

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: vanemteadur Dmitri Nešumajev

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Tuha massivoogude analüüs koldes külmkatsetamisel 60kW tsirkuleeriva keevkihiga katlastendil.

Estimation of solids mass flow rate during cold test in a 60kW_{th} pilot scale circulating fluidized bed.

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr.	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Töö ülesande teoreetiline püstitus	1.03.2015
2.	Katsete teostamine	17.03.2015
3.	Katsete arvutisse sisestamine ning töötlemine	01.05.2015
4.	Täiendavad konsultatsioonid, lisamaterjalide töötlemine	20.05.2015
5.	Töö vormistamine	31.05.2015

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Uurida, kuidas tahkete osakeste massivoog muutub koldes erinevate õhu kiiruste juures.

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt 25.05.2015

Töö esitamise tähtaeg: 04.06.2015

Üliõpilane Jan Mustjõgi /allkiri/

kuupäev.....

Juhendaja Dmitri Nešumajev /allkiri/

kuupäev.....

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON	2
BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE	3
SISUKORD	4
EESSÕNA	7
1. SISSEJUHATUS	8
2. TÖÖ TEOREETILISEDALUSED	10
2.1. Keevkihi režiimid	11
2.1.1. Seisev kiht	11
2.1.2. Homogeenne keevkiht	12
2.1.3. Heterogeenne ehk mulliv keevkiht	12
2.1.4. Turbulentne keevkiht	13
2.1.5. Kiirrežiim ehk tsirkuleeriv keevkiht	13
2.1.6. Pneumotransport	14
2.2. Tsirkuleeriva keevkihttehnoloogia kasutamine põlevkivi põletamiseks Eestis	14
2.2.1 Foster Wheeleri katlad Narva elektrijaamades	14
2.2.2. Alstom Power System S.A Auvere elektrijaam	15
2.3. Keevkihi osakeste süsteemi iseloomustavad suurused	16
2.3.1. Osakeste klassifikatsioon	16
2.3.2. Pindkiirus	17
2.3.3. Poorsus	19
2.3.4. Kujutegur	20
2.3.5. Kihi aerodünaamilise takistuse Δp sõltuvus pindkiirusest u	20
2.3.6. Osakese terminaalkiirus	21
2.4. Tsirkuleeriva keevkihi tsirkulatsiooni arvu määramine	23
2.4.1. Massivoog tsirkuleerivas keevkihis	23

3. KATSED	30
3.1. Katses kasutatud kihi materjali kirjeldamine	30
3.1.1. Tuha sõelanalüüs	30
3.1.2. Tuha agregaattiheduse määramine	31
3.2. Katsed väiksel külmkatsetendil	32
3.2.1. Katseseadme kirjeldus.....	32
3.2.2. Väiksel külmkatsetendil saadud tulemuste analüüs.....	34
3.3. 60kW Tsirkuleeriva keevkihiga katlastend	37
3.3.1 Katseseadme kirjeldus.....	37
3.3.2. Resti takistuse määramine	39
3.3.3. Külmkatsetus tsirkuleeriva keevkihiga katlastendil.....	40
3.4. Katsetulemuste analüüs	41
3.4.1 Osakeste keskmine tihedus.....	41
3.4.2 Transportkiiruse U_{tr} ja piirkiiruse U_{se} leidmine	41
3.4.3. Massivoog koldes külmkatsetusel.....	42
4. KOKKUVÕTE.....	47
5. SUMMARY	48
6. KASUTATUD ALLIKAD.....	49

Sele 2.1 Tahkeosakestest ja gaasilisest keskkonnast koosneva kahefaasilise süsteemi võimalikud aerodünaamilised olekud.....	11
Sele 2.3.1 Geldarti diagramm.....	16
Sele 2.3.5 Minimaalse pindkiiruse määramine.....	21
Sele 2.4.1.-1 Tsirkuleeriva keevkihi režiimi kirjeldamiseks koostatud diagramm.....	24
Sele 2.4.1.-2 Rõhugradiendi muutus koldes erinevate gaasi kiiruste juures.....	25
Sele 2.4.1.-3 Väljauhtediagramm.....	26
Sele 3.1.1 Tuhaosakeste suurusjaotus (täisjääk).....	31
Sele 3.2.1.-1 Väike külmkatsestend.....	33
Sele 3.2.1.-2 Väikse külmkatsestendi resti takistus.....	33
Sele 3.2.2.-1 Rõhulangu ja õhukiiruse vaheline seos.....	35
Sele 3.2.2.-2 Tuha kihi rõhulangu ja õhukiiruse vaheline seos.....	35
Sele 3.3.1 Ringleva keevkihiga katlastendi skeem.....	38
Sele 3.3.2 Resti takistuse graafik.....	40
Tabel 2.3.6 Konstantide a_1 ja b_1 väärtused sõltuvalt Reynoldsi arvust.....	22
Tabel 3.1.1 Tuha sõelanalüüsi tulemused (osajäägid).....	30
Tabel 3.1.2 Tuha erifraktsioonide ja keskmine tihedus.....	32
Tabel 3.2.2 Katse tulemuste põhjal arvutatud väärtused.....	36
Tabel 3.3.3 Külmkatsetusel saadud andmed.....	41
Tabel 3.4.2 Katseandmete põhjal arvutatud tulemused.....	46

EESSÕNA

Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika instituuti rajati projekti „CO₂ heitmete vähendamine põlemisõhu hapnikurikkamaks muutmiseks keevkihtkatlas“ raames 60kW ringleva keevkihiga katlastend. Katlastend on värskest valminud ning puudub detailne ülevaade stendi parameetritest. Sealt tuli idee analüüsida tuha massivoogude liikumist koldes.

Töö koostamine toimus Soojustehnika instituudis vanemteadur Dmitri Nešumajevi juhendamisel. Lisaks olid materjalide kogumisel abiks juhtivteadur Tõnu Pihu ning teadur Lauri Loo. Katseid aitas teostada ja tulemusi mõõta insener Martin Maidre.

Siinkohal avaldan tänu juhendajale ja teistele abistamise ning nõuannete eest töö kirjutamisel.

1. SISSEJUHATUS

Põlevkivi kaevandamise ja kasutamisega on seotud paljud negatiivsed keskkonnamõjud elusloodusele, õhule, maastikule ja pinnasele. Põlevkivitööstus on viimasel kümnendil teinud läbi suuri muutusi, et vähendada keskkonda saastavaid heitmeid. Üks oluline vahend selle saavutamisel on vana tolmpõletustehnoloogia asendamine tsirkuleeriva keevkihtpõletusega [1].

Tahkekütuse keevkihtpõletamine on väga perspektiivne suund soojuselektrijaamades. Keevkiht on peente tahkeosakeste hõljumsüsteem gaasivooluses, mille sisemine liikumine annab talle vedeliku omadused ning tekib nn pseudovedelik. Tahkeosakeste kiht muutub gravitatsiooniväljas keevkihiks juhul, kui selles läbipuhutava gaasivooluse dünaamiline rõhujõud osakestele tasakaalustab nende raskusjõu [2].

Tsirkuleeriva keevkihi omapäraks on see, et koldest väljuv põlemisgaas koos osakestega suundub separaatorisse, kus põlevkivi puhul tuhaosakesed eraldatakse ning suunatakse koldesse tagasi. Sel viisil luuakse tahkete osakeste ringlus, mis aitab kontrollida koldes põlemistemperatuuri [2].

Põlevkivi keevkihtpõletamisel seotakse väävel täielikult tuhaga ja seetõttu vääveldioksiidi põlemisgaasis peaaegu ei olegi. Seega ei vaja keevkihtkatlad väävli sidumiseks absorbenti ega gaasi katlaväljast puhastamist väävlist. Selle põhjus seisneb selles, et põlevkivil on suur moolsuhe Ca/S ja karbonaatmineraalide termilisel lagunemisel tekib vaba lubi, mis on aktiivne väävli siduja [2]. Tänu intensiivsele soojusülekandele keskkonna ja osakeste vahel on keevkihis põlemistemperatuurid palju madalamad kui tolmpõletamisel – põlevkivi puhul ideaalis 800 – 850 °C. Madal põlemistemperatuur ning jämedama fraktsiooniga kütus võrreldes tolmpõletusel vähendab põlevkivis CaCO₃ lagunemist ning seeläbi väheneb ka CO₂ emissioon ning paraneb katla efektiivsus võrreldes tolmpõletuskateldega. Võrreldes tolmpõletusega eraldub keevkihttehnoloogiat kasutades märkimisväärselt vähem heitmeid. Eesti Elektriijaama renoveeritud 8.energiaploki mõõtmistel saadi SO₂ emissiooni tulemusteks 5-20 mg/Nm³, tolmpõletustehnoloogiat kasutades oli tulemuseks ca 2000 mg/Nm³. NO_x tulemuseks saadi 90-120 mg/Nm³, samal ajal kui tolmpõletuse puhul oli see näitaja ca 300 mg/Nm³. Heitmete tekkimise koha pealt on keevkihtpõletamisel kaalukas eelis tolmpõletustehnoloogia ees [3].

Tallinna Tehnikaülikooli ehitati projekti „CO₂ heitmete vähendamine põlemisõhu hapnikurikkamaks muutmisega keevkihtkatlas“ raames ainulaadne 60kW tsirkuleeriva keevkihiga katlastend, millega on võimalik uurida nii oxy-fueltehnoloogia kasutamist põlevkivi põletamiseks kui ka näiteks põlevkivi ja biokütuse koos põletamist keevkihis. Antud lõputöö eesmärgiks oli analüüsida tuha massivoogude liikumist koldes erinevate õhukiiruste juures ning arvutuslikult määrata tuha massivood külmkatsetusel.

2. TÖÖ TEOREETILISEDALUSED

Keevkiht põletustehnika põhineb gaasi või vedeliku voolamises läbi tahkete osakeste kihi kiirusel, millest piisab, et vabastada osakesed üksteisest ning moodustada pulseeriv aerodünaamiline süsteem, mis käitub vedelikule sarnaselt, mistõttu on keevkiht tuntud ka kui pseudovedelik [4].

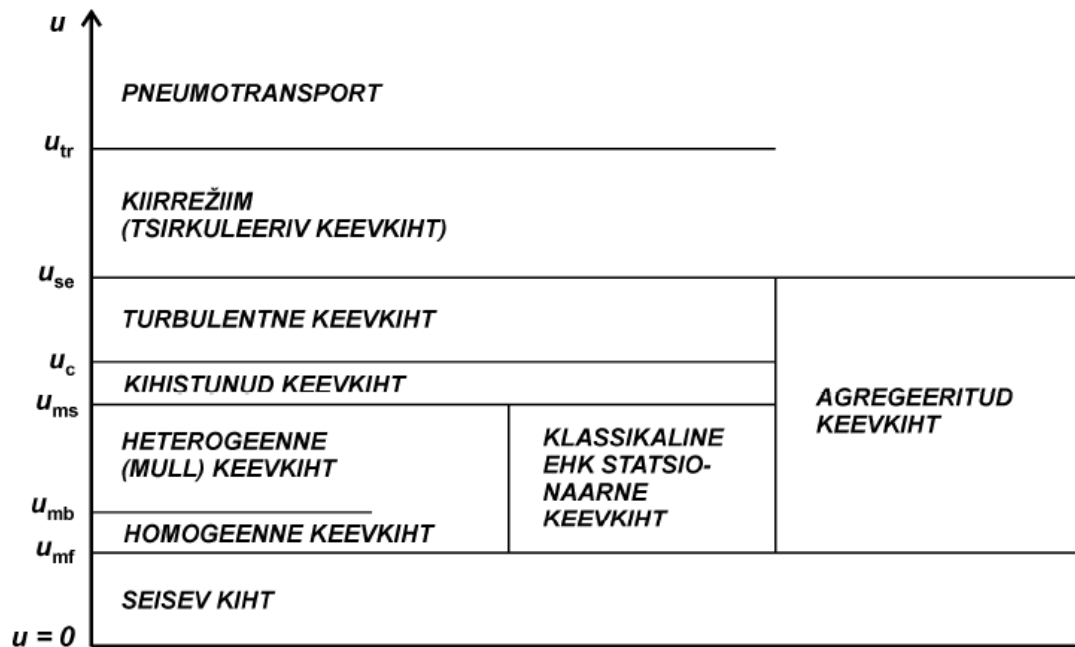
Keevkihti nimetatakse pseudovedelikuks, sest tal on palju vedelikega sarnaseid omadusi. Peamisteks sarnasusteks on:

- Staatiline rõhk suvalisel kõrgusel on võrdne kihi massiga ristlõikepindala kohta, mis on selle punkti kohal.
- Objekt, mille tihedus on kihi materjalist suurem, vajub põhja ning väiksema tihedusega keha ujub pinnal.
- Tahked osakesed on võimalik kihist välja juhtida nagu vedelikku. Osakeste voolus on sarnane veevoolule, kui anumad läbi düüsi tühjendada
- Keevkiht säilitab horisontaalse taseme hoolimata selles, kuidas kihti kallutada. Samuti, kiht võtab anuma kuju.
- Kihis on osakesed hästi segunenud ning kuumutades jaotub temperatuur kihis ühtlaselt [5].

