KIERTOLEIJUREAKTOREIDEN ARINAILMASUUTTIMET

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Alvari Rötkö

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Alvari Rötkö

Kiertoleijureaktoreiden arinailmasuuttimet

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

34 sivua, 19 kuvaa

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

Avainsanat: Kiertoleijureaktori, kiertoleijukattila, arinailmasuutin, suutin, primääri-ilma, arina

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, millaisia arinailmasuuttimia on käytössä kiertoleijureaktorin eri sovelluksissa. Työn tarkoituksena oli saada koottua tietoa erilaisista arinailmasuuttimista yhteen paikkaan, koska varsinkin suomeksi tietoa on heikosti saatavilla.

Työssä käydään aluksi läpi pääpiirteittäin kiertoleijureaktorin toimintaperiaate ja sen käyttökohteita, reaktorin arinan vaatimuksia ja tehtäviä sekä suutinten suunnitteluprosessia. Pääpaino työssä on erilaisten suutinratkaisujen esittelyssä ja niiden hyötyjen tai haittojen pohdinnassa. Suuttimet on jaoteltu niiden geometrian tai tehtävän mukaan.

Työssä löydettiin useita erilaisiin olosuhteisiin tai käyttötarkoituksiin soveltuvia suutintyyppejä, mutta lähes kaikki olivat erilaisissa polttolaitoksissa käytettäviä suuttimia. Suutinratkaisuja löytyi laajalta skaalalta, osa oli suunniteltuja yksittäisen kattilalaitoksen ongelmien takia, osa tietyille polttoaineille ja joissain ei ollut mitään tiettyä käyttötarkoitusta mietittynä, vaan tahdottiin parantaa kaikissa kiertoleijureaktoreiden käyttökohteissa vaikuttavia asioita, esimerkiksi suutinten kulumista tai tukkeumia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy technology

Alvari Rötkö

Primary air nozzles of circulating fluidized bed reactors

Bachelor's thesis

2023

34 pages, 19 figures

Examiner: Docent Kari Myöhänen

Keywords: Circulating fluidized bed reactor, CFB reactor, primary air, nozzle, grid, grate, CFB boiler

The goal of this bachelor's thesis was to find out what kinds of grid air nozzles are used in the different types of circulating fluidized bed reactors. The aim was to collect information about different nozzle types into one place, because it is very difficult to find information about the subject in Finnish.

First the main working principles of a circulating fluidized bed reactor and its uses, the requirements and tasks of the reactors grid and the designing process of a nozzle are explained. The main task of this thesis is to showcase different types of nozzles and discuss their pros or cons. The nozzles are divided by their geometry or the task they are designed to do.

Different kinds of nozzles were found for varying conditions and tasks, but almost all of them were for some type of a boiler plant. A variety of different technical solutions were found. Some nozzles were designed to solve the problems of a single power plant, some were designed for a specific type of fuel, and some were designed for universal difficulties that all circulating fluidized bed reactors face, such as erosion and clogging of the nozzles.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

CFD	numeerinen virtauslaskenta (Computational Fluid Dynamics)
CFB	kiertoleijupeti (Circulating Fluidized Bed)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1 Johdanto 2
2 Taustatietoa kiertoleijureaktoreista 3
2.1 Kiertoleijureaktori 3
2.1.1 Toimintaperiaate 4
2.1.2 Käyttökohteet 6
2.2 Arina 7
2.3 Suuttimien suunnittelu ja valinta 9
3 Suutinratkaisuja 11
3.1 Tattisuuttimet 11
3.2 Ohjaavat suuttimet 12
3.3 Monireikäsuuttimet 15
3.4 Nuolenpääsuutin 19
3.5 Pigtail nozzle 21
3.6 Muuratut suuttimet 23
3.7 Float nozzle 24
4 Johtopäätökset 26
Lähteet 29

1 Johdanto

Tässä kandidaatintyössä käsitellään kiertoleijureaktoreiden arinailmasuuttimia. Aiheesta löytyy suomeksi todella suppeasti tietoa ja englanniksikin aiheesta on varsin työlästä etsiä tietoa, koska sitä ei löydy keskitetysti. Kiertoleijupetiä käyttävät polttokattilat ovat eräs tärkeimmistä keinoista kiinteiden polttoaineiden polttamiseen ympäristöystävällisesti ja kiertoleijureaktoreiden erilaisia sovelluksia käytetään monilla tärkeimmillä teollisuuden aloilla, esimerkiksi metallien ja sementin valmistuksessa. Arinailmasuuttimet ovat usein suunniteltuja tiettyyn käyttökohteeseen ja niiden optimoinnilla voidaan saada suuria säästöjä pitkällä ajanjaksolla. Taloudellisen säästön lisäksi hyvin suunniteltu suutin voi myös vähentää reaktorin päästöjä hyvin toimivan leijutuksen ja sekoittumisen ansiosta.

Arinailmasuuttimista löytyy tietoa yleisellä tasolla kiertoleijureaktoreita käsittelevästä kirjallisuudesta. Yleisimpiä suutintyyppejä on myös listattuna kiertoleijureaktoreita käsittelevissä kirjoissa. Yksityiskohtaisempaa tietoa suuttimien toiminnasta ja suutintyypeistä löytyy tutkimuksista, joissa on otettu käsittelyyn jokin tietty käyttökohde, esimerkiksi ikääntynyt voimalaitoksen kattila, jonka omakäyttöhyötysuhdetta on tahdottu parantaa arinailmasuuttimia optimoimalla. Suuttimia koskevista patenteista ja laitevalmistajien esitteistä löytyy myös yksittäisiin suuttimiin liittyvää tietoa.

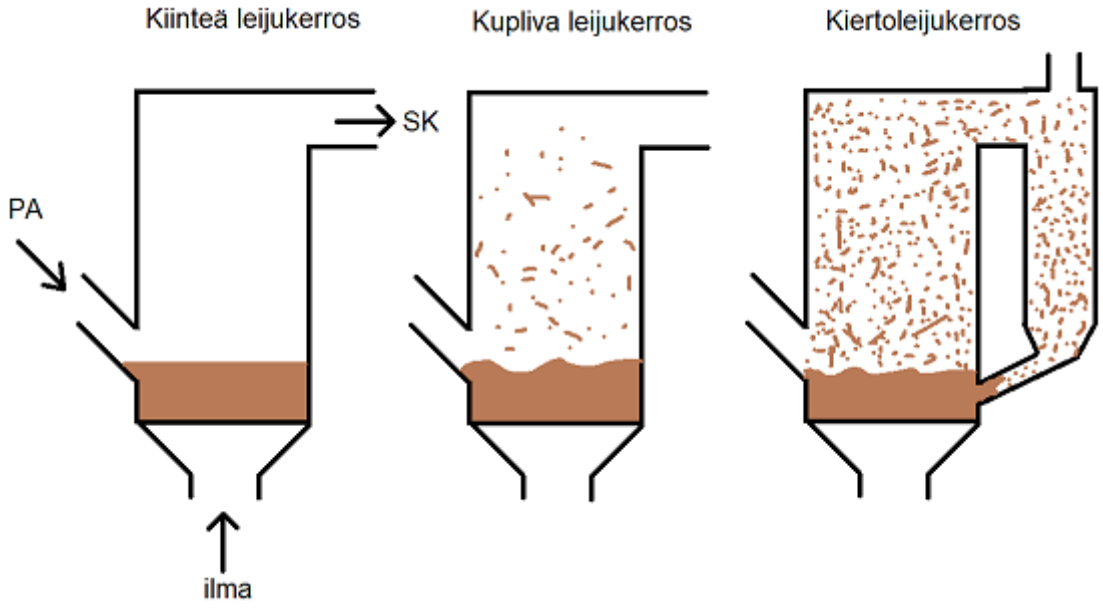
Tämän työn tavoitteena on koota tietoa erilaisista suutinratkaisuista ja kertoa niiden käyttökohteista sekä mahdollisista hyödyistä tai haitoista. Erilaisista suuttimista on yritetty antaa mahdollisimman hyvin havainnekuvia, jotta lukija hahmottaisi erot suutinten välillä. Työssä selitetään myös päällisin puolin kiertoleijureaktorin toimintaperiaate ja sen eri sovelluksia sekä annetaan yleistietoa arinan tehtävistä ja vaatimuksista sekä suuttimien suunnittelusta, jotta lukija ymmärtäisi paremmin esiteltyjä suutinratkaisuja.

2 Taustatietoa kiertoleijureaktoreista

Ensimmäisessä alaluvussa käydään ensin yleisesti läpi kiertoleijureaktoreiden toimintaperiaate ja niiden käyttökohteita teollisuudessa. Toisessa alaluvussa käsitellään kiertoleijureaktoreiden arinan vaatimuksia ja tehtäviä. Kolmannessa alaluvussa käsitellään suutinten suunnittelu- ja valintaprosessia. Aiheet ovat tärkeitä ymmärtää, koska ne liittyvät keskeisesti kolmannessa luvussa käsiteltäviin arinailmasuuttimiin ja niiden toimintaan.

2.1 Kiertoleijureaktori

Leijutuksen ensimmäiset testaukset tapahtuivat noin sata vuotta sitten vuonna 1921 (Basu 2015, s.1) ja sen jälkeen leijutusta on käytetty monilla teollisuuden aloilla. Leijutusreaktorissa erikoisuutena muihin reaktoreihin tai polttokattiloihin verrattuna on petimateriaalin käyttö, joka saadaan leijuvaan tilaan syöttämällä ilmaa reaktorin pohjalta. Pedin käyttäytyminen riippuu petimateriaalin hiukkaskoosta, petimateriaalin ja leijutusilman tiheydestä sekä leijutusilman nopeudesta.

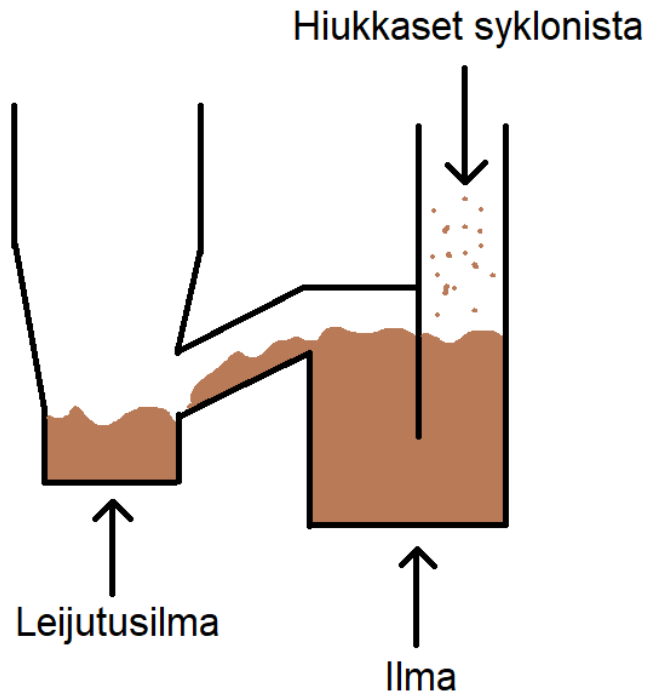


Kuva 1. Leijutusnopeuden vaikutus petimateriaaliin

Kuvassa 1 näkyy leijutusnopeuden aiheuttamat erot leijupedin käyttäytymisessä polttokattilasovelluksessa. Vasemmanpuolimmaisessa pedissä petimateriaalin hiukkaset pääsevät liikkumaan toisiinsa nähden, mutta pysyvät reaktorin pohjalla. Kuplivassa leijukerroksessa pedissä nousevat ilmakuplat saavat pedin käyttäytymään kiehuvan veden tavoin. Kuplivassa leijukerroksessa on selkeä pinta, mutta hiukkasia pääsee silti nousemaan reaktorin ylempiin osiin ilmakuplien hajotessa pedin pinnassa. Kiertävässä leijukerroksessa ilman virtausnopeus ylittää petimateriaalin hiukkasten vapaan putoamisnopeuden, eli terminaalinopeuden, ja hiukkaset alkavat kulkeutua ilman mukana reaktorin yläosia kohti (Raiko et al. 2002, s.491).

2.1.1 Toimintaperiaate

Kiertoleijureaktorissa reaktio tapahtuu jatkuvassa kierrossa olevan petimateriaalin seassa. Petimateriaalin leijutila syntyy reaktorin pohjalla olevan arinan läpi tuotavan leijutusilman ansiosta. Kiertoleijureaktorissa leijutuskaasun nopeus on tyypillisesti 3–10 m/s (Vakkilainen 2017, s.222) ja suurilla leijutusnopeuksilla kiintoaineen määrä on koko reaktorin korkeudella lähes vakio. Petimateriaalin kierron kolme tärkeintä komponenttia ovat tyypillisesti ei-mekaaniset venttiilit, ilman jakelu ja kiintoaine-erotin. Hiukkasten erottamiseksi virtaavasta ilmasta tai savukaasusta tarvitaan kiintoaine-erotin, jonka kautta hiukkaset palaavat takaisin reaktorin alaosiin ja kierto alkaa alusta. Kiintoaine-erotin on yleisimmin sykloni ja niitä voi olla useampia riippuen kiintoaineen määrästä ja halutusta erottelukyvystä. Venttiilien tehtävänä on siirtää erotellut hiukkaset matalassa paineessa olevasta paluukanavasta korkeassa paineessa olevaan reaktiotilaan ilman ulkoista avustusta. Venttiilinä voi toimia esimerkiksi kuvan 2 mukaiset mutkat paluukanavassa, jolloin hiekka muodostaa samankaltaisen lukon ilmamassojen välille kuin vesi wc-pöntön tai tiskialtaan viemärin hajulukossa. Ilman jakelua reaktoriin käsitellään tarkemmin seuraavassa alaluvussa.



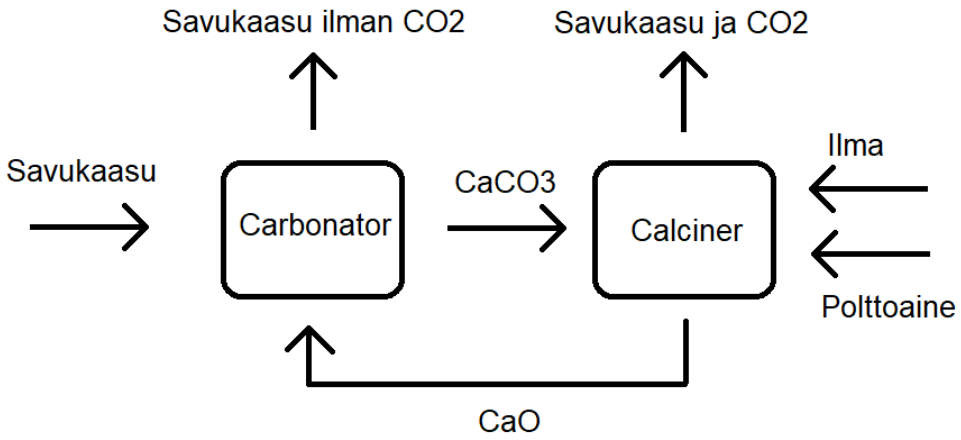
Kuva 2. Polvilukko leijutusmateriaalin paluukanavassa

Petimateriaali koostuu kiertoleijureaktorissa käyttökohteen mukaan esimerkiksi hiekasta, polttoaineen tuhkasta ja tulipesään syötetyn kalkkikiven muodostamista komponenteista (yleensä CaCO3, CaO ja CaSO4). Petimateriaalilla voidaan vaikuttaa paljon prosessin päästöihin, esimerkiksi kalkkia käytetään paljon rikkiä vapauttavien reaktioiden kanssa sitomaan rikkidioksidia muodostaen kalsiumsulfaattia. Petimateriaalin osuus pedin massasta on todella suuri, esimerkiksi polttokattiloissa polttoaineen osuus on luokkaa 1–3 m-% (Basu 2015, s.6). Polttoaineen tai reagoivan materiaalin hiukkaskoko ei siis vaikuta merkittävästi leijutukseen pienen osuutensa vuoksi ja pehmeät kappaleet, esimerkiksi biomassa, hajoavat helposti pienemmiksi kappaleiksi liikkuessaan petimateriaalin seassa. Hiukkaskoko petimateriaalille on kaikkien sovellusten välillä tavallisesti 15 µm- 6 mm (Raiko et al, 2002, s.492) ja polttolaitoksissa tyypillisesti 0,1–0,5 mm (Huhtinen et al, 2022, s.97).