Püsikihi üleminek keevkihiks algab minimaalsel pindkiirusel u_{mf} ning on tuntud ka kui esimene kriitiline keevkihi tekkekiirus. Kui gaasi kiirus ületab tahkefaasi pneumotranspodi kiirust, siis kantakse tahkeosakesed gaasi poolt kihist kaasa. Kiirust, mille ületamisel viiakse osakesed gaasivoolusega kaasa, nimetatakse teiseks kriitiliseks kiiruseks ehk transpordikiiruseks. Tsirkuleeriva keevkihiga põletustehnoloogia korral koldest väljakanduvad osakesed püütakse kinni ja suunatakse koldesse tagasi, millega tagatakse tahkefaasi katkematu ringlus [2].

Keevkiht kui heterogeenne süsteem võib eksisteerida kahe piiroleku vahel. Esimene nendest on seisev kiht ja teine nn pneumotransport. Kahefaasilisel süsteemil võib olla erinevaid aerodünaamilisi režiime, mille eksisteerimise määravad osakeste omadused. Osakeste omaduste põhjal jagatakse režiimid nelja kategooriasse – liikumatu kiht, agregeeritud keevkiht, kiirkeevkiht ja pneumotransport. Agregeeritud keevkiht jagatakse omakorda neljaks

alarežiimiks – homogeenne, heterogeenne, kihiline ja turbulentne. Vaadeldava kahefaasilise süsteemi võimalikud aerodünaamilised olekud pindkiiruse tõustes on näidatud joonisel (Sele 2.1.) [2].



Sele 2.1. Tahkeosakestest ja gaasilisest keskkonnast koosneva kahefaasilise süsteemi võimalikud aerodünaamilised olekud [2].

2.1. Keevkihi režiimid

2.1.1. Seisev kiht

Kihti, kus kihimaterjal on liikumatult restil, millest gaasi läbi puhutakse, nimetatakse seisvaks kihiks või ka püsikihiks. Selles režiimis osakesed üksteise suhtes eriti ei liigu ning gaas voolab läbi osakeste vaheliste tühimike. Lävivoolav gaas avaldab osakestele tõmbejõudu, mis põhjustab rõhulangust kihis. Seda iseloomustab tõmbejõu koefitsient C_d (ingl.k.– drag force coefficient) [5]. Püsikihi üleminek keevkihiks algab pindkiirusel u_{mf} , siis kui osakesed hakkavad üksteise suhtes liikuma ning tekib kindlate omadustega pseudovedelik ehk

keevkiht. Kiirustel, mis on väiksemad kui u_{mf} kihi poorsus ei muutu. Kiirusele u_{mf} vastab kihi poorsus ϵ_{mf} [2].

2.1.2. Homogeenne keevkiht

Kiiruse edasisel suurenemisel kasvab kihi poorsus ja kõrgus ning võib moodustuda kas homogeenne või heterogeenne keevkiht. Homogeense kihi tekkimine sõltub osakeste omadustest (vt. Sele 2.3.1. Geldarti diagramm). Geldarti diagrammi osakeste klassifikatsiooni järgi võib homogeenne keevkiht tekkida A kategooria materjali puhul. Homogeenne keevkiht on stabiilne ja selgelt väljenduva eralduspinnaga, kuid pole välistatud osakeste mõningane pulsatsioon kihipealses tsoonis [2].

2.1.3. Heterogeenne ehk mulliv keevkiht

Minimaalsel pindkiirusel u_{mf} , käitub kiht kui pseudovedelik. B ja D kategooria materjalide puhul on võimalik, et edasisel gaasi kiiruse suurendamisel siseneb lisagaas kihti mullidena. Kihi osa, mis jääb mullidest välja nimetatakse tahkeks faasiks, milles gaasi kiirus on ikka võrdne minimaalse pindkiirusega u_{mf} ja kihi poorsus vastab ikka minimaalsele pindkiirusele vastavale poorsusele ϵ_{mf} . A kategooria osakestega kihis aga ei moodustu mulle enne kui gaasi kiirus ei ületa kiirust u_{mb} , mis tähistab minimaalset mullide tekke kiirust. Kiirus u_{mb} lahutab homogeenset ja heterogeenset režiimi [6].

Mullid on gaasitühimikud, milles on väga vähe või pole üldse kihimaterjali sees. Tänu kihi üleslükkejõule tõusevad mullid kihis ülespoole, möödudes kihi osakestest. Mullide suurus sõltub tahke materjali osakeste diameetrist d_p ning kasvavad osakeste diameetri suurenedes. Lisaks sõltub mullide suurus gaasi kiirusest – mida rohkem antud hetkel gaasi kiirus u minimaalset pindkiirust u_{mf} ületab, seda suuremad on mullid. Mullid saavad suureneda ainult kuni oma maksimaalse stabiilse suuruseni D_{max} [6].

Mullid kannavad tõustes endaga kaasa kihiosakesi. Kui mullid lõhkevad kihi pinnal, siis viskavad või lennutavad nad osakesi mullilise keevkihi kohale. Lendu paisatud osakesed liiguvad ülespoole tänu inertsile ning gaaside tõmbejõule. Osa osakesi vabanevad gaaside

tõmbejõust ning kukuvad gravitatsiooni mõjul tagasi kihti. Osakeste vabanemine gaasivooluse tõmbejõust vähendab osakeste ülespoole suunatud voolust eksponentsiaalselt kõrguste kasvades. Peale kindlaks määratud kõrgust, nimetusega TDH (ingl. k. „transport disengaging height“), on vabanenud osakeste arv tühine. Voolust, mis kannab osakesi minema peale kõrgust TDH, nimetatakse väljauhteks (ingl. k. elutriation) [6].

2.1.4. Turbulentne keevkiht

Kiiruse edasisel suurenemisel hakkab kujunema suure kiirusega keevkihtkategoriasse kuuluv ühtlase struktuuriga turbulentne kiht. Kasvab kihist väljakanduvate ja teisest kriitilisest kiirusest kiiremalt liikuvate osakeste arv. Turbulentset kihti iseloomustab osakeste kolooniate ja gaasitühimike teke ning nende sööstliikumine edasi-tagasi. Kihil on küll ülemine piir, ent see pole selgelt määratletav [2].

Selles staadiumis kõigub rõhulang kihis ebaregulaarselt. Kõikumise amplituud on kõige suurem turbulentse kihi alguses kiirusel u_c ning saavutab stabiilse väärtuse kiiruse edasisel kasvamisel kuni turbulentse oleku piirkiiruseni u_k [6].

2.1.5. Kiirrežiim ehk tsirkuleeriv keevkiht

Suurematel pindkiirustel kui turbulentse oleku piirkiirus u_k , läheb turbulentne süsteem üle nn kiirrežiimi, kus palju osakesi kandub süsteemist välja. Taoline režiim on tüüpiline tsirkuleeriva keevkihiga koldele. Nagu turbulentse kihi puhulgi, puudub ka siin kihil selge lahtuspind. Tsirkuleeriva keevkihtprotsessi korral koldest väljunud osakesed püütakse kinni ja suunatakse tagasi kolde restile. Seetõttu on restilähedases tsoonis osakeste kontsentratsioon suurem kui restipealses ruumis, samuti esineb koldesisene tsirkulatsioon. Restile tagasi suunatud osakesed ning nende kolooniad liiguvad kolde südamikus üles ning valguvad seinaga äärt mööda tagasi restile [2].

2.1.6. Pneumotransport

Suuremal kiirusel kui kiirrežiimi oleku piirkiirus u_{tr} , süsteemis algab nn pneumotransport. Selles olekus puudub tahkefaasi suure kontsentratsiooniga tsoon restipealses alas, kui välja arvata osakesi kiirendav osa. Tahkefaasi tihedus muutub kolde kõrguse ulatuses vähe, kuid ei ole välistatud harvade tahkeosakeste kolooniate teke seinäärses alas [2].

2.2. Tsirkuleeriva keevkihttehnoloogia kasutamine põlevkivi põletamiseks Eestis

Eesti on maailma juhtivriik põlevkivi kasutamises elektrienergia toomiseks. Põlevkivi kaevandamine ja põlevkivil töötavad elektrijaamad asuvad Ida-Eestis ning põhimõtteliselt ongi kogu põlevkivist elektrienergia tootmine koondunud sinna.

Eesti kogemused tsirkuleeriva keevkihttehnoloogia kasutamisega on seotud kahe ettevõttega – Foster Wheeler OY ning Alstom Power System S.A. Neist esimene ettevõtte ehitas varem tolmpõletustehnoloogiat kasutanud 8. energiablokki Eesti Elektriijaamas ja 11. energiablokki Balti Elektriijaamas uued tsirkuleeriva keevkihiga katlad, sealjuures turbiinid jäid vanadeks ning need renoveeriti. Mõlemasse plokki ehitati kaks keevkihtkatelt. Alstom võitis pakkumise rajada Eesti Elektriijaama kõrvale Auverre uus tsirkuleerival keevkihttehnoloogial põhinev monoplokk ehk ehitatakse uus katel ja turbiin [3].

2.2.1 Foster Wheeleri katlad Narva elektrijaamades

Foster Wheeler renoveeris Narva elektrijaamades kaks energiablokki. Neist esimene asub Eesti Elektriijaamas ning on soojusliku koguvõimsusega 500 MW_{th}. Teine asub Balti Elektriijaamas ning on samuti koguvõimsusega 500 MW_{th}. Nominaalkoormusel on katelde eeldatav kasutegur 88-90% ning termodünaamiline kasutegur on 35-36% [7].

Foster Wheeler kasutas antud katelde juures paari uuendust, mis on ennast täielikult tõestanud. Antud katelde juures kasutati kompakset disaini, kus tahkete osakeste eraldaja muutus integreeritud osaks põlemiskambri ning uuenduslik integreeritud soojusvaheti (ingl.k integrated heat exchanger – INTREX™). Nende uuenduste tulemusel integreeriti tahkete osakeste eraldaja, retsirkulatsioonisüsteem ja kolle ühtsesse jahutatud paneeli. Selle tulemusel väheneb ökoloogiline jalajälg ning suureneb tulekindlus. Veelgi enam kasu tõi INTREX'i kasutamine. See soojusvaheti paikneb põlemiskambri alumises osas, väljaspool peamisest põlemistsoonist. Selle peamine eelis seisnebki tema asukohas. Olles eemal põlemiskambri alumises osas, ei kahjusta INTREX'i suitsugaasides olevad kahjulikud komponendid. Kasutades seda soojusvahetit kui ülekuumendit on võimalik saavutada kõrgeid temperatuure, sest ülekuumendi on kaitstud korrosiooni tekitava keskkonna eest. Foster Wheeleri ringlev keevkihttehnoloogia on end tõestanud ning on Eesti põlevkivi põletamiseks sobiv [8].

2.2.2. Alstom Power System S.A Auvere elektrijaam

Rajatava elektrijaama peamised tehnilised parameetrid on:

- Võimsus: 300MW_{el}
- Katla maksimaalne aurutootlikus – 850 t/h
- Põlevkivi massikulu – 299 t/h
- Ülekuumendatud auru parameetrid – 178 bar; 543 °C

Foster Wheeler ja Alstom katlad erinevad üksteisest märkimisväärselt. Alstom on projekteerinud ühe suure monoploki erinevalt Foster Wheelerist, mis kasutas ühe energiaploki kohta kahte katelt. Alstomi lahendus peaks tagama parema sekundaarõhu sisestamise ning parema kütuse ja õhu segunemise.

Alstomi katlale on projekteeritud 4 tsüklonit, millel puudub jahutus. Tegemist on keeramiliste tsüklonitega, mille kandekonstruktsioon on terasest.

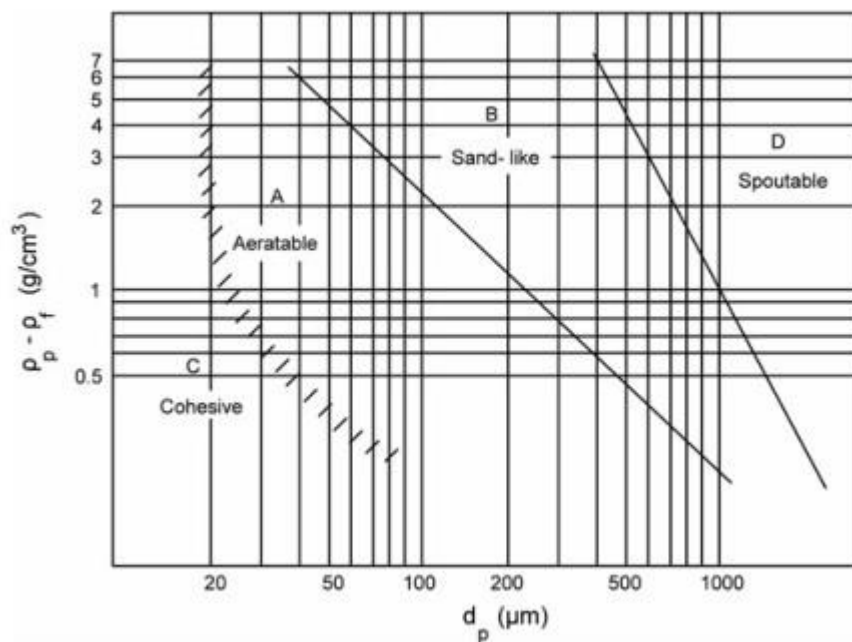
Foster Wheeler kasutas oma patenteeritud INTREXi, siis Alstomi lahenduse puhul on kasutusel EHE (ingl.k external heat exchanger). EHE-s koldesse tagastatav tuhk jahutatakse. Jahutatud tuha koldesse suunamine aitab kontrollida koldes põlemistemperatuure.