2.1.2 Käyttökohteet

Kiertoleijureaktoreita on käytetty höyryn ja lämmön tuottamiseen vuodesta 1982 alkaen (Basu 2015, s.2) ja leijutustekniikan polttosovellukset ovat nykypäivänä tärkeimpiä keinoja polttaa kiinteitä polttoaineita ympäristöystävällisesti (Raiko et al 2002, s.490). Leijupoltto soveltuu varsinkin huonolaatuisille polttoaineille, joissa on kosteutta, roskia ja vaihtelevaa raekokoa. Tälläisia polttoaineita ovat esimerkiksi yhdyskunnan ja teollisuuden jätevirrat sekä erilaiset biomassapohjaiset polttoaineet. Kiertoleijukattilat toimivat erilaisten hiilityyppien polttoon myös todella hyvin, koska typpi- ja rikkioksidipäästöt on helppo pitää kurissa varsin pienillä investoinneilla ja kiertoleijukattiloita käytetään maailmalla paljon suurten lauhdevoimalaitosten kattilaratkaisuna (Huhtinen et al, 2022, s.36).

Biomassan kaasutukseen kiertoleijureaktorit ovat tällä hetkellä tärkein markkinoilla oleva vaihtoehto suuren kokoluokan operaatioihin, kuten maakaasun korvaukseen sitä vaativissa teollisuuden prosesseissa, esimerkiksi sellutehtaan meesauunissa tai terästen valmistusprosesseissa (Valmet 2020, s.4). Biomassan kaasutuksessa biomassan haihtuvat komponentit vapautuvat poltettavaksi tuotekaasuksi reagoituaan. Biomassan sijasta voidaan myös kaasuttaa tavallisia hiilijakeitakin, jos halutaan välttää hiilen poltosta aiheutuvia päästöjä. Leijutustekniikka soveltuu biomassan kaasutukseen samoista syistä kuin sen polttoonkin, reagoiva aine pysyy leijupedissä tarpeeksi pitkään ja biomassan suuri haihtuvien osuus ei haittaa prosessia (Carvalho 2015, s.3).



Kuva 3. Hiilidioksidin talteenotto savukaasusta kiertoleijureaktorien avulla.

Leijutustekniikkaa voidaan käyttää hiilidioksidin talteenottoon esimerkiksi voimalaitoksen savukaasuista käyttämällä petimateriaalina kalsiumoksidihiukkasia (CaO). Kalsiumoksidi

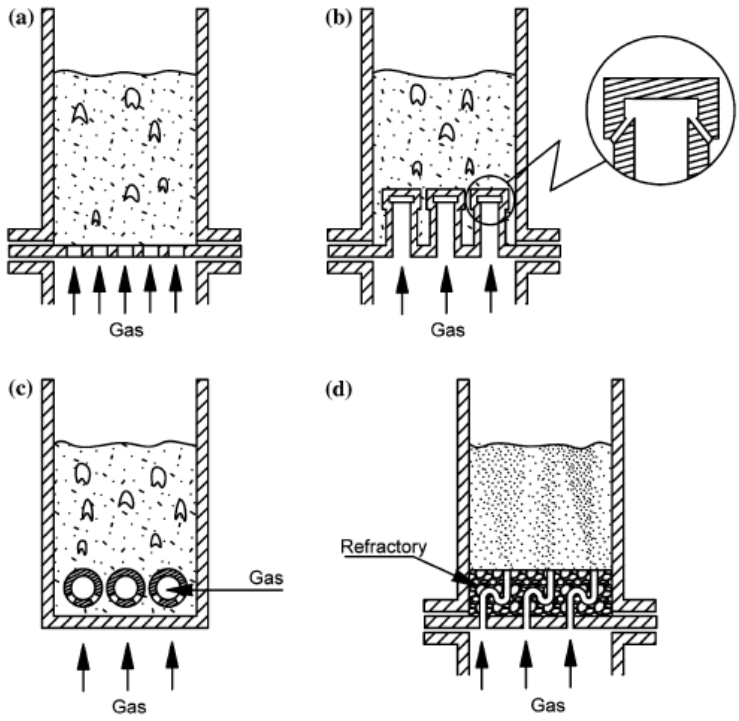
reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia ($CaCO_3$). Hiilidioksidin talteenottoon käytettävän reaktorin petimateriaali kierrätetään toiseen kiertoleijureaktoriin regenerointia varten. Hiilioksidi ja kalsiumoksidi saadaan eroteltua toisistaan, kun reaktorin lämpötila on tarpeeksi korkea ja sen saavuttamiseksi täytyy leijupedissä polttaa myös jotain polttoainetta, esimerkiksi hiiltä. Eroteltu kalsiumoksidi voidaan syöttää taas ensimmäiseen reaktoriin kuvan 3 mukaisesti. Prosessista saadaan ulos kaksi savukaasuvirtaa, toisessa on todella vähän hiilidioksidia ja toisessa sitä on todella paljon. Prosessista joudutaan muidenkin kiertoleijureaktorien tavoin poistamaan kulunutta petimateriaalia sekä polttoaineen tuhkaa ja korvaamaan poistettu materiaali uudella. (Rodriquez et al 2010, s.3) Tässä kappaleessa kuvattua kalsinointiprosessia käytetään myös sementin tuotannossa osana klinkkerin valmistusta ja vähentämään sementinvalmistuksesta aiheutuvia päästöjä, jotka ovat noin 8 % ihmisten toimista johtuvista hiilidioksidipäästöistä (Edoarda et al 2021, s.1).

2.2 Arina

Arina hoitaa kiertoleijureaktorissa samoja tehtäviä kuin esimerkiksi saunan kiukaan arina, eli reagoivan materiaalin kannattelua ja ilman tuontia reaktioon. Arinan läpi tuotavaa ilmaa kutsutaan primääri- tai leijutusilmaksi ja sen osuus koko reaktoriin tuodusta ilmamäärästä riippuu prosessista. Polttosovelluksissa sen osuus on polttoaineen mukaan 40–60 % ilman kokonaismäärästä (Huhtinen et al, 2022, s.98). Kiertoleijureaktorissa arinalta vaadittuja ominaisuuksia ja vaatimuksia on kirjattu seuraavissa kappaleissa.

Olosuhteet aiheuttavat arinalle seuraavia vaatimuksia. Arinan on kyettävä kannattelemaan koko petimateriaalin massaa mahdollisten alasajojen aikana, jolloin petimateriaali leijumisen sijasta lepää arinan päällä (Mirek 2010, s.2). Arinalta halutaan pitkä käyttöikä ilman tukkeumia tai hajoamisia. Arinan ja sen suutinten on toimittava niin, että se minimoi kattilan pintojen eroosion hankaavan kulutuksen takia. Arinan on oltava myös helposti huollettavissa paikkaushitsausten ja suutinten vaihdon suhteen. Joissain sovelluksissa arina saattaa myös altistua korroosiolle, esimerkiksi biomassaa polttaessa, joka on Suomessa todella yleistä.

Leijutuksen optimaalisen toiminnan kannalta on arinalle seuraavia vaatimuksia. Arinan pitää tuoda ilma niin, että koko kattilan poikkileikkauksen alueella on yhtenäinen ja vakaa leijutustila (Mirek 2007, s.2). Arinan ja leijupedin aiheuttaman kokonaispainehäviön on säilyttävä vakiona ajan kuluessa eikä muuttua arinan elinkaaren aikana. Paine-ero arinan ja suuttimen yli on tarkasti mietittävä, liian pieni paine-ero mahdollistaa petimateriaalin kulkeutumista arinan sisäosiin ja liian suuri paine-ero kasvattaa laitoksen energiankäyttöä reilusti (Mustafa et al 2023, s.5). Leijutusilma pitää tuoda arinan läpi niin, ettei arinan pinnalle synny alueita, joissa leijutusta ei tapahdu (Basu 2015, s.245). Ilmavirtaukset pitää kohdistaa niin, ettei leijutuspartikkelit kuluta itseään tai kattilan lämpöpintoja tarpeettomasti. Leijutuspartikkelit eivät saa virrata väärän suuntaan suuttimien ja arinan sisään huonosti suunniteltujen ilmavirtausten takia.



Kuva 4. Erilaisia arinaratkaisuja (Basu 2015, s.243)

Kuvassa 4 on esiteltynä erilaisia arinatyyppejä. Tyypin a arinana toimii reikiä täynnä oleva levy, jonka läpi ilma puhalletaan. Tällaisia arinoita käytetään esimerkiksi pienen kokoluokan testilaitteissa. Tyypin b arina on tässä kandidaatintyössä kohteena oleva suutinarina, jossa ilma tuodaan suutinten reikien ohjaamana petiin. Tämä on selkeästi yleisin arinatyyppi, muun muassa helpon huollettavuuden ja muokattavuuden ansiosta. Tyypin c arina on huuhteluputkiarina, jossa petiin on asennettu vaakasuuntaisia putkia, joiden reikien kautta

ilma tuodaan petiin. Tämä ratkaisu ei vaadi erillistä ilmatilaa, ilmakaappia (engl. ”windbox), arinan alle. Tyypin d arina toimii kuten tyypin a arina, mutta reikälevyn sijaan on käytetty kuumankestävään muuraukseen valettuja S-mallisia pillejä. Tämä arinatyyppi oli käytössä alkukantaisissa kiertoleijukattiloissa, mutta ei ole enää käytössä huoltamisen epäkäytännöllisyyden takia (Basu 2015, s.243).