Auvere elektrijaam on hetkel veel valmimisjärgus. Käesoleva aasta mai alguses ühendati jaam esmakordselt elektrivõrku. Jaama katsetamine ja seadistamine jätkub ning üleandmine peaks toimuma 2015 aasta lõpus [9].

2.3. Keevkihi osakeste süsteemi iseloomustavad suurused

2.3.1. Osakeste klassifikatsioon

Hindamaks keevkihttehnoloogia seisukohalt kihis kasutatavate materjalide omadusi, klassifitseeris D.Geldart (1972) kihi materjali osakesed osakeste mõõtmete ja osakeste ning gaasi tiheduste vahe ($\rho_p - \rho_f$) järgi nelja gruppi: A, B, C ja D (Sele 2.3.1.). Selline osakeste jagamine on oluline, et mõista osakeste käitumist keevkihis, sest samasuguste töötingimuste juures võivad erinevate piirkondade osakesed käituda üksteisest täiesti erinevalt [5].



Sele 2.3.1. Geldarti diagramm [6].

Piirkonda C kuuluvad osakesed on väikeste mõõtmetega ning on tüüpiliselt väiksemad kui $30\mu\text{m}$ ($\rho_p = 2500\text{kg/m}^3$). Nende osakeste vahelised jõud on võrreldavad gravitatsioonijõuga, mis nendele osakestele avaldub. Seega on neist väga raske tekitada keevkihti. Keevkihti tekitamise eesmärgil gaasi kihist läbilaskmine lõppeb tihti sellega, et kihti tekkivad gaasikanalid. Nende osakeste kasutamiseks keevkihis on vaja kasutada välismõjutusi [5].

Piirkonda A kuuluvad osakesed suurusega 30 kuni $100\mu\text{m}$ ($\rho_p = 2500\text{kg/m}^3$). Need osakesed sobivad keevkihi moodustamiseks väga hästi, aga A kategooria osakestest koosnev kiht paisub enne mullide teket väga palju. Paljud tsirkuleerivad keevkihisüsteemid kasutavad piirkonda A kuuluvad osakesi [5].

Piirkonda B kuuluvad osakesed mõõtmetega $100 - 500\mu\text{m}$ (kui $\rho_p = 2500\text{kg/m}^3$). Need osakesed sobivad samuti keevkihi moodustamiseks väga hästi ning esimesed mullid tekivad praktiliselt kohe kui minimaalne pindkiirus u_{mf} on ületatud. Enamus keevkihtkatlaid kasutab selle piirkonna osakesi [5].

Piirkonda D kuuluvad osakesed on kõige suuremad ($>500\mu\text{m}$) (kui $\rho_p = 2500\text{kg/m}^3$). Nende osakeste keevkihis kasutamine eeldab palju suuremate gaasi kiiruste kasutamist [5]. Keevkihttehnoloogiaid on sellesse piirkonda kuuluvate osakeste puhul üldiselt raskesti rakendatavad [2].

2.3.2. Pindkiirus

Kui gaasivoolu kiirust, mis läbib seisvat kihti, suurendada, siis rõhulang suureneb kuni voolukiirus jõuab keevkihi tekitamiseks vajaliku minimaalse kiiruseni u_{mf} . Osakesed pole enam omavahel seotud ning tekib pseudovedelik [5].

Kiiruse u_{mf} eksperimentaalne määramine tugineb enamikel juhtudel kihi aerodünaamilise takistuse muutusele pindkiirusest olenevalt. Piirkiirus u_{mf} sõltub osakese Reynoldsi ja Archimedese arvust ja selle arvutamiseks on soovitatud mitmeid valemeid, millest üks võimalik on [2]

$$\text{Re}_{mf} = \sqrt{27,2^2 + 0,0408\text{Ar}} - 27,2 \quad (2.1)$$

kus Re_{mf} - on keevkihi esimesele kriitilisele tekkekiirusele vastav Reynoldsi arv

$$\text{Re}_{mf} = \frac{u_{mf} d_p}{\nu}, \quad (2.2)$$

Archimedese arv

$$\text{Ar} = \frac{g d_p^2}{\nu^2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right), \quad (2.3)$$

d_p – osakese läbimõõt, m

ν – gaasilise keskkonna kinemaatiline viskoossus, m^2/s

g – raskuskiirendus; m/s^2

ρ_s – osakese tihedus; kg/m^3

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m^3

Keevkihi tekitamiseks minimaalne pindkiirus u_{mf} ehk esimene kriitiline keevkihi tekkekiirus on aga üks paljudest pindkiirustest, mis keevkihis esineb. Iga režiimi üleminek järgmisesse toimub erinevatel kindlatel pindkiirustel.

Homogeenne keevkiht esineb kiirustel $u_{mf} \leq u \leq u_{mb}$, kus kiirus u_{mb} on homogeenet ja heterogeenset režiimi lahutav kiirus.

Heterogeenne keevkiht võib eksiteerida vahemikus $u_{mb} \leq u \leq u_{ms}$, kus kiirusel u_{ms} tekib kihistunud keevkiht.

Kihistunud keevkiht eksisteerib kiiruste vahemikus $u_{ms} \leq u \leq u_c$, kus kiirusel u_c algab turbulentne kiht.

Keevkihi turbulentne režiim esineb pindkiiruste vahemikus $u_c \leq u \leq u_k$, kus kiirusest u_k suurematel kiirustel läheb turbulentne režiim üle kiirrežiimi.

Kiirrežiim esineb pindkiiruste vahemikus $u_k \leq u \leq u_{tr}$, kus suuremal kiirusel, kui kiirrežiimi oleku piirkiirus u_{tr} , algab nn pneumotransport [2].

2.3.3. Poorsus

Poorsus ε on puistematerjali omadus, mida kasutatakse eriti peenete osakestega kihi ja pulbrite iseloomustamisel. Poorsust ε defineeritakse kui pooride ehk tühimike mahu suhet kogu mahtu. Kihi poorsus mängib olulist rolli minimaalse keevkihi tekkekiiruse u_{mf} määramisel. Mida madalam on poorsus, seda suurem peab olema gaaside kiirus kihis [10].

Poorsuse kaudu on võimalik avaldada kahefaasilise süsteemi tihedust [2].

$$\rho_k = \varepsilon\rho_f + (1 - \varepsilon)\rho_s, \quad (2.4)$$

ρ_f - gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s - osakese tihedus, kg/m³

Antud töös määrati poorsus katseliselt keevkihi rõhulangu valemit kasutades. Rõhulang on valitud minimaalse pindkiiruse u_{mf} järgi.

$$\Delta p_{mf} = H_{mf}(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad [11] \quad (2.5)$$

Millest saame, avaldades poorsuse ε_{mf}

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\Delta p_{mf}}{(\rho_s - \rho_f)gH_{mf}}, \quad (2.6)$$

ε_{mf} – poorsus minimaalsel pindkiirusel;

Δp_{mf} – rõhulang minimaalse pindkiiruse järgi, Pa

ρ_s – osakese tihedus, kg/m³

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m³

g – raskuskiirendus, 9,81 m/s²

H_{mf} – kihi kõrgus minimaalsel pindkiirusel, m

2.3.4. Kujutegur

Keevkihi aerodünaamiline režiim ja piir- ehk kriitilised kiirused sõltuvad osakeste mõõtmetest, nende aerodünaamilisest kujust ja tihedusest [2]. Kujutegur iseloomustab osakese erinevust sfäärilisest osakesest. Näiteks ideaalne sfääriline keha omaks kujutegurit $\varphi_s = 1,0$ [5]

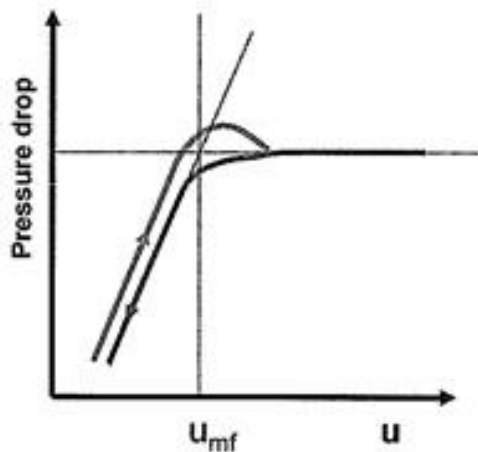
Kujuteguri φ_s arvutamiseks kasutatakse valemit

$$\varphi_s = \frac{\text{ruumalalt võrdse osakese sfääriline pindala}}{\text{tegeliku osakese pindala}} = \frac{\pi d_p^2}{S}, \quad (2.7)$$

Kujuteguri väärtus sõltub materjalist ning näiteks liival, mida kasutatakse keevkihttehnoloogias väga tihti, on kujutegur $\varphi_s = 0,66 - 0,86$. Osakeste kujutegur määratakse sageli katseliselt. Selleks võrreldakse katsega määratud tegeliku geomeetrilise kujuga osakese aerodünaamilist takistustegurit sfäärilise osakese takistusteguriga. Niimoodi saadud suhet nimetatakse ka osakese aerodünaamiliseks kujuteguriks [2].

2.3.5. Kihi aerodünaamilise takistuse Δp sõltuvus pindkiirusest u

Keevkihis toimuvate protsesside üks iseloomustav karakteristik on kihi aerodünaamilise takistuse Δp olenevus pindkiirusest u . Gaasi läbimisel seisvast kihist rõhulang suureneb pindkiiruse u kasvades, kuni keevkihi tekkimise piirkiiruseni u_{mf} . Kiirusest u_{mf} suuremal pindkiirusel Δp veidi väheneb. Kiiruse u_{mf} piirkonnas tekkiva rõhulangu hüppe põhjustab vajadus lisaenergia järele, mis kulub osakeste vaheliste sidemete lõhkumiseks, et keevkiht tekitada. Kui aga läheneda piirkiirusele u_{mf} teiselt poolt ehk kiiruseid järk-järgult vähendades, siis sellist takistuse hüpet ei esine ning rõhulang väheneb seisva kihi piirkonnas sujuvalt. Katseliselt määratud karakteristik $\Delta p = p(u)$ on sageli u_{mf} määramise aluseks [2].



Sele 2.3.5. Minimaalse pindkiiruse määramine [12]

2.3.6. Osakese terminaalkiirus

Keevkihi paljudes režiimides (seisev kiht, mulliliv keevkiht, turbulentne kiht) püsivad osakesed mingil kindlal kõrgusel resti kohal. Kui kõrvale jätta mõned juhuslikud lenduvad osakesed, siis üldiselt ei esine laiaulatuslikku osakeste gaasiga kaasa liikumist kihist välja [5].

Üleslükkejõud ning gaaside tõmbejõud, mis moodustavad aerodünaamilise jõu, on raskusjõule vastandavateks jõududeks. Kui üleslükkejõud ja gaaside avaldatav tõmbejõud tabavad osakest, siis osake kiirendab kuni saavutab tasakaalu kiiruse ehk terminaalkiiruse ehk hõljumiskiiruse. Kui gaas voolab ümber paigal seisva osakese või kui liigub ülespoole liikuvast osakesest kiiremini, tabab osakest selle gaasi põhjustatud tõmbejõud (ingl.k drag force). See jõud on omakorda seotud ka üleslükkejõu ning raskusjõuga. Osakesele mõjuv tõmbejõud on seotud voolava gaasi kineetilise energiaga ja osakese pindalaga ning on defineeritud [5]

$$F_d = C_d \frac{\pi d_p^2}{4} \left(\frac{\rho_g u^2}{2} \right), \quad (2.8)$$

u = gaasivoolu kiirus

C_d = aerodünaamiline takistustegur, mis on funktsioon Reynoldsi arvust

C_d ja Re vaheline sõltuvus erinevatele osakestele:

$$C_d = \frac{a_1}{Re^{b_1}}, \quad (2.9)$$

Konstandid a_1 ja b_1 võib hinnanguliselt võtta tabelist 2.3.6.

Tabel 2.3.6. Konstantide a_1 ja b_1 väärtused sõltuvalt Reynoldsi arvust

Re piirkond	a_1	b_1
$0 < Re < 0,4$	24	1
$0,4 < Re < 500$	10	0,5
$500 < Re$	0,43	0

Kui gaasivool ja osake liiguvad mõlemad ülesse kiirustega vastavalt u ja u_s , siis osakesele mõjub tõmbejõud, kuna relatiivne kiirus ($u - u_s$) takistab tal allaliikumist. Seega jõubilanssi võib kujutada selliselt:

raskusjõud = üleslükkejõud + tõmbejõud

$$m_p g = m_p \frac{\rho_g g}{\rho_p} + C_d \frac{\pi(u - u_s)^2 \rho_g}{8} d_p^2 \quad (2.10)$$

Gaasi kiiruse ja osakese liikumiskiiruse erinevus ($u - u_s$) või osakeste liikumiskiirus, kui gaasi kiirus on 0, on tuntud kui terminaalkiirus u_t [5].

Kui gaasi kiiruse suurendamisel saavutatakse osakeste terminaalkiirus, siis kantakse need osakesed kihist välja ning algab pneumaatiline transport. See on tsirkuleeriva keevkihi ülemine piir stabiilseks tööks. Antud töös leitakse väljauhte- (terminaal-) kiirus sfäärilisele osakesele diameetriga d_p ning tihedusega ρ_s , mis on gaasis tihedusega ρ_f kasutades valemit [11]:

$$u_{elu}^2 = \frac{4}{3} \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \frac{g d_p}{C_d(Re_{elu})}, \quad (2.11)$$

Kus tõmbejõu koefitsient $C_d = f(Re_{elu})$

2.4. Tsirkuleeriva keevkihi tsirkulatsiooni arvu määramine

2.4.1. Massivoog tsirkuleerivas keevkihis

Tsirkuleeriva keevkihi üheks tunnuseks on osakese vabalangemise kiirusest suurem gaaside kiirus, mida väljendatakse tavaliselt osakese keskmise diameetri d_p järgi. Selle tulemusel kannab gaasivoolus materjali osakesi koldest minema. Selleks, et säilitada stabiilne režiim tuleb osakesed gaasivoolusest eraldada tsüklonis ning nad tagasi koldesse suunata [4].

Konstantse Archimedese numbri Ar juures on võimalik luua diagramm, mis kirjeldab massi liikumist. Selles diagrammis on ordinaat teljeks dimensioonita rõhulang ψ ,

$$\psi = \frac{\Delta p}{(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_{mf})g\Delta h} \quad (2.12)$$

Δp – rõhulang, Pa

ρ_s – materjali tihedus, kg/m^3

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m^3

ε_{mf} – poorsus

g – raskuskiirendus, m/s^2

Δh – kihi kõrgus keemise alguses, m

Abtsissteljeks on osakese Froude number

$$Fr_p = \frac{u}{\sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} g d_p}} \quad (2.13)$$

u – gaasivooluse kiirus, m/s

d_p – osakeste keskmine läbimõõt, m

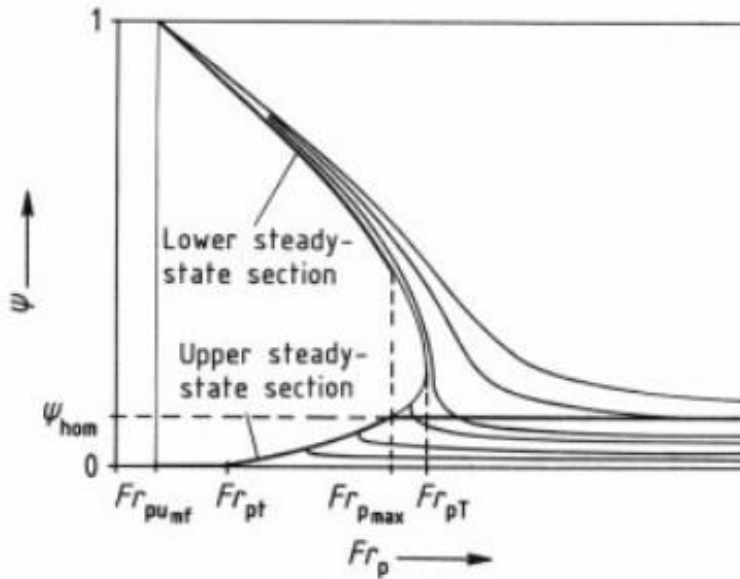
Koostatud diagrammi parameetriks on dimensioonita massivoog tsirkuleerivatele osakestele. See kujutatakse massivoo suhtena gaasivoogu.

$$\frac{\rho_f}{\rho_s(1-\varepsilon_L)}\mu = \frac{M_s\rho_f}{\rho_s(1-\varepsilon_L)M_f}, \quad (2.14)$$

μ – massivoo ja gaasivoo suhe, kg/kg

M_s – gaasivoolusega kaasa viidud materjali osakeste massivoog, kg/s

M_f – gaasivoog, kg/s



Sele 2.4.1.-1. Tsirkuleeriva keevkihi režiimi kirjeldamiseks koostatud diagramm [11].

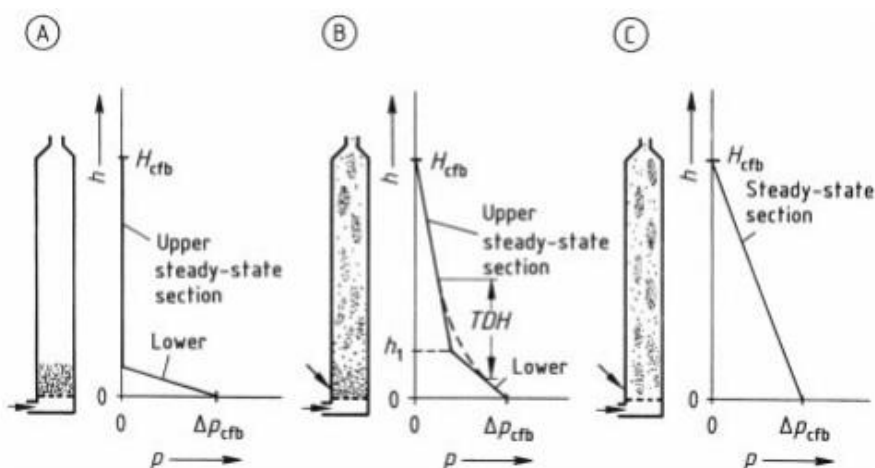
Sele 2.4.1.-2. näitab kuidas režiimi kirjeldav diagramm Sele 2.4.1.-1. koostatakse tsirkuleerivale keevkihile. Kõrgedel gaasi kiirustel ja kui osakestele mõjuvat kiirenduse mõju mitte arvestada jaotub kihi materjal ühtlaselt kogu kolde kõrguses H_{cfb} . Tsirkuleerivas keevkihis esineb siis üks stabiilne režiim, millel on konstante rõhugradient ($\Delta p/\Delta h$). Rõhugradient on võimalik arvutada kihi massi järgi [11]

$$\psi_{hom} = \frac{(\rho_s - \rho_f)gH_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})}{(\rho_s - \rho_f)gH_{cfb}(1 - \varepsilon_{mf})} = \frac{H_{mf}}{H_{cfb}} \quad (2.15)$$

H_{mf} - kihi kõrgus minimaalsel pindkiirusel, m

Režiimid, mis on iseloomustatud rõhugradiendiga ja jäävad joonisel Sele 2.4.1.-1 kõverjoonest paremale, on saavutatavad gaasi kiiruse (joonisel vastab gaasi kiirusele

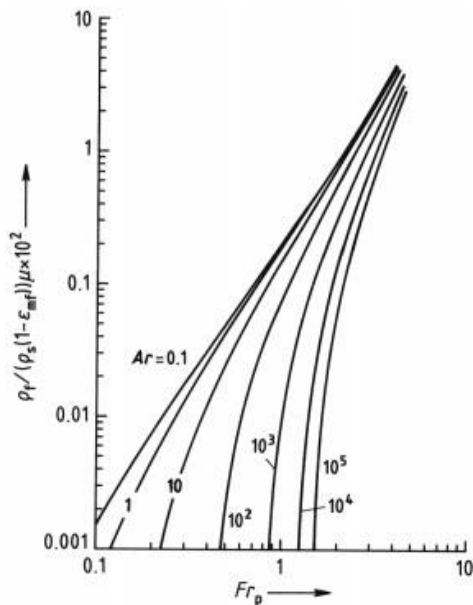
dimensioonita kiirus Forude arv Fr_p) suurendamisel. Suurenev Fr_p toob endaga kaasa suurema massivoo - suurem kogus osakesi lendub kihist välja ehk tsirkuleerib. Kui Fr_p langeb alla piiri Fr_{pmax} , esineb koldes kaks stabiilset režiimi ehk esindatud on kaks rõhugradienti. Kolde alumises osas esineb stabiilne olek, mille rõhugradient vastab joonisel Sele 2.4.1.-1. kõverjoone ülemisele osale ning kolde ülemises osas esineb stabiilne olek, mille rõhugradient vastab joonisel Sele 2.4.1.-1. oleva kõverjoone alumisele osale. Joonis Sele 2.4.1.-2. näitab nende kahe rõhugradiendi olulisust keevkihis. Üleminek nende kahe regiooni vahel pole järsk vaid toimub sujuvalt ning seda tsooni, kus see toimub nimetatakse TDH (Transport disengaging height). Kui Fr_p vähendatakse edasi kuni see on minimaalsele pindkiirusele vastava Froude arvu Fr_{pumf} ning väljauhtekiirusele vastava Froude arvu Fr_{pwf} vahel, siis sellisel juhul ei lendu osakesed kihist enam välja ning rõhugradient kolde ülemises osas muutub tühiselt väikseks või puudub täiesti ehk on võrdne nulliga. Sellistel kiirustel on kogu materjal kihis ning on kas mulliva või turbulentsse keevkihi kujul. Kogurõhulang on selliste kiiruste puhul konstante ning sõltub ainult kihis oleva materjali massist. [13]



Sele 2.4.1.-2. Rõhugradiendi muutus koldes erinevate gaasi kiiruste juures [13]

Peale rõhu ja materjali osakeste kontsentratsiooni iseloomustava diagrammi on oluliseks näitajaks tsirkuleeriva materjali massivoog ristlõikepindala kohta. See on oluline näitaja tsirkuleeriva keevkihi katla projekteerimisel. Eriti sõltub sellest näitajast tsüklon ning tuha tagastus koldesse. Tahkete osakeste massivoog sõltub keevkihi režiimist. Joonis (Sele 2.4.1.-3) näitab dimensioonita massivoo ja Fr_p suhet, kus parameetrik on Archimedese number Ar . Antud kindla Archimedese numbriga juures vooluhulk liigub nulli poole kui Fr_p kahaneb ühe osakese terminaalkiiruse Froude numbriga Fr_{pt} poole ning saavutab maksimumi kui $Fr_p =$ osakese transportkiirusele vastava Froude numbriga Fr_{pT} . Diagrammil kujutatud väljauhte

kõver muutub suuremaks Ar kasvamisega – mida suurema diameetriga on osakesed, seda suurem on tsirkuleeriva massivoog muutus, kui gaaside kiirust muuta [11].



Sele 2.4.1.-3. Väljauhtediagramm [11]

Antud töös leiti tuha massivoog kasutades allkirjeldatud mudelit.

Eeldusel, et tahkete osakeste massivoog, mis kandub edasi kolooniadena, on võrdne kogu tahkete osakeste massivooga, võib esitada massivoog tahkete osakeste massibilansina

$$\dot{M}_s = \rho_s(1 - \epsilon_L)w(1 - \phi)F, \quad (2.16)$$

\dot{M}_s – tahkete osakeste massivoog, kg/s

w – kolooniade liikumiskiirus, m/s

F – kolde ristlõikepindala, m^2

Jõubilansist järeldub, et rõhujõud, mis on vajalik tahkete osakeste transpordiks, on võrdne osakeste massi ja osakestele mõjuva üleslükkejõu erinevusega.

$$\Delta PF = (\rho_s - \rho_f)(1 - \epsilon_L)(1 - \phi)gF\Delta L, \quad (2.17)$$

ΔL – kõrguste vahe, m

Kolooniates esinev jõubilans näitab, et suruvad jõud nagu jõud kolooniade pinnal ning rõhujõud, võrdsustavad kolooniade üleslükkejõu ja massi erinevused. [13]

$$\Delta P(1 - \phi)F + \lambda \rho_f v_G (v_s - w) \frac{F}{d_p} \Delta L = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_L)(1 - \phi)F \Delta L g, \quad (2.18)$$

ΔP – rõhulangus, mis on põhjustatud osakeste transpordist, Pa

ϕ – osakestevaba ristlõikepindala

F – kolde ristlõikepindala, m²

λ – impulssülekanne koefitsient = 0,00533 [13]

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m³

v_G – gaasi kiirus lahjas gaasifaasis, m/s

v_s – tahkete osakeste kiirus, m/s

w – kolooniate kiirus, m/s

d_p – osakeste keskmine diameeter, m

ΔL – kõrguste vahe, m

ε_L – poorsus minimaalsel pindkiirusel

Nii massi- kui ka jõubilanssi saab teisendada dimensioonita kujule. Massibilanss tahketele osakestele omandab sellise kuju

$$\frac{w}{v} = \frac{1}{(1-\phi)} \frac{\rho_f}{\rho_s(1-\varepsilon_L)} \mu, \quad (2.19)$$

μ – tahkete osakeste massivoo ja gaasi massivoo suhe = $\frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_f}$

v – gaasi kiirus koldes, m/s

ϕ – osakestevaba ristlõikepindala

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s – gaasi tihedus, kg/m³

ε_L – poorsus minimaalsel pindkiirusel

μ – massivoo ja gaasivoo suhe, kg/kg

Gaasi massibilanss omandab järgmise kuju

$$\frac{v_G}{v} = \frac{1}{\phi} \left[1 - \varepsilon_L \frac{w}{v} (1 - \phi) - \frac{u_{mf}}{v} \frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_L)g\Delta L} (1 - \phi) \right] \quad (2.20)$$

v_G – gaasi kiirus lahjas gaasifaasis, m/s

v – gaasi kiirus koldes, m/s

ϕ – osakestevaba ristlõikepindala

ε_L – poorsus minimaalsel pindkiirusel

w – kolooniate kiirus, m/s

u_{mf} – minimaalne pindkiirus, m/s

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s – tahkete tihedus, kg/m³

v_s – tahkete osakeste kiirus, m/s

ΔP – rõhulangus, mis on põhjustatud osakeste transpordist, Pa

ΔL – kõrguste vahe, m

Võrrandit 2.17 saab kujutada dimensioonita rõhugradiendina.