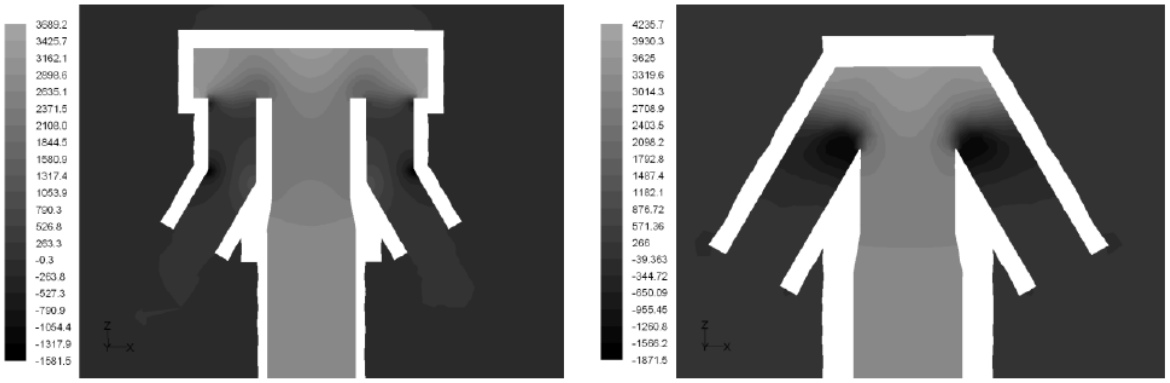
2.3 Suuttimien suunnittelu ja valinta

Uuteen tai olemassa olevaan laitokseen valittavan suuttimen suunnittelu alkaa määrittelemällä alustavia suunnittelukriteereitä suuttimelle kattilan rakenteen perusteella, esimerkiksi suuttimista tulevan ilmasuihkun suunta sekä kokonaispainehäviön alustava suuruusluokka arinan, suuttimien ja pedin yli. Suutinten toiminta-arvojen laskentaan löytyy paljon yhtälöitä esimerkiksi painehäviölle, tilavuusvirralle ja reikien koolle, mutta kyseiset yhtälöt toimivat vain silloin, kun suuttimen geometria on jo tiedossa, eikä niitä voida siis käyttää suuttimen geometrian ratkaisuun (Mirek 2010, s.3).

Suuttimen geometrian suunnittelu aloitetaan lähtökohtaisesti valitsemalla jokin yleisistä suutintyypeistä geometrian pohjaksi ja siihen aletaan tekemään muutoksia haluttujen virtausominaisuuksien saavuttamiseksi. Mietittäviä arvoja suuttimelle ovat esimerkiksi suuttimen ulkomitat, virtauskanavien halkaisijat ja pituudet sekä ilman ulostulojen suunnat ja määrät. Karkean geometrian suunnittelun jälkeen voidaan alkaa tutkia suuttimen toiminta-arvoja laskennallisesti, joiden perusteella voidaan tehdä tarkempia hienosäätöjä vielä ennen käytännön kokeita. On huomattavasti halvempaa suunnitella suutinta CFD ohjelmassa ja sen perusteella tehdä muutoksia, kuin että tekisi joka muutoksen jälkeen prototyyppisuuttimen, jota kokeilisi testilaitteessa.

Kuvassa 5 on esitettynä staattisen paineen jakautuminen erään polttolaitoksen suuttimessa (oikea), sekä samaan laitokseen tehdyssä parannellussa suuttimessa. Muokkauksilla saatiin laskennallisesti paine-eroa suuttimen yli vähennettyä 545 Pa ja alkuperäisessä suuttimessa näkyvät mustat alipaineen alueet, jotka aiheuttivat petiaineen imeytymistä suuttimeen, saatiin poistettua (Mirek 2010, s.5). Käytännön kokeet kyseisellä muokatulla suuttimella

testilaitteessa tuottivat samanlaisia suorituskyvyn parannuksia kuin laskennan perusteella oli ennakoitu ja koetta uskallettiin jatkaa voimalaitoksessa.



Kuva 5. Muokattu nuolenpääsuutin (a) ja tyypillisempi versio (b) (Mirek 2010, s.4)

Laskennan ja virtausmallinnusten perusteella tehtyjen muokkausten jälkeen voidaan suutin valmistaa 1:1 mittakaavassa ja suorittaa testaukset joko pienessä testipenkissä tai tutkimuskäyttöön tarkoitetussa kiertoleijureaktorissa, jos sellainen on mahdollisesti käytössä. Testausten jälkeen voidaan siirtyä valmistuksen suunnitteluun tai tehdä lisää muutoksia suuttimen geometriaan, jos testien tulokset eivät olleet miellyttäviä tai ne eivät vastanneet virtausmallinnusten tuloksia (Mirek 2010, s.7).

Suutinten valmistuksen kannalta eräs tärkeä valinta on suutinten materiaalin valinta, koska kiertoleijureaktoreissa vallitsee sovelluksen mukaan todella erilaisia olosuhteita. Suuttimet altistuvat kiertoleijureaktoreissa hankaavalle kulutukselle, korroosiolle ja korkeille lämpötiloille. Halvin materiaali on tavallinen hiiliteräs, mutta se ei kestä korroosiota eikä korkeita lämpötiloja ilman erikoiskäsittelyjä valmistuksen yhteydessä. Paremmin lämpöä, korroosiota tai eroosiota kestäviä ja samalla kalliimpia vaihtoehtoja ovat esimerkiksi ruostumaton teräs ja muut metalliseokset. Valmistustekniikoita suuttimille löytyy myös useita ja niissäkin hinta nousee suuttimelta haluttujen ominaisuuksien lisääntyessä. Valmistustekniikoita ovat muun muassa valaminen, taonta, hitsaus ja koneistus. Viimeinen osa suutinten suunnitteluprosessissa on päättää suutinten asettelu arinalla, jotta leijutusilma saadaan tuotua mahdollisimman tasaisesti koko kattilan poikkileikkauksen alueelle.

3 Suutinratkaisuja

Tässä luvussa käsitellään erilaisiin käyttökohteisiin suunniteltuja ja optimoituja suutinratkaisuja. Alaluvut on jaoteltu suutintyyppien mukaan. Osa suuttimien nimistä on suomeksi, jos on löytynyt suomeksi järkevä käännös. Loppujen on annettu olla englanniksi eikä ole alettu keksimään uusia suomenkielisiä nimityksiä. Englanninkieliset nimet suuttimille on myös kerrottu, vaikka suuttimelle olisikin vakiintunut suomenkielinen nimitys. Jostain suutintyypeistä vaikuttaa olevan käytössä useita nimityksiä eikä suutinten välillä ole määritelty tarkkoja tuntomerkkejä.

3.1 Tattisuuttimet

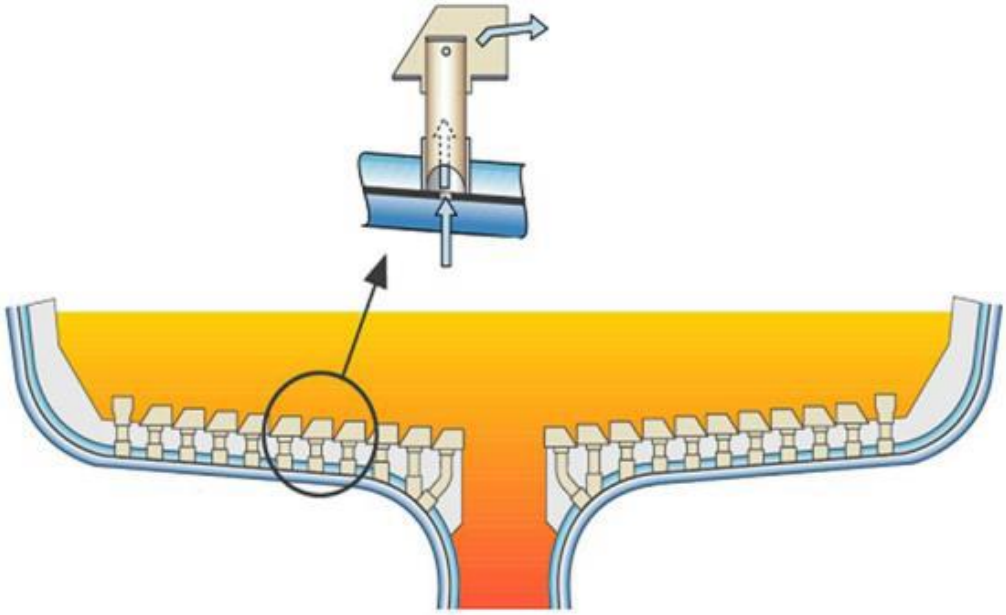
Tattisuuttimen geometria muistuttaa suomenkielisen nimensä mukaisesti sientä, englanniksi myös kutsutaan mushroom nozzleksi. Suuttimen virtauskanava on yksinkertaisesti suoraan ilmakaapista ylöspäin osoittava putki ilman mutkia tai muita esteitä petimateriaalin kulkeutumiselle väärään suuntaan. Suuttimen rakenne on kuitenkin todella jykevä paksulla varrella sekä puolipallon muotoisella yläosalla, kuten kuvasta 6 nähdään.