$$\frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_L)g\Delta L} = (1 - \phi) \quad (2.21)$$

Jõubilanss dimensioonita kujul, mis defineerib osakese Froude numbrit Fr_p kui dimensioonita gaasi kiiruse

$$Fr_p^2 = \frac{v^2}{\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} d_p g} = \frac{1}{\lambda} (1 - \varepsilon_L) \phi (1 - \phi) \frac{1}{\frac{v_G}{v} \left(\frac{v_s - w}{v} \right)}, \quad (2.22)$$

Fr_p – osakese Froude arv

ϕ – osakestevaba ristlõikepindala

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s – gaasi tihedus, kg/m³

d_p – osakeste keskmine diameeter, m

λ – impulssülekanne koefitsient = 0,00533 [13]

ε_L – poorsus minimaalsel pindkiirusel

v_G – gaasi kiirus lahjas gaasifaasis, m/s

w – kolooniate kiirus, m/s

v_s – tahkete osakeste kiirus, m/s

Tahkete osakeste kiirust lahjas gaasifaasis saab samuti kirjeldada dimensioonita kujul

$$\frac{v_G}{v} = \frac{v_s}{v} - \frac{w_f}{v}, \quad (2.23)$$

w_f – osakeste väljauhtekiirus, m/s

Kahe dimensioonita massibilansi (2.19) ja (2.20), kahe dimensioonita jõubilansi (2.21) ja (2.22) ja libisemiskiiruse dimensioonita võrrandi (2.23) abil on võimalik arvutada tahkete osakeste massivoogu. [13]

3. KATSED

3.1. Katses kasutatud kihi materjali kirjeldamine

Antud töö peamiseks katseks oli tsirkuleeriva keevkihtkatla stendil tehtud külmkatse, mille põhjal oli võimalik leida antud katlastendi massikulu erinevate õhukiiruste juures. Katsetes kasutatud tuhk pärineb Narva Elektriijaamade Foster Wheeleri keevkihtkateldes kasutatavast soojusvahetist INTREX. Enne külmkatset tuli kasutatud tuha omadused määrata ning selleks tehti mitmeid katseid.

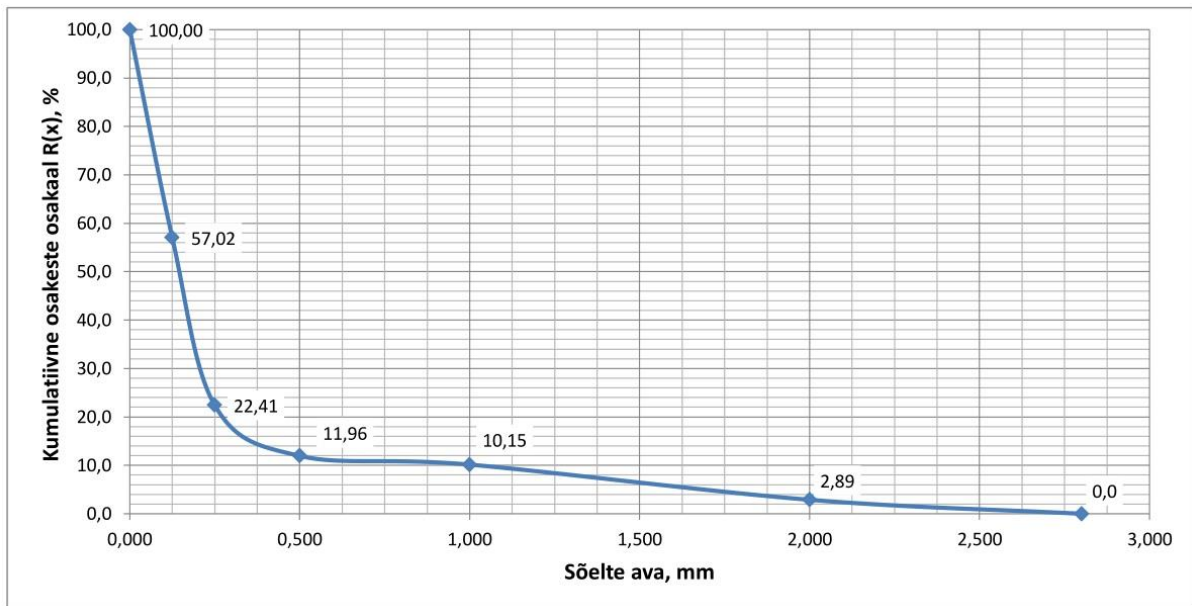
3.1.1. Tuha sõelanalüüs

Sõelanalüüsi eesmärgiks on leida tuha fraktsiooniline koostis. Tuhk oli eelnevalt sõelutud ning eraldatud olid kõik osakesed, mis olid suuremad kui 3mm.

Tulemustest selgus, et kõige rohkem on antud tuhas osakesi diameetriga $\leq 125\mu\text{m}$. Neid on kogu tuha koostisest 42,98%. Täpsemalt on saadud tulemused toodud tabelis 3.1.1 ning joonisel Sele 3.1.1.

Tabel 3.1.1 Tuha sõelanalüüsi tulemused (osajäägid)

Sõela ava O	Sõela algkaal	Sõela kaal prooviga	Mass sõelal m1	Jääk sõelal I	Sõela kaal prooviga	Mass sõelal m2	Jääk sõelal II	Sõela kaal prooviga	Mass sõelal m3	Jääk sõelal III	Keskmine %
mm	g	g	g	%	g	g	%	g	g	%	%
2,8	528,66	528,66	0,0	0,00	528,66	0	0,00	528,67	0,01	0,00	0,0
2,0	495,06	498,85	3,8	3,17	498,81	3,8	2,63	498,83	3,8	2,87	2,89
1,0	461,30	470,71	9,4	7,86	470,87	9,6	6,71	470,75	9,4	7,20	7,26
0,5	412,60	414,74	2,1	1,79	415,13	2,5	1,77	415,04	2,4	1,86	1,81
0,25	392,29	404,42	12,1	10,13	407,50	15,2	10,67	406,13	13,8	10,55	10,45
0,125	375,0	416,10	41,2	34,37	424,62	49,7	34,84	420,37	45,4	34,62	34,61
0,00	354,7	405,75	51,1	42,68	416,47	61,8	43,37	410,9	56,3	42,88	42,98



Sele 3.1.1. Tuhaosakeste suurusjaotus (täisjääk)

3.1.2. Tuha agregattiheduse määramine

Antud töös oli oluline teada iga fraktsiooni tihedust. Seega hoiti peale sõelumist iga fraktsioon eraldi. Kasutati mõõteskaalaga anumad, mis kaaluti ning täideti destilleeritud veega. Destilleeritud vee temperatuur mõõdeti ning seega oli teada vee tihedus. Seejärel kaaluti eraldi anumad olnud tuhk ning lisati veega täidetud anumasse. Saadud kogukaalust arvatati välja tihedus. Nii tehti iga fraktsiooniga.

Kuna iga fraktsiooni osakaal tuha kogumassist oli erinev, leiti kogu tuha tihedus, kasutades masskeskmise meetodit

$$\frac{\rho_1 m_1 + \rho_2 m_2 + \dots + \rho_n m_n}{m_k}, \quad (3.1)$$

ρ_1 – fraktsiooni tihedus, kg/m^3

m_1 – fraktsiooni mass, kg

m_k – kõikide fraktsioonide masside summa, kg

Katse tulemusena leiti, et kasutatud tuha keskmine tihedus on $2533,2 \text{ kg/m}^3$. Kõikide fraktsioonide tihedused on toodud tabelis 3.1.2.

Tabel 3.1.2. Tuha erifraktsioonide ja keskmine tihedus

Tuha fraktsioon kootsis, mm:	bottom	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1,0	1,0-3,0
Tuha osakeste keskmine läbimõõt, mm	0,0625	0,1875	0,375	0,75	1,5
Suure anum kaal, g:	795,36	795,94	795,34	794,41	794,61
Tuha topsi kaal, g:	147,12	147,12	147,12	147,12	147,12
Tuha kaal (koos topsiga), g:	260,47	241,82	176,12	177,92	161,02
Vee maht (algne), cm ³ :	500	500	500	500	500
Vee temperatuur, °C:	21,7	21,7	23,3	21,9	22,1
Vee kaal koos anumiga, g:	1292,56	1292,95	1292,38	1291,38	1291,6
Vee kaal koos anumiga ja tuhaga, g:	1405,77	1387,53	1321,34	1322,15	1305,5
Vee maht tuhaga, cm ³ :	545	535	512	515	505
Vee kaal, g:	497,2	497,01	497,04	496,97	496,99
Tuha kaal, g:	113,35	94,7	29	30,8	13,9
Tuha kaal (vees), g:	113,21	94,58	28,96	30,77	13,9
Tuha kaal (vees), kg	0,11321	0,09458	0,02896	0,03077	0,0139
Vee tihedus (katseline), kg/m ³ :	994,4	994,0	994,1	993,9	994,0
Mahu erinevus, cm ³ :	45	35	12	15	5
Fraktsioonide tihedus, kg/m ³	2518,9	2705,7	2416,7	2053,3	2780,0
Tuha keskmine tihedus, kg/m ³	2533,2				

3.2. Katsed väiksel külmkatsestandil

Väikses külmkatsestandis tehtud katses määrati antud tuha minimaalne pindkiirus u_{mf} , poorsus minimaalsel pindkiirusel ϵ_{mf} .

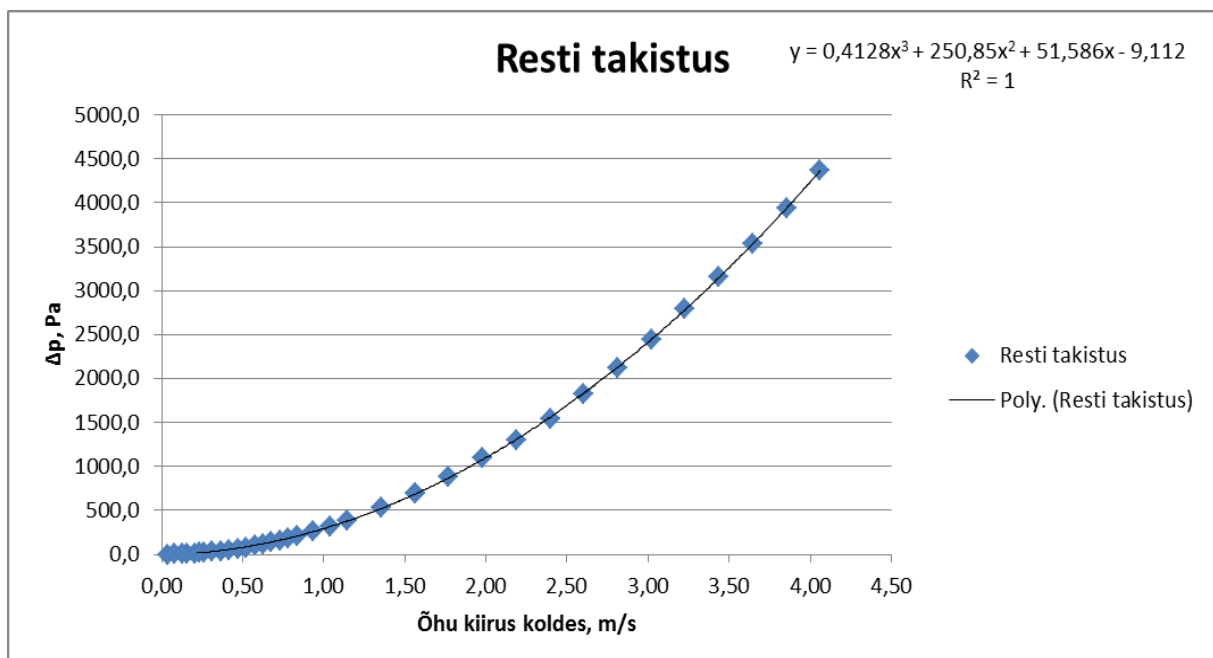
3.2.1. Katseseadme kirjeldus

Katsestand asub Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika Instituudis. Katsestand (Sele 3.2.1.-1.) kasutab koldesse suunatava õhuna maja sisest suruõhutrassist saadavat õhku, mille rõhk on 7bar. Katsestandi koldeks on 63mm sisediameetriga kvartsklaasist silinder, mille all on rest. Koldesse on paigaldatud ka impulsstoru, mille abil mõõdetakse koldes olevat rõhku. Lisaks mõõdetakse eraldi rõhku resti all olevas õhukarbis. Kogu õhusüsteemi ehk koldesse suunatavat õhu kulu kontrollitakse arvutist programmi LabVIEW abil. Katsestandi koldelaest liigub õhk edasi kottfiltrisse.



Sele 3.2.1.-1 Väike külmkatsestend

Kihi takistuse leidmiseks on vaja teada takistust, mida avaldab rest gaasivoolusele. Kuna aga katsestendi pole ümber ehitatud või mõnel muul moel modifitseeritud, võeti restitakistuseks varem määratud tulemus [14].



Sele 3.2.1.-2. Väikse külmkatsestendi resti takistus [14].

$$y = 0,4128x^3 + 250,85x^2 + 51,586x - 9,112, \quad (3.2)$$

y – restitakistus, Pa

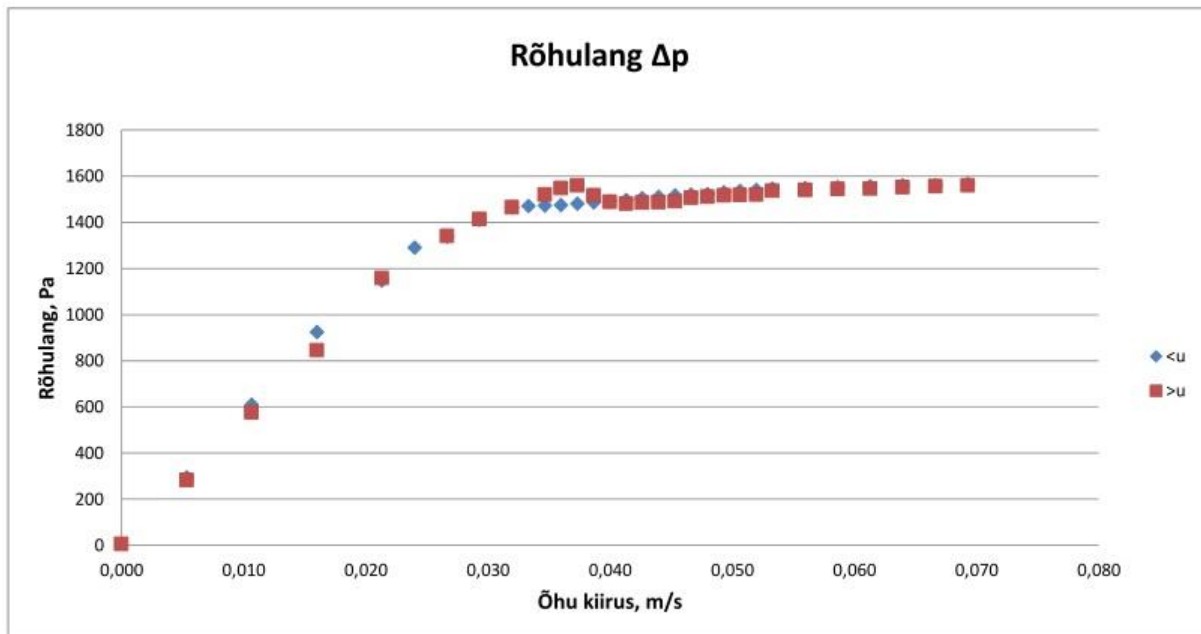
x – õhu kiirus koldes, m/s.

Restitakistust võetakse arvesse kihi takistuse määramisel. Edasi alustati katset väikse külmkatsestendiga. Esmalt täideti kolle 174mm tuha kihiga. Kolle ühendati korstnaga ning hakati suunama õhku koldesse kihi alla. Alustati õhukuluga 1 SLPM ning suurendati kulu 1 võrra kuni kuluni 5 SLPM, sealt liiguti edasi sammuga 0,5 SLPM kuni kuluni 6,5SLPM ning alates sellest suurusest tõsteti kulu sammuga 0,25 SLPM kuni kuluni 10 SLPM, kust alates tõsteti jälle sammuga 0,5 SLPM kuni kuluni 13 SLPM. Maksimaalse kuluni jõudes hakati kulu vähendama täpselt samasuguse sammuga nagu oli seda tõstetud. Peale igat kulu tõstmist registreeriti baromeetiline rõhk, rõhk koldes, õhutemperatuur, kihi kõrgus ja rõhulang.

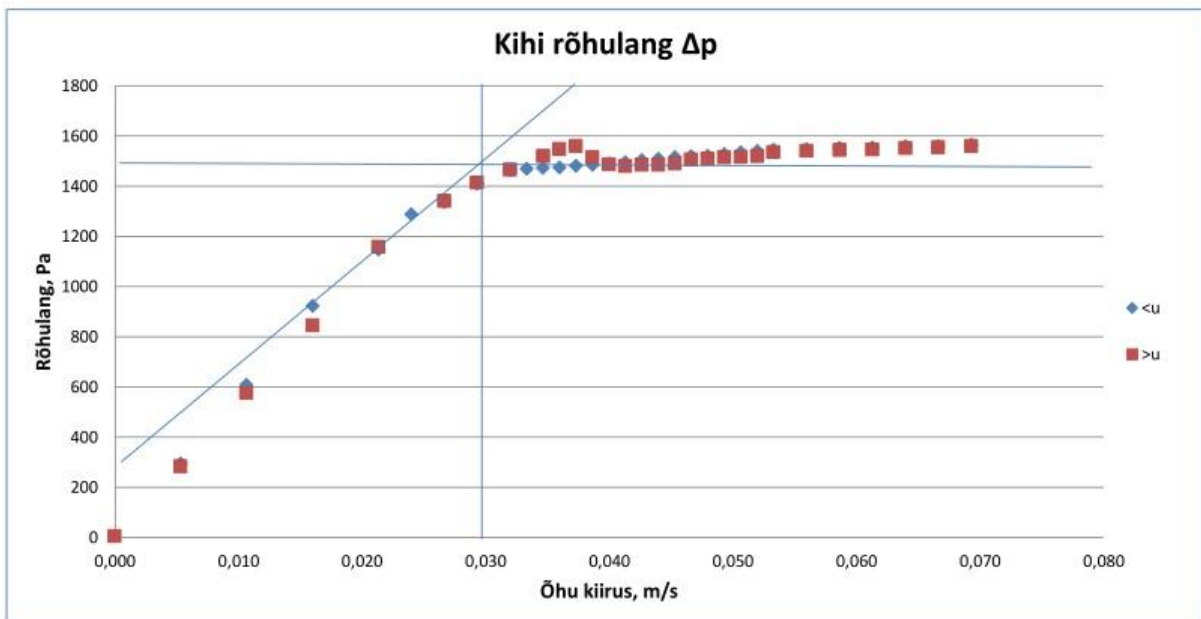
3.2.2. Väiksel külmkatsestendil saadud tulemuste analüüs

Katsetulemuste töötlemise tulemusel konstrueeriti kaks graafikut, millest esimene kirjeldab kogu rõhulangu ja õhukiiruse suurenemise vahelist seost (Sele 3.2.2.-1) ning teine kirjeldab kihirõhulangu ja õhukiiruse suurenemise vahelist seost (Sele 3.2.2.-2). Teine graafik oli ka minimaalse pindkiiruse u_{mf} määramise aluseks.

Graafikute pealt on võimalik näha kuidas seisval kihil tekib suurem rõhulang enne keemise algust. Rõhulangu tõusu õhukiiruse tõstmisel põhjustas ilmselt osakeste separatsioon, kus raskemad osakesed vajusid kihi põhja ning kergemad osakesed liikusid kihis ülesse. Peale separeerumist liikus õhk kihis vabalt ning saavutas stabiilse trendi. Õhukiiruse vähendamisel aga ei olnud momenti, kus on vaja ületada seisvakihi ja keemise vaheline piir ning seega langes rõhk stabiilsemalt.



Sele 3.2.2.-1. Rõhulangu ja õhukiiruse vaheline seos. >u näitab rõhulangu õhukiiruse tõstmisel ning <u õhukiiruse vähendamisel.



Sele 3.2.2.-2. Tuha kihi rõhulangu ja õhukiiruse vaheline seos.

Väikeses stendis tehtud külmkatse üheks eesmärgiks oli määrata tuha iseloomustamiseks vajalikke parameetreid. Saadud katse tulemuste põhjal määrati kihi poorsus minimaalsel pindkiirusel u_{mf} . Selleks kasutati keevkihi rõhulangu valemist 2.5 tuletatud valemit ning avaldati poorsus minimaalsel pindkiirusel ϵ_{mf} (valem 2.6)

Erguni valemit (3.3) kasutati, et leida osakeste sfäärilisuse ja keskmise diameetri korrutis $d_s\varphi_s$

$$\frac{1,75}{\varphi_s \varepsilon_{mf}^3} \frac{d_s^2 u_{mf}^2}{v^2} + 150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_s^2} \frac{d_s u_{mf}}{v} = \frac{g d_s^3 (\rho_s - \rho_f)}{v^2 \rho_f}, \quad (3.3)$$

ε_{mf} – poorsus minimaalsel pindkiirusel

ρ_f – gaasi tihedus, kg/m³

ρ_s – osake tihedus, kg/m³

g – raskuskiirendus

u_{mf} – minimaalne pindkiirus, m/s

d_s – osakeste keskmine diameeter, m

v – gaasi kinemaatiline viskoossus, m²/s

φ_s - osakese sfäärilisus,

Sellest avaldati $d_s\varphi_s$

$$d_s\varphi_s = \frac{1,75 u_{mf}^2 \rho_f}{\varepsilon_{mf}^3 g \Delta \rho^2} \pm \sqrt{\left(\frac{1,75 u_{mf}^2 \rho_f}{\varepsilon_{mf}^3 g \Delta \rho^2}\right)^2 + 150 \frac{(1-\varepsilon_{mf}) u_{mf} \rho_g}{\varepsilon_{mf}^3 g \Delta \rho}}, \quad (3.4)$$

Oluline suurus on lisaks tõmbejõu koefitsient C_d , ehk jõud, mida avaldab gaasivoolus osakesele. Selle leidmiseks kasutati valemit 2.9

Arvutuste tulemused on näidatud tabelis 3.2.2.

Tabel 3.2.2. Katse tulemuste põhjal arvutatud väärtused

Intrex tuhk	
Gaasi temperatuur t_g , °C:	22
Kihi kõrgus minimaalsel pindkiirusel H_{mp} , m:	0,185
Osakese tihedus ρ_s , kg/m ³ :	2533,2
Gaasi tihedus ρ_f , kg/m ³ :	1,2
Mõõdetud rõhulang kihis Δp_{mf} , Pa:	1516,416
Kihi poorsus minimaalsel pindkiirusel ε_{mf}:	0,67
Gaasi tihedus ρ_f , kg/m ³ :	1,19
Õhu kinemaatiline viskoossus v , m ² /s:	1,53E-05
Minimaalne pindkiirus u_{mp}, m/s:	0,03
Reynolds'i arv	185,0522
C_d	0,735111

3.3. 60kW Tsirkuleeriva keevkihiga katlastend

3.3.1 Katseseadme kirjeldus

Tsirkuleeriva keevkihiga katlastend ehitati Tallinna Tehnikaülikooli 2014 aastal projekti „CO₂ heitmete vähendamine põlemisõhu hapnikurikkamaks muutmisega keevkihtkatlas“ raames. Seepärast on katsesendil lisaks tavapärasele põlemisõhusüsteemile ka eraldi süsteem oxyfuel põletustehnoloogia kasutamiseks.

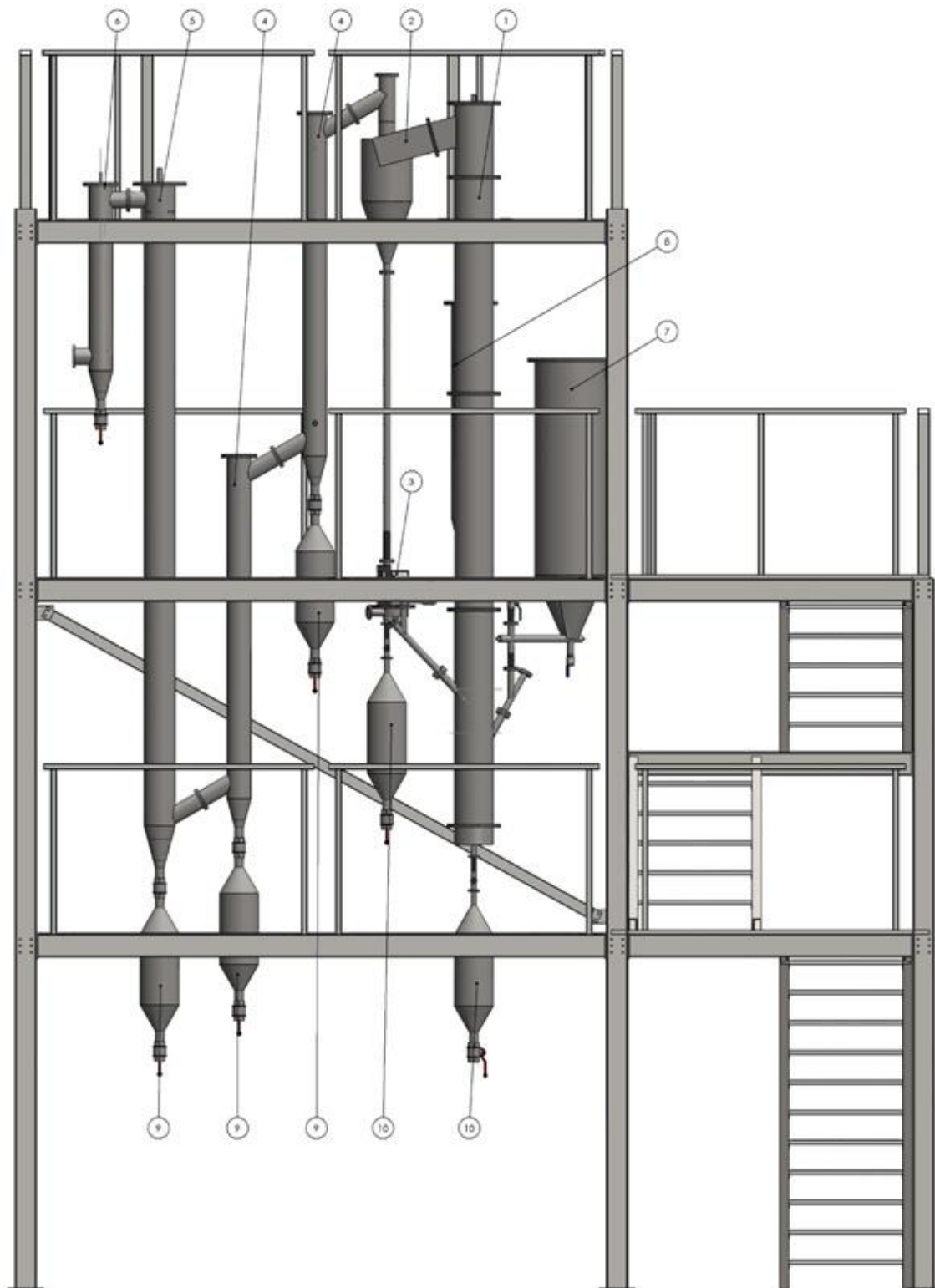
Katlastendi ülevaatlik skeem on toodud joonisel Sele 3.3.1. Stendi koldeks on 4,5 meetrine ning 0,120 m diameetriga keraamiline toru. Põlemiskamber on isoleeritud kõrgtemperatuurilise isolatsioonimaterjaliga, et vähendada soojuskadu keskkonda. Terve kolle koos isolatsiooniga on kaetud metallist kestaga.