Kuva 6. Valmetin tattisuutin biomassan polttoon (Valmet 2017, s.10)

Tattisuuttimia käytetään pääasiassa biomassaa polttavissa leijupetikattiloissa. Biomassasta koostuvat polttoaineet sisältävät paljon enemmän epäpuhtauksia hiiliperäisiin polttoaineisiin verrattuna. Hiilen polttoon tarkoitettuja suuttimia käytettäessä biomassan kanssa altistuisivat suuttimet todella suurelle määrälle eroosiota ja korroosiota, jotka ajan kuluessa voivat aiheuttaa ilmavuotoja sekä petimateriaalin virtausta väärään suuntaan (Valmet 2017, s.10). Biomassapohjaisten polttoaineiden savukaasut myös sisältävät enemmän korroosiota aiheuttavia aineita, jotka myös asettavat suuttimet koettelemukselle. On siis käytettävä suuttimia, joissa on enemmän materiaalia kulutettavaksi ja/tai jotka on tehty paremmin eroosiota ja korroosiota kestävästä materiaalista. Näistä vaihtoehdoista ensimmäinen on huomattavasti edullisempi yksinkertaisen geometrian vuoksi, joka mahdollistaa suutinten valmistuksen valamalla. Valmetin biomassaa polttavissa CFB kattiloissa käytettävä kuvan 5 suutin on valmistettu valamalla paljon kromia sisältävästä teräksestä.

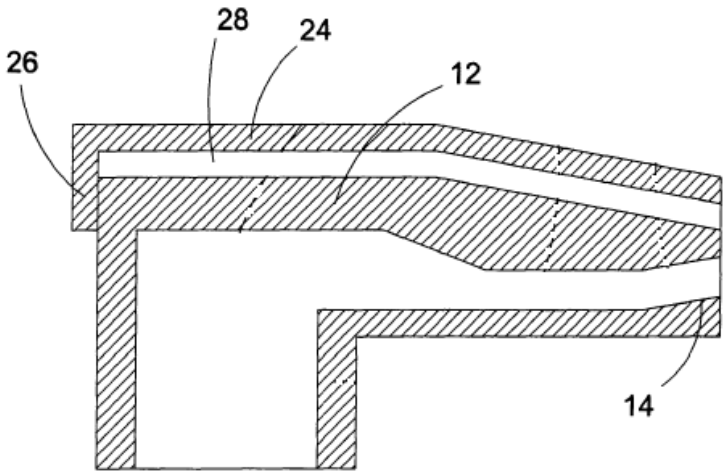
3.2 Ohjaavat suuttimet

Ohjaavia suuttimia (engl. directional nozzle) käytetään polttosovelluksissa sellaisten polttoaineiden kanssa, jotka sisältävät paljon sellaisia epäpuhtauksia, jotka eivät pala leijupedissä. Tällaisia polttoaineita ovat esimerkiksi metsäjäte ja yhdyskuntajäte. Epäpuhtauksia voivat olla esimerkiksi biomassan mukana kulkeutuvat kivet ja metallikappaleet, kuten rautalangat, naulat ja luodit. Suuria kiintoainehiukkasia voi tulla myös petimateriaalin paakkuuntumisesta tai reaktorin seinien muurauksen halkeilusta (Pat. FI 116315B. 2005, s. 1). Ohjaavien suuttimien tehtävänä on työntää arinan päälle kertyvät raskaammat partikkelit arinan keskelle, josta petimateriaali ja sen mukana olevat roskat poistuvat kattilasta. Poistetusta petimateriaalista seulotaan epäpuhtaudet sekä liian hienoksi kulunut petimateriaali, jonka jälkeen se voidaan syöttää takaisin reaktoriin.



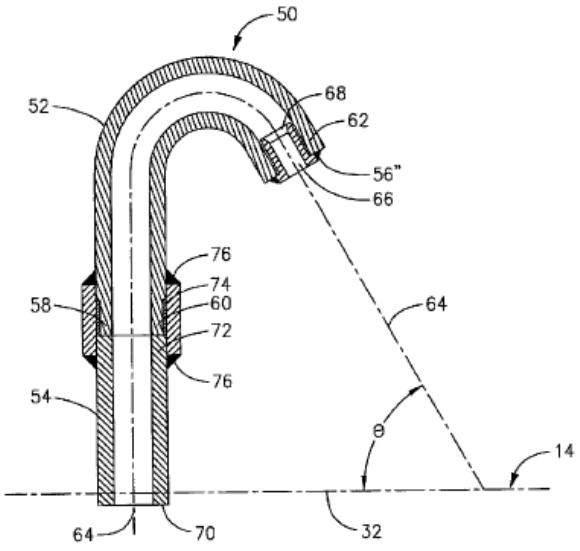
Kuva 7. Valmetin jätepolttoon tarkoitettu ohjaava suutin roskien keräämiseksi (Valmet 2017, s.10)

Ohjaavassa suuttimessa ilma tuodaan petiin lähestulkoon vaakatasossa ja usein yhtä kanavaa pitkin. Kuvissa 7 ja 8 näkyy, miten ilmavirta tulee molempien valmistajien ohjaavasta suuttimesta ulos. Ilmavirta osoittaa hieman yläviistoon suuttimen ulostulossa, jotta ilmavirta ja sen mukana kulkevien partikkelien eroosiovaikutus suihkun edessä olevaan suuttimeen olisi pienempi. Joissain olosuhteissa on kuitenkin mahdollista, että kuvassa 8 numerolla 14 merkattu ”alahuuli” aiheuttaa pyörteen suuttimen eteen, joka pahentaa seuraavaan suuttimen kulumista (Pat. FI 116315B. 2005, s. 5). Suuttimen takareuna on myös viistossa samasta syystä Valmetin suuttimessa takana olevan suuttimen eroosiovaikutuksen vähentämiseksi. Valmetin kuvasta nähdään myös suutinten asettelun portaisuus, arinan reunoilla olevat suuttimet ovat korkeammalla kuin keskellä olevat. Porrasta suutinten välillä korkeussuunnassa ei kuitenkaan voi kovin paljoa olla, jotta paine-erot pedissä pysyvät tasaisina.



Kuva 8. Poikkileikkauskuva ohjaavasta suuttimesta erillisellä kulutuspinnalla (Muokattu lähteestä Pat. FI 116315B. 2005, kuva 2b)

Kuvassa 8 näkyvässä suuttimen poikkileikkauksessa nähdään suuttimen takaosaa sekä yläpintaa peittävä uhrimateriaalina toimiva suojalevy, joka mahdollistaa kulutuspalan vaihtamisen koko suuttimen sijasta. Tämä on edullisempaa ja nopeampaa, kuin koko suuttimen vaihtaminen. Kulutuspintana toimivan kannen sekä itse suuttimen väliin on myös jätetty pieni ilmarako, jolla estetään kulutuspinnan jäähtymistä leijutusilman virratessa suuttimen läpi. Kannen lämpötila halutaan nostaa kattilassa korroosiota aiheuttavien natriumin sekä kloorin suolojen reaktiivisimman lämpötila-alueen 450–600 °C yläpuolelle kulutuspalan käyttöiän pidentämiseksi (Pat. FI 116315B. 2005, s. 3).