Põlemiskambriist väljuvad osakesed eraldatakse suitsugaasidest tsüklonis ning suunatakse läbi laskuvtoru ja EHE (external heat exchanger) tagasi kihti. EHE-s jahutatakse osakesi ning nende koldesse tagasi suunamisel hoitakse kihi temperatuuri kontrolli all. Peale tsüklonit liiguvad suitsugaasid kaheastmelisse jahutussüsteemi, mis koosneb kahest eraldiseisvast torukimptüüpi soojusvahetist. Soojusülekanne intensiivistamise eesmärgil on torudesse lisatud gaasivooluse turbulisaatorid. Jahutatud suitsugaasid eemaldatakse allesjäänud lendtuhk kottfiltris. Peale kottfiltrit liigub puhastatud suitsugaas kondensaatorisse ning lahkub süsteemist ventilaatori abil korstnasse.

Katlastend on varustatud kahe eraldiseisva kütusepunkriga, mis võimaldab katse ajal kasutada korraga kahte erinevat kütust. Kütuse koldesse juhtimiseks kasutatakse etteandetigu, mille pöörlemissagedust on võimalik muuta. Tänu reguleeritavale pöörlemissagedusele on võimalik täpselt teada, kui palju kütust ajaühikus koldesse antakse. Suurem punker on lisaks varustatud ka kaaluanduritega, mis on vajalik, et teada, kui palju kütust punkrisse lisati või kui palju seda alles on.

Katlastendi põlemisõhk võetakse maja tsentraalsest suruõhusüsteemist. Kõik gaasiliinid on varustatud voolukulumõõturitega, mille abil on täpselt võimalik reguleerida vooluhulka, mis süsteemi siseneb. Primaarõhuliinile ja õhukarbile on paigaldatud lisaks elektrilised kuumutuslindid, millega tagatakse põlemiseks vajalik primaarõhutemperatuur.

Kogu stendi juhtimine ja andmete kogumine toimub kasutades National Instrumenti andmehõive süsteemi CompactDAQ mida juhitakse Labview arvutiprogrammi abil.



Sele 3.3.1 Tsirkuleeriva keevkihiga katlastendi skeem. 1. Põlemiskolle; 2. Tsüklon; 3. Väline tuhajahuti; 4. Suitsugaasijahuti; 5. Kottfilter; 6. Kondensaator; 7. Kütusepunker I; 8. Kütusepunker II; 9.-10. Tuhamahutid

3.3.2. Resti takistuse määramine

Tsirkuleeriva keevkihiga katsestendi resti takistus on oluline suurus kolde parameetrite arvutamisel. Resti takistust on vaja teada, et oleks võimalik hiljem arvutada kihi takistus. Resti takistuse määramiseks lasti läbi resti õhku ning järk-järgult tõsteti kulu. Koos kulu tõstmisega registreeris arvuti rõhulangu ning õhu temperatuurid. Tulemuste põhjal koostati resti takistuse graafik (Sele 3.3.2), mis kirjeldab rõhulangu ning düüsis oleva Reynoldsi arvu vahelist sõltuvust. Regressioonianalüüsi käigus saadud võrrandit (3.5) on võimalik kasutada, et leida resti takistus soovitud õhu kulule

$$y = 10^{-5x} + 0,005x - 5,9561, \quad (3.5)$$

y – resti takistus, Pa

x – Reynoldsi arv düüsis

Düüsis oleva Reynoldsi arvu leidmisel oli esmalt oluline teada õhukulu. Arvesse võeti ainult primaar- ning stardiõhu kulu, sest sekundaarõhk, mis suunatakse kihti kõrgemalt ja mitte resti alt, ei avalda restitakistusele mõju. Primaarõhu ja stardiõhu kulu liideti kokku.

Kolde koguvooluhulga leidmiseks teisendati kulu kõige pealt ühikule normaalkuupmeetrit tunnis Nm^3/h . Peale seda teisendati saadud tulemus ühikule kuupmeetrit sekundis m^3/s . Selleks kasutati valemit 3.6

$$\frac{101325(273+t_{karp})}{P_{abs}(273+25)} V_k \quad (3.6)$$

3600

t_{karp} = õhutemperatuur õhukarbis, °C

P_{abs} = kolde absoluutne rõhk, Pa

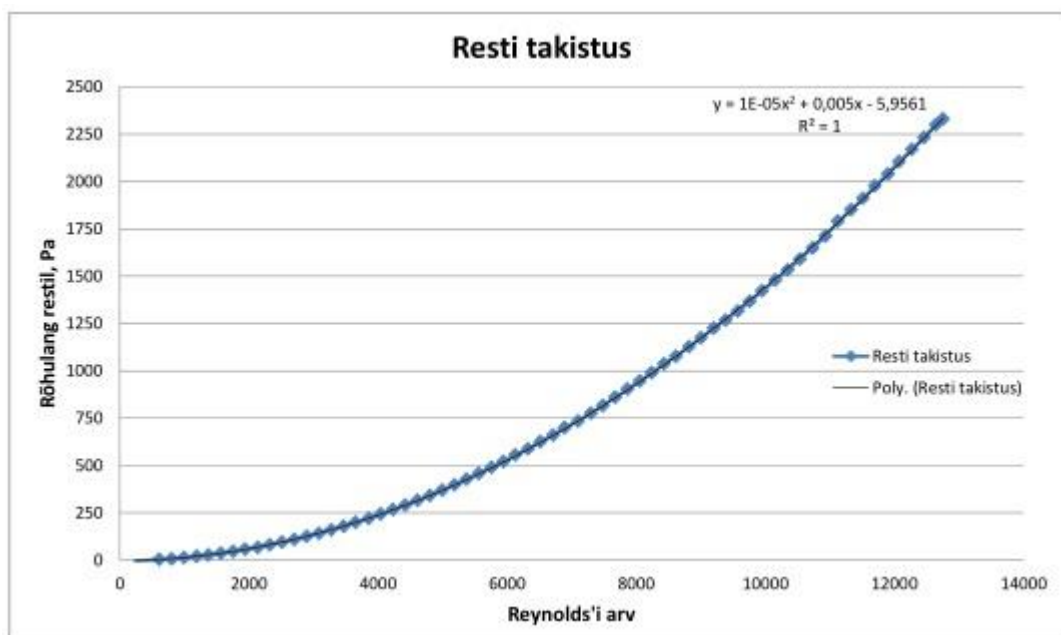
V_k = kolde koguvooluhulk, Nm^3/h

Saadud koguvooluhulk jagati düüside kogupindalaga.

d_0 = ühe düüsi diameeter = 0,0035 m

d_n = düüside arv = 31 tk

A_d = düüside kogupindala = $2,98 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$



Sele 3.3.2 Resti takistuse graafik

3.3.3. Külmkatsetus tsirkuleeriva keevkihiga katlastendil

Enne katse algust puhastati seade. Tehti puhtaks kütusepunker ning eemaldati kolde alt rest. Eelmiste katse jääkidest puhastati rest ning õhukarp. Samuti puhastati EHE eelmiste katsetuste jääkidest. Peale seadme puhastamist kaaluti katses kasutatav tuhk. Tuhk pandi punkrisse ning hakati etteandeteo abil seda koldesse suunama. Koldesse suunati samal ajal ka piisavalt õhku, et materjal ei vajuks läbi resti. Kui kogu materjal oli koldes alustati õhukulu suurendamisega järk-järgult. Primaar- ja sekundaarõhu kulu suurendati kuni õhukuluni 1000 SLPM. Arvuti registreeris samal ajal rõhulangud ning süsteemis olevad temperatuurid. Käsitsi mõõdeti nelja kulu juures kolde ülemises pooles olevat rõhulangu, mida kasutati hiljem massivoo arvutamiseks.

Katses kasutatava tuha mass $m = 7,92$ kg.

Tuha massivoo arvutamisel kasutatud andmed on toodud tabelis 3.3.3.

Tabel 3.3.3. Külmkatsetusel saadud andmed

Katse nr.	Stardi-õhk	Primaarõhk	Sekundaar-õhk	õhukiirus koldes	Rõhk koldes	Rõhk kolde laes	Rõhulang, Δp
	SLPM	SLPM	SLPM	m/s	Pa	Pa	Pa
1.	99,479	605,032	34,473	1,07	615	593	22
2.	99,705	1000,771	154,562	1,815	1496	1465	31
3.	99,511	1002,248	504,897	2,325	2265	2226	39
4.	99,653	1001,435	883,259	2,873	3242	3222	20

3.4. Katsetulemuste analüüs

3.4.1 Osakeste keskmine tihedus

Katsetulemuste analüüsimisel oli oluline leida kasutatud tuha osakese keskmine diameeter d_p . Selleks kasutati masskeskmise meetodit.

Osakeste keskmine diameeter d_p leiti järgnevalt [12]

$$d_p = \frac{1}{\left(\frac{p_1}{d_{p1}} + \frac{p_2}{d_{p2}} + \frac{p_3}{d_{p3}} + \frac{p_4}{d_{p4}} + \frac{p_5}{d_{p5}} + \frac{p_6}{d_{p6}}\right)} \quad (3.7)$$

d_{p1} – fraktsiooni diameeter, m

p_1 – fraktsiooni osakaal kogu tuha massist, %

$$d_p = \frac{1}{\left(\frac{0,4298}{6,25 \cdot 10^{-5}} + \frac{0,3461}{1,875 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,1045}{3,75 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,0181}{7,5 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,0726}{1,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,0289}{2,4 \cdot 10^{-3}}\right)}$$

Osakeste keskmine diameeter $d_p = 110 \mu\text{m}$

3.4.2 Transportkiiruse U_{tr} ja piirkiiruse U_{se} leidmine

Kui osakeste keskmine diameeter oli teada, siis tuli leida osakese Archimedese arv Ar . Selleks kasutati valemit 3.8 [15]:

$$Ar = \frac{\rho_f(\rho_s - \rho_f)gd_p^3}{(\rho_f\nu)^2}, \quad (3.8)$$

$$Ar = \frac{1,2(2533,2-1,2)*9,81*0,00011^3}{(1,2*1,51*10^{-5})^2} = 121,03$$

Tsirkuleeriva keevkihi korral on pindkiirus vahemikus $U_{se} \leq u \leq U_{tr}$. Osakese Archimedese arvu abilt leiti transpordi kiirus U_{tr} ning kriitiline piirkiirus U_{se} [15].

$$Re_{tr} = 2,28Ar^{0,419} \quad (3.9)$$

$$Re_{tr} = 2,28 * 121,03^{0,419} = 17,0085$$

$$U_{tr} = \frac{Re_{tr}\nu}{d_p} \quad (3.10)$$

$$U_{tr} = \frac{17,0085 * 1,51 * 10^{-5}}{0,00011} = 2,334 \text{ m/s}$$

$$Re_{se} = 1,53Ar^{0,5} \quad (3.11)$$

$$Re_{se} = 1,53 * 121,03^{0,5} = 16,83$$

$$U_{se} = \frac{16,83 * 1,51 * 10^{-5}}{0,00011} = 2,309 \text{ m/s}$$

3.4.3. Massivoog koldes külmkatsetusel

Kuna katse käigus mõõdeti rõhulangu nelja erineva õhukulu juures, siis tehti arvutused samuti neljale erinevale õhukulule. Arvutuste tulemused on toodud tabelis 3.4.2.