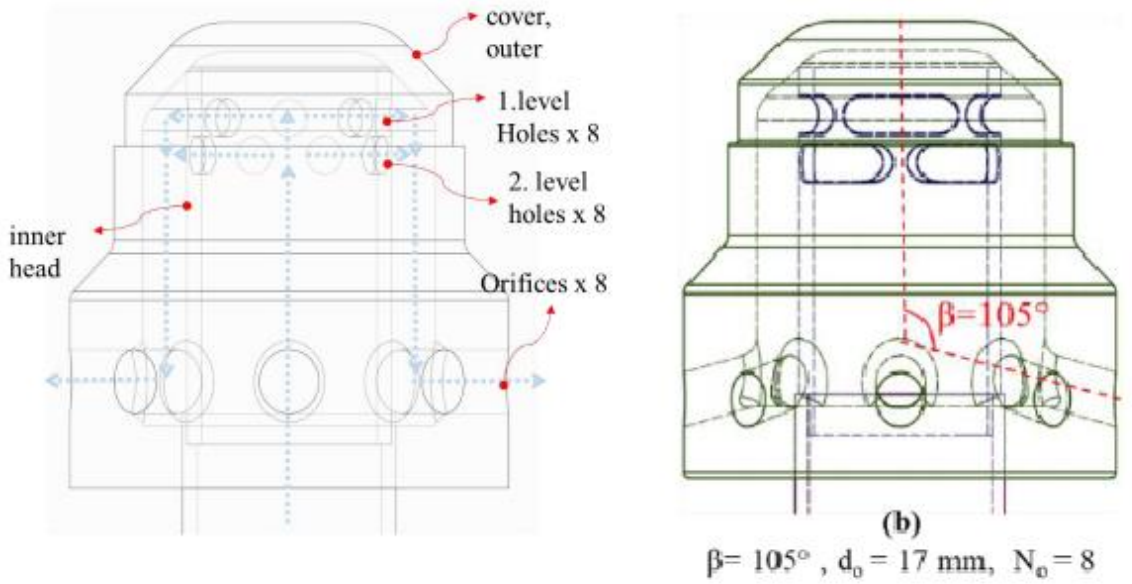


Kuva 9. Putkirunkoinen ohjaava suutin (Pat. WO 2010/011457 A2. 2010, s.14)

Kuvassa 9 nähdään Alstomin patentissa kuvailtu karkkikepin muotoinen ohjaava suutin, joka on tarkoitettu käytettäväksi samanlaisissa polttolaitoksissa, kuin muutkin tämän alaluvun ohjaavat suuttimet. Tämän suuttimen kohdalla ei ole yritetty estää petimateriaalien takaisinvirtausta ja sen aiheuttamaa suutinten tukkeumaa, vaan ongelma on ratkaistu tekemällä suutin niin suurella halkaisijalla olevasta putkesta, ettei suuttimen tukkeumaa ehdi tapahtua huoltoseisokkien välissä. Huollettavuudeltaan tämä suutin on myös yksinkertainen, ruuvataan tai leikataan vanha suutin irti ja kierretään tai hitsataan uusi tilalle. Tässä ratkaisussa on siis taloudellista säästöä lähdetty etsimään pienentämällä valmistus- ja huoltokustannuksia sekä lyhentämällä huoltoseisokkien aikaa sen sijaan, että yritettäisiin optimoida suuttimen toimintaa. (Pat. WO 2010/011457 A2. 2010, s.3)

3.3 Monireikäsuuttimet

Muiden suutintyyppien saadessaan nimensä ulkomuotonsa tai tehtävänsä perusteella, on monireikäsuuttimen nimitys tullut yksinkertaisesti siitä, että siinä on monta reikää. Englanniksi nimitys multiorifice nozzle tulee myös samasta syystä. Tämän takia tämän suutintyypin alle mahtuu paljon erinäköisiä suutinratkaisuja, joissa kaikissa on vaihtelevissa määrin reikiä. Monireikäsuuttimet koostuvat usein kahdesta tai kolmesta osasta, arinaan kiinnitettävästä pystyputkesta, sisemmästä suuttimesta, jossa voi olla reikiä ilmavirran jakautumista varten sekä ulkokuoresta, joka kiinnitetään pystyputkeen ja jonka rei’istä leijutusilma pääsee suuttimesta ulos. Tämä tekee suuttimien huoltamisesta sekä helpompaa että edullisempaa, jos koko suuttimen sijasta tarvitseekin vaihtaa pelkästään suuttimen uloin kuori. Toisaalta monireikäsuuttimen mahdollisesti monimutkaisen rakenteen takia valmistuskustannukset voivat olla huomattavasti kalliimmat kuin muissa suutinvaihtoehdoissa. Pigtail tyyppiseen suuttimeen verrattuna monireikäsuuttimet ovat energiatehokkaampia pienemmän painehäviönsä ansiosta ja nuolenpäätyyppisiin suuttimiin verrattuna monireikäsuuttimet eivät aiheuta yhtä paljoa eroosiota tai petimateriaalin karkailua eri tavalla suuntautuvien ilmasuihkujen ansiosta (Zhong 2019, s.1).

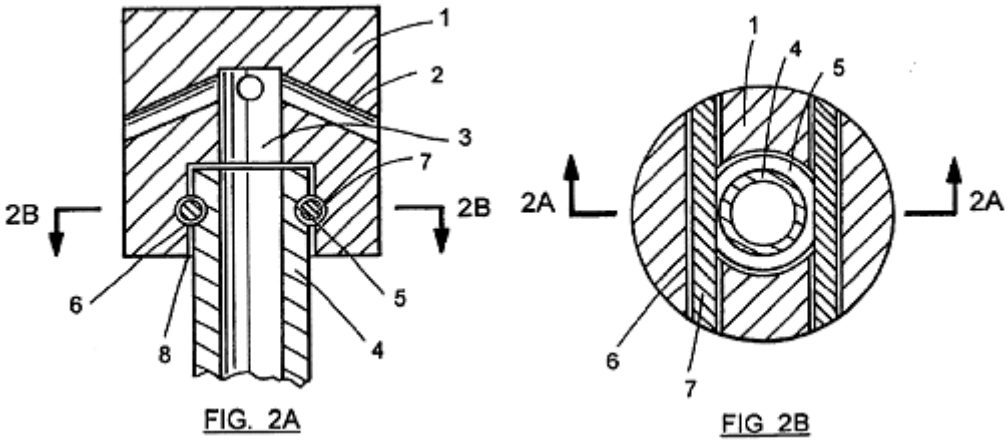


Kuva 10. Alkuperäinen (vasen) ja muokattu suutin 160 MWe ligniittiä polttavasta kiertoleijukattilasta (Mustafa et al 2023, s.11 ja s.27).

Kuvan 10 molemmissa suuttimissa ilma tulee pystysuoraa putkea pitkin reikien kautta suuttimen sisäosaan, jonka jälkeen ilma kulkee alaspäin suuttimen ulkokuoren ja sisääntuloputken välissä. Ilma pääsee ulos suuttimesta ulkokuoren alareunassa olevien reikien kautta. Kuvassa 10 suuttimeen tehtyjä muutoksia oli vasemmanpuoleisen alkuperäisen suuttimen sisääntuloputken kahdessa kerroksessa olevien 16 reiän vaihtaminen kahdessa kerroksessa oleviin 8 soikeaan reikään. Ulkokuoressa olevien reikien ja sisääntuloputken välisen kulman vaikutusta oli myös kyseisessä tutkimuksessa tarkasteltu ja tutkimusryhmä oli päätynyt kuvassa näkyvään 105° kulmaan. Alkuperäisen suuttimen keskimääräinen painehäviö oli 6,81 kPa ja uuden suuttimen painehäviö oli 3,95 kPa kattilan ajaessa täydellä kuormalla. Kyseisillä muokkauksilla arinailmasuuttimeen on teoriassa mahdollista säästää kahden kiertoleijukattilan voimalaitoksessa omakäyttötehosta vuosittain 2,26 GWh edestä sähköä suuttimien pienemmän painehäviön ansiosta. (Mustafa et al 2023, s.33)

Kuva 11. Mahdollisia ongelmia suuttimen toiminnassa, kanavien kulumaa ja tukkeutunut suutin (Zhong 2019, s.3)