Algandmed:

$$\Delta p = 39 \text{ Pa}$$

$$u_{mf} = 0,03 \text{ m/s}$$

$$\nu = 2,325 \text{ m/s}$$

$$\Delta L = 2,18 \text{ m}$$

$$d_p = 110 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\varepsilon_L = 0,67$$

$$\rho_s = 2533,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,00533$$

$$v = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$F = 0,0113 \text{ m}^2$$

$$t = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

1. Osakestevaba ristlõikepindala ϕ leidmine

$$\frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_L)g\Delta L} = (1 - \phi)$$

$$\frac{39}{(2533,2 - 1,2)(1 - 0,67) \cdot 9,81 \cdot 2,18} = (1 - \phi)$$

millest avaldati ϕ :

$$\phi = 1 - 0,00218255 = 0,99781745$$

2. Koolooniate liikumiskiiruse w avaldamine

$$\frac{v_G}{v} = \frac{1}{\phi} \left[1 - \varepsilon_L \frac{w}{v} (1 - \phi) - \frac{u_{mf}}{v} \frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_L)g\Delta L} (1 - \phi) \right]$$

kus valemist 2.21 selgub, et $\frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_L)g\Delta L} = (1 - \phi)$

$$\varepsilon_L \frac{w}{v} (1 - \phi) = 0,67 \frac{w}{2,325} (1 - 0,99781745) = \frac{0,00146231w}{2,325} = 0,00062895w$$

$$\begin{aligned} \frac{u_{mf}}{v} \frac{\Delta P}{(\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_L)g\Delta L} (1 - \phi) &= \frac{0,03}{2,325} * (1 - 0,99781745) * (1 - 0,99781745) = \\ &= 9,22 * 10^{-8} \end{aligned}$$

$$1 - 0,00062895w - 9,22 * 10^{-8} = 0,999999908 - 0,00062895w$$

$$\frac{1}{\phi} (0,999999908 - 0,00062895w) = \frac{1}{0,9978175} (0,999999908 - 0,00062895w) =$$

$$= 1,002187(0,999999908 - 0,00062895w) = 1,002187 - 0,0006303w$$

$$\frac{v_G}{v} = 1,002187 - 0,0006303w \quad \rightarrow \quad \frac{v_G}{2,325} = 1,002187 - 0,0006303w$$

$$v_G = 2,325(1,002187 - 0,0006303w) = 2,3301 - 0,001465w$$

Millest avaldati osakeste kolooniate kiirus w

$$w = \frac{2,3301 - v_G}{0,001465} \quad (3.12)$$

3. Väljauhtekiiruse w_f avaldamine

$$w_f = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho_f) * g d_p}{3 \rho_f * C_d(Re_{elu})}} \quad (3.13)$$

$$Re_{elu} = \frac{w_f * d_p}{\nu} = \frac{0,629 * 0,000110}{1,51 * 10^{-5}} = 4,58 \quad (3.14)$$

$$C_d = \frac{21}{Re_{elu}} + \frac{6}{\sqrt{Re_{elu}}} + 0,28 = \frac{21}{4,58} + \frac{6}{\sqrt{4,58}} + 0,28 = 7,67 \quad (3.15)$$

$$w_f = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho_f) * g d_p}{3 \rho_f * C_d(Re_{elu})}} = 0,629 \text{ m/s} \quad (3.16)$$

4. Tahkete osakeste kiiruse v_s avaldamine

$$\frac{v_s}{v} = \frac{v_G}{v} - \frac{w_f}{v}$$

$$\frac{v_s}{2,325} = \frac{v_G}{2,325} - \frac{w_f}{2,325} \quad \rightarrow \quad v_s = v_G - w_f \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow v_s = v_G - 0,629 \quad (3.17)$$

5. Gaasi kiiruse lahjas gaasi faasis avaldamine

$$\frac{v^2}{\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g d_p} = \frac{1}{\lambda} (1 - \varepsilon_L) \phi (1 - \phi) * \frac{1}{\frac{v_G (v_s - w)}{v} \left(\frac{v_s - w}{v} \right)}$$

$$\frac{v^2}{\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g d_p} = \frac{2,325^2}{\frac{2533,2 - 1,2}{1,2} * 9,81 * 0,000110} = 2,374$$

$$\frac{1}{\lambda} (1 - \varepsilon_L) \phi (1 - \phi) = \frac{1}{0,00533} (1 - 0,67) 0,99781745 (1 - 0,99781745) = 0,134835$$

$$0,134835 * \frac{1}{\frac{v_G (v_s - w)}{v} \left(\frac{v_s - w}{v} \right)} = 2,374 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{\frac{v_G (v_s - w)}{v} \left(\frac{v_s - w}{v} \right)} = \frac{2,374}{0,134835}$$

$$\frac{1}{\frac{v_G}{v} \left(\frac{v_s}{v} - \frac{w}{v} \right)} = 17,61 \quad \rightarrow \quad \frac{v_s}{v} \left(\frac{v_G}{v} - \frac{w}{v} \right) = \frac{1}{17,61} = 0,0568$$

$$\frac{v_s}{2,325} \left(\frac{v_G}{2,325} - \frac{w}{2,325} \right) = 0,0568 \quad | \cdot 2,325 \quad \rightarrow \quad v_G \left(\frac{v_s - w}{2,325} \right) = 0,132 \quad \rightarrow$$

$$\frac{v_G v_s - v_G w}{2,325} = 0,132 \quad | \cdot 2,325 \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow v_G v_s - v_G w = 0,307 \tag{3.18}$$

6. Massikulu M_s leidmine

Võrrandisse (3.18) asendan leitud avaldised (3.17) ja (3.12)

$$v_G v_s - v_G w = 0,307$$

$$v_s = v_G - 0,629$$

$$w = \frac{2,3301 - v_G}{0,001465}$$

$$v_G (v_G - 0,629) - v_G \left(\frac{2,3301 - v_G}{0,001465} \right) = 0,307 \quad \rightarrow$$

$$v_G^2 - 0,629 v_G - \frac{2,3301 v_G + v_G^2}{0,001465} = 0,307 \quad | \cdot 0,001465 \quad \rightarrow$$

$$0,001465 v_G^2 - 0,00092 v_G - 2,3301 v_G + v_G^2 = 0,00045$$

$$\mathbf{1,001465 v_G^2 - 2,331 v_G - 0,00045 = 0}$$

$$v_G = \frac{2,331 \pm \sqrt{5,434 - 4 * 1,001465 * (-0,00045)}}{2 * 1,001465}$$

$$v_G = \frac{2,331 + 2,3315}{2,00293} = 2,3278 \text{ m/s}$$

$$v_s = 2,3278 - 0,629 = 1,699 \text{ m/s}$$

$$w = \frac{2,3301 - 2,3278}{0,001465} = 1,57 \text{ m/s}$$

$$\dot{M}_s = \rho_s (1 - \varepsilon_L) w (1 - \phi) F$$

$$\dot{M}_s = 2533,2 * (1 - 0,67) * 1,57 * (1 - 0,99781745) * 0,0113 = 0,0324 \text{ kg/s}$$

Saadud tulemus tuleb jagada ristlõikepindalaga, et saada massivoog kilogrammi sekundis pindalaühikukohta.

$$\dot{M}_s = \frac{0,0324}{0,0113} = 2,87 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Tabel 3.4.2 Katseandmete põhjal arvatud tulemused

Katse nr.	Kogu õhukulu	õhukiirus koldes	Massivoog, M_s	U_{tr}	U_{se}
	SLPM	m/s	kg/m ² s	m/s	m/s
1.	738,984	1,07	0,30	2,334	2,309
2.	1255,038	1,815	1,70		
3.	1606,656	2,325	2,87		
4.	1984,347	2,873	2,08		

Massivoog langes kõige suurema kulu juures ilmselt sellepärast, et tuha tagasivool koldesse ei olnud stabiilne ning katse lõpus ei olnud koldes piisavalt materjali.

4. KOKKUVÕTE

Tallinna Tehnikaülikoolis Soojustehnika instituudis toimunud külmkatsetel uuriti põlevkivi tuha massivoogude liikumist koldes 60 kW tsirkuleeriva keevkihiga katsestendis. Eesmärgiks oli leida, tuha massivoogude liikumine erinevate kiiruste juures. Antud suurus on oluline katla stabiilse töö saavutamisel.

Külmkatsetusel kasutati INTREX'i tuhka, mis sisaldas kuni 3 mm diameetriga osakesi. Arvutuste tegemiseks leiti kasutatud tuha osakeste keskmine diameeter d_p . Enne tsirkuleeriva keevkihiga katlastendi külmkatsetust, viidi läbi katse väikses katsestendis, mille peamiseks eesmärgiks oli määrata tuha poorsus ning minimaalne pindkiirus u_{mf} . Saadud tulemusi kasutati hiljem massivoogude arvutamisel.

Arvutamisel kasutati mudelit, kus kahe dimensioonita massibilansi, kahe dimensioonita jõubilansi ja dimensioonita libisemiskiiruse võrrandi abil leiti massivoog kilogrammi sekundis pindalaühiku kohta. Lisaks kasutati katseandmeid, et määrata transpordikiirus u_{tr} ning kriitiline kiirus u_{se} .

Arvutused teostati neljale erinevale õhukiirusele, kus suurim massivoog ($M_s = 2,87 \text{ kg/m}^2\text{s}$) esines kiirusel, mis jäi kriitilise kiiruse u_{se} ja transpordikiiruse u_{tr} vahele. Transpordikiirusest suuremal kiirusel massivoog vähenes, kuid seda võis põhjustada ka materjali puudujääk, sest stabiilset tuha tagasi koldesse suunamist ei toimunud.

Antud tööd on võimalik võtta aluseks tsirkuleeriva keevkihiga katlastendi parameetrite arvutamisel. Tuha massivoogude arvutamine on oluline, kuid selleks, et saavutada katlastendi stabiilne režiim, tuleks tulevikus kindlasti arvutada tsirkulatsiooni arvu, takistusi, mida tsüklon ja EHE tuhavoolustele avaldavad ning seda nii külmkatsetusel kui ka töötemperatuuril.

5. SUMMARY

In this thesis the results of a cold test in a 60kW_{th} pilot scale circulating fluidized bed which was carried out in Tallinn University of Technology, Department of Thermal Engineering, are presented. The aim of this research was to estimate solids mass flow rates at different superficial gas velocities.

In cold test ash from INTREX heat exchanger, containing particles up to 3 mm, was used. The average diameter of particles d_p was used in the calculations. Before the main test in 60kW_{th} pilot scale circulating fluidized bed, a cold test in a smaller teststand was carried out. The main purpose of this test was to determine minimum fluidization velocity u_{mf} and porosity at minimum fluidization. Obtained results were used in calculations of solids mass flow rate.

With the two dimensionless mass balances, two dimensionless force balances and the dimensionless equation for the slip velocity, area specific solids mass flow rate (kg/m²s) can be calculated. In addition, test results were used to calculate transport velocity u_{tr} and critical velocity u_{se} .

Using the given model, solids mass flow rate was calculated on four superficial gas velocities. The highest mass flow was obtained on a velocity between critical velocity and transport velocity. Due to lack of solids in bed which occurred because stable ash recycling back to the bottom of the combustion chamber did not take place, mass flow rate decreased on a higher velocity.

This thesis can be taken as basis of calculating parameters of 60kW_{th} pilot scale circulating fluidized bed. It is important to know solids mass flow rate in furnace. However, for further analysis and to achieve stable regime it is certainly necessary to calculate circulation rate of solids and resistances in EHE and gas-solids separator in cold test and in operating temperatures as well.

6. KASUTATUD ALLIKAD

- [1] M. Bachmann, R. Ilp ja K. Kilk, Kukersiit ja konnatahvel: meie energia lugu, Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda, 2014.
- [2] A. Ots, Põlevkivi põletustehnika, Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda, 2004.
- [3] A. Hotta, R. Parkkonen, M. Hiltunen, H. Arro, J. Loosaar, T. Parve, T. Pihu, A. Prikk ja T. Tiikma, „Experience of Estonian oil shale combustion based on CFB technology at Narva power plants,“ *Oil Shale*, Vol. 22, lk 381-397, 2005.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure, VDI Heat Atlas, Berlin: Heidelberg : Springer, 2010.
- [5] P. Basu, Combustion and gasification in fluidized beds, Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- [6] P. Basu, Circulating fluidized bed boilers, Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [7] K. Plamus, A. Ots, S. Soosaar ja D. Nešumajev, „Firing Estonian oil shale of higher quality in CFB boilers - environmental and economic impact,“ *Oil Shale*, kd. 28, nr 1, lk. 113-126, 2011.
- [8] J. Loosaar, H. Arro, T. Parve, T. Pihu, A. Prikk ja T. Tiikma, „New 215Mw CFB Power Units For Estonian Oil Shale,“ *18th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, 22 Mai 2005.
- [9] Z. Wang, J. Sun, Z. Yang, L. West ja Z. Li, „Bed-inventory overturn mechanism for pant-leg circulating fluidized bed boilers,“ *Powder Technology*, kd. 214, nr 3, lk 469–476, 2011.
- [10] A. Prochazka ja A. Sliva, „Research of Bed Porosity of Vertical different-shaped Fluidized beds by C Group material Fluidization,“ *NanoCon*, 16 Oktoober 2013.
- [11] J. Werther, Fluidized-Bed Reactors, Hamburg: Hamburg University of Technology, 2007.

- [12] J. Werther, *Introduction of fluid-mechanical principles - the point of minimum fluidization*, Hamburg: TUHH, 2012.
- [13] K.-E. Wirth, „Fluid Mechanics of Circulating Fluidized beds“ *Chemical Engineering Technology*, Vol 14, Issue 1, lk 29-38, Jaanuar 1991.
- [14] H. Jürivete, „Põlevkivi tuha osakeste käitumine keevkihis isothermilistel tingimustel“ Bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2014.
- [15] H. T. Bi, N. Ellis, I. A. Abba ja J. R. Grace „A state of the art review of gas solid turbulent fluidization“ *Chemical Engineering Science*, lk. 4789-4825, 27 Märts 2000.