Toinen tapaus monireikäsuuttimien optimoinnista on kattilalaitos, jossa uusista monireikäsuuttimista 5000 tunnin ajon jälkeen kattilan 715 suuttimesta 34,5 % olivat sellaisessa kunnossa, että ne jouduttiin vaihtamaan. Ongelmia aiheuttivat kuvassa 11 näkyvät suuttimen ulomman kuoren ulostulokanavien eroosio ja suuttimien tukkeutuminen petimateriaalilla. Suuttimille ilmaa tuovien putkien hajoilu aiheutti myös ongelmia kyseisessä laitoksessa. Ongelmaan haettiin ratkaisua muokkaamalla suuttimen ulostulokanavien muotoa pyöreistä soikeiksi, lisäämällä niiden määrää kahdeksasta kymmeneen sekä kääntämällä ilmavirran suuntaa vaakatasosta 20° alaspäin. Ensimmäinen muutos suuttimen toiminnassa oli pienempi virtausnopeus ulostulorei’issä, joka vähensi suuttimen kulumista mekaanisen hankauksen takia. Toinen muutos oli suutinten alapuolelle kertyvien raskaampien hiukkasten saaminen liikkeelle alaspäin suuntautuvien ilmasuihkujen ansiosta, joka pienentää tukkeutumisen mahdollisuuksia. Alaspäin suuntautuvat virtaukset eivät myöskään häiritse viereisten suutinten toimintaa yhtä paljoa kuin vaakasuoraan puhaltavat. Muokattujen suutinten käyttöönoton jälkeen 5000 tunnin ajon jälkeen vaihtokunnossa oli vain 2,6 % kattilan suuttimista, eli suutinten käyttöikä piteni erittäin paljon. (Zhong 2019, s.11)



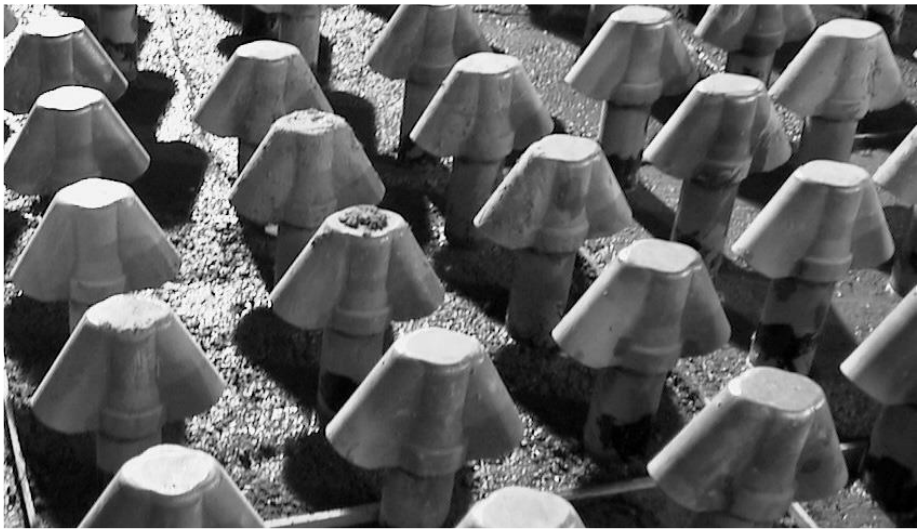
Kuva 12. Keraamisella ”hatulla” varustettu monireikäsuutin (Pat. US 6,868,795 B2 2005, s.3)

Kuvassa 12 näkyvä suutin on suunniteltu käytettäviksi kupla- tai leijupetiä käyttäviin polttokattiloihin tai reaktoreihin. Kyseistä patentoitua ratkaisua ei ole siis tehty niinkään mikään tietty sovellus mielessä, vaan on tahdottu löytää ratkaisu leijutekniikan monissa sovelluksissa suutinten kokemaan kovaan eroosion. Suutin koostuu arinan ilmakaappiin kiinnitettävästä ruostumattomasta teräksestä tehdystä syöttöputkesta sekä sen päälle tulevasta keraamisesta hatusta, jossa on useita alaviistoon osoittavia reikiä leijutusilman tasaista jakelua varten. Keramiikan ja teräksen toisiinsa kiinnitykseen ei voida käyttää yleisesti käytössä olevia kierteitä tai hitsausta, joten tässä suuttimessa kiinnitys on toteutettu kuvissa numerolla 7 merkityillä tapeilla, jotka kiinnittävät osat toisiinsa. Varren ja hatun väliin muodostuvan raon tiivistämiseksi esitettiin myös suutinmallia, jossa osien väliin oli asennettu kuumia lämpötiloja kestävä tiiviste. Keraaminen materiaali kestää ruostumattoman teräksen tavoin hyvin tyypillisen leijupetikattilan lämpötiloja, mutta vertaillessa aineiden eroosion kestävyyttä on keramiikka selkeä voittaja. Valmistuskustannusten suhteen aineet ovat lähellä toisiaan, eli pidemmän elinkaaren omaavaa keramiikkaa käyttämällä voidaan pitkällä ajanjaksolla tehdä säästöjä. (Pat. US 6,868,795 B2 2005, s.9)

3.4 Nuolenpääsuutin

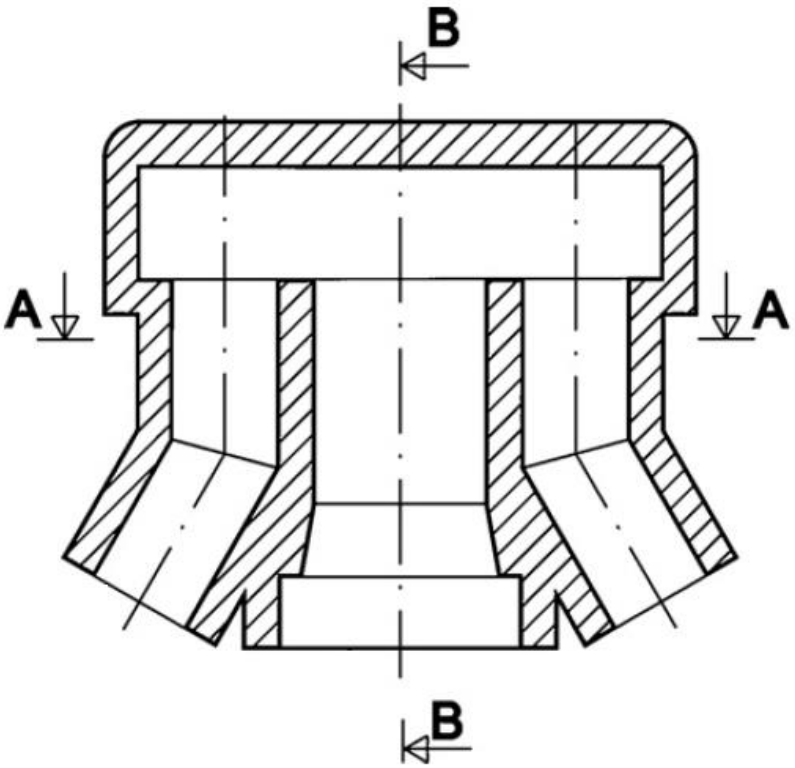
Nuolenpääsuutin (engl. arrowhead nozzle) saa nimensä monien muidenkin suutinten tapaan geometriansa mukaan. Luvun 2 kuvassa 5 nähdään nuolenpääsuuttimen poikkileikkaus, jonka perusteella nähdään selvästi, mistä suutin on saanut nimensä. Suuttimen ilmakanava tulee ilmakaapista suoraan ylöspäin ja sen jälkeen jakaantuu kahteen alaviistoon osoittavaan sekä toisiaan vastapäisiin suuntiin oleviin kanaviin. Alaspäin osoittavat ilmakanavat varmistavat sen, että jopa arinan pinnan korkeudella tapahtuu petimateriaalin sekoittumista. Nuolenpääsuutinta käytetään ainakin hiilen leijupolttoon (Mirek 2011, s.6).

Kuvasta 5 myös havaitaan yksi nuolenpääsuuttimelle tyypillisistä ongelmista, joka on matalan paineen alueen syntyminen suuttimen ilmakanavaan tiukan mutkan takia. Tämä mahdollistaa petimateriaalin imeytymistä virtauskanavaan. Tämä ongelma esiintyy kattilalaitoksissa varsinkin matalalla kuormalla ajaessa, jolloin myös paine-ero ilmakaapin ja tulipesän välillä on pienimmillään (Mirek 2005, s.2). Petimateriaalin kulkemista väärään suuntaan voi tapahtua muillakin kuormituksilla ajettaessa ja sitä aiheuttaa nuolenpääsuuttimen geometrian lisäksi epätasainen ilmantuonti suutinten kesken tai huonosti suunniteltu suutinten asettelu. Suuttimen toinen ulostulokanava voi myös tukkeutua, jolloin ilmavirta kulkee voimakkaammin ulos jäljelle jääneestä kanavasta ja voi työntää petimateriaalia toiseen suuttimeen korkeamman virtausnopeutensa ansiosta.



Kuva 13. Nuolenpääsuuttimia hiiltä polttavassa 670 MWth kiertoleijukattilassa (Mirek 2007, s.5)

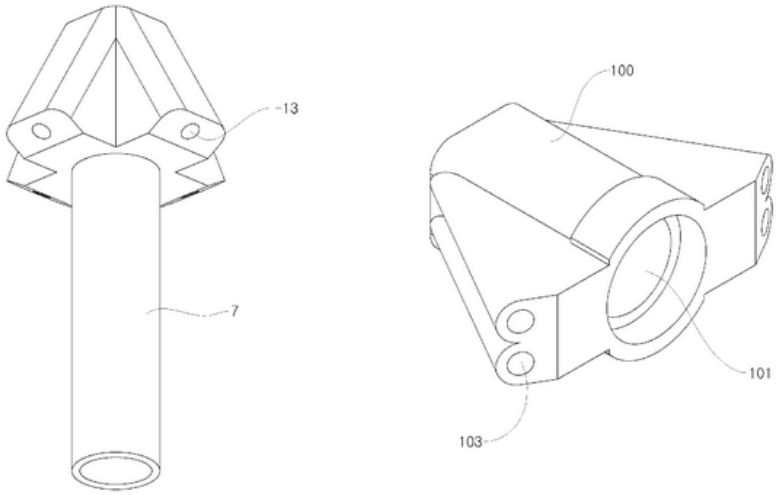
Kuvien 13 ja 16 suuttimia vertailtiin kahdessa samanlaisessa kattilalaitoksessa suutinten ollessa ainoa ero laitosten välillä. Testauksella haluttiin selvittää suuttimen muodon vaikutus NOx päästöihin, kun kaikki muut muuttujat pysyvät samoina. Koeajossa havaittiin, että nuolenpääsuuttimet sekoittivat leijupedin alaosia heikommin kuin pigtail suutin, joka johti heikompaan lämmönsiirtoon sekä korkeampiin tulipesän lämpötiloihin. Samalla myös NOx päästöt olivat nuolenpääsuuttimella varustetussa laitoksessa yli 50 % suuremmat kuin pigtail suutinta käyttävässä laitoksessa. (Mirek 2007, s.6)



Kuva 14. Uudistettu nuolenpääsuutin hiiltä polttavaan 235 MWe kiertoleijukattilaan (Mirek 2011, s.4)

Kuvan 14 muokatulla nuolenpääsuuttimella saatiin korjattua suutintyypille ominaista petimateriaalin karkailua, ainakin testilaitteessa. Kyseessä on sama suutin kuin luvun 2 kuvassa 5. Uudistetussa mallissa ei ole alkuperäisen mallin jyrkkiä kulmia ja alaspäin osoittavat kanavat ovat pidemmät, joka mahdollistaa virtausten nopeusprofiilien tasoittumisen ennen tulipesään joutumista. Uudistetut suuttimet asennettiin suoraan vanhojen suutinten paikalle ja suutinten kuluminen on vähentynyt alkuperäisiin nähden. Tämä oli ollut ongelmana eräässä kattilassa, ja syynä oli ollut alkuperäisen suuttimen geometria sekä yksittäisen syklonin aiheuttama yksipuolinen petimateriaalin paluu kattilaan

verrattuna muiden samaa suutinta käyttäneiden kattiloiden kahteen sykloniin. (Mirek 2011, s.3)



Kuva 15. Korealaisia 4 ulostulolla varustettuja nuolenpääsuuttimia (Pat. KR 20130047091A, s. 8)

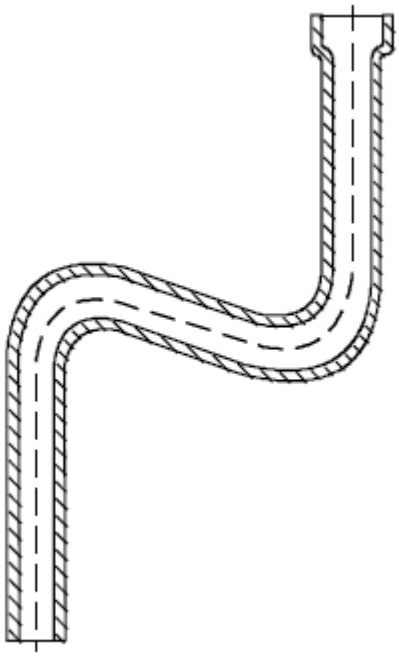
Kuvassa 15 näkyvissä nuolenpääsuuttimissa on tahdottu tasoittaa leijutusilman tuontia palamistilaan lisäämällä ilmakanavia. Toisessa on ulostulojen puolesta kaksi tavallista nuolenpääsuutinta rinnakkain ja toisessa on kaksi päällekkäin mutta toista on käännetty tuloputken ympärillä 90°. Koreasta englantiin käännetyssä patentissa ei kerrottu millaiseen polttokattilaan suutin on tarkoitettu, mutta jos suutin on tarkoitettu Etelä-Korealaiseen kattilaan, niin se on todennäköisesti hiiltä polttava.

3.5 Pigtail nozzle

Sian saparon mukaan englanniksi nimetty suutin on yksinkertaisuudessaan arinaan kiinnitetty putki, jossa on kaksi mutkaa estämässä petimateriaalin valumista arinan sisäosiin seisokin aikana ja mutkien jälkeen putki osoittaa ylöspäin puhaltaen leijutusilman suoraan ylöspäin. Molemmissa löydetyissä havainnekuvissa suuttimena toimivan putken halkaisija kasvaa putken loppupäässä. Tämän tyyppinen suutinratkaisu on putkirakenteensa ansiosta erittäin edullinen ja nopea valmistaa, vaikka jouduttaisiinkin käyttämään esimerkiksi ruostumatonta terästä tavallisen rakenneteräksen sijasta. Näitä suuttimia käytetään ainakin hiiltä polttavissa kiertoleijukattiloissa (Mirek 2007, s.6).

Kuva 16. Pigtail suutin 670 MW_{th} kiertoleijukattilassa (Mirek 2007, s.5)

Kuvassa 16 näkyvää pigtail suutinta käyttävää ruskohiilellä syötettyä kiertoleijukattilaa vertailtiin samanlaiseen kattilaan, jossa oli käytössä kuvan 13 nuolenpää suuttimet. Testin tuloksia on käsitelty jo nuolenpää tyyppisiä suuttimia käsittelevässä alaluvussa, mutta lyhykäisyydessään pigtail suuttimella päästiin matalampiin NOx päästöihin.

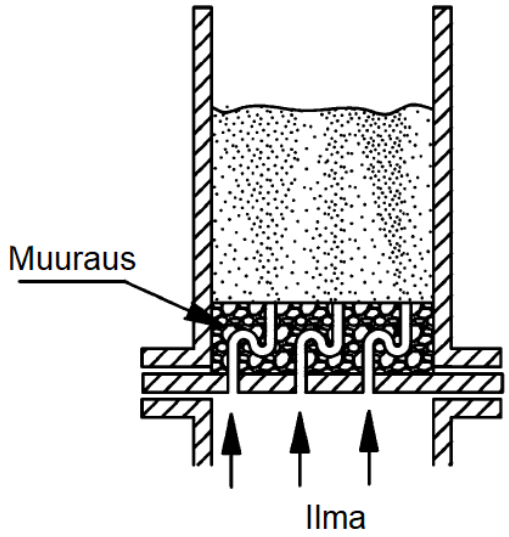


Kuva 17. Pigtail suuttimen poikkileikkaus (Mirek 2010, s.2)

Kuvan 17 pigtail suuttimessa on jyrkemmät mutkat kuin toisessa havainnekuvassa, tässä versiossa petimateriaalin tarvitsee kulkea putkessa ylöspäin päästäkseen tulipesästä arinan sisäosiin. Tämä suutintyyppi vastaa rakenteeltaan paljon seuraavassa alaluvussa käsiteltäviä muurattuja pillejä, erona on, että pigtail tyyppiset suuttimet ovat kiinnitettyinä arinaan eivätkä ne ole upotettuna arinan muuraukseen.

3.6 Muuratut suuttimet

Tulipesän pohjan muurauksen sisään kuvan 18 mukaisesti asennetut mutkaiset pillit olivat eräs vaihtoehto palamisilman tuonnille ensimmäisissä kiertoleijukattiloissa (Basu 2015, s.243). Pillissä oleva mutka estää petimateriaalin valumisen tulipesästä seisokin aikana ja mutkan jälkeen ilma kulkee suoraan ylös tulipesään. Leijutuksen kannalta tämä ratkaisu toimii siis kuin muutkin suoraan ylöspäin ilmaa puhaltavat suuttimet tai pienissä testipenkkilaitoksissa olevat reikälevyarinat.



Kuva 18. Muuratut S-pillit (Muokattu lähteestä Basu 2015, s.243)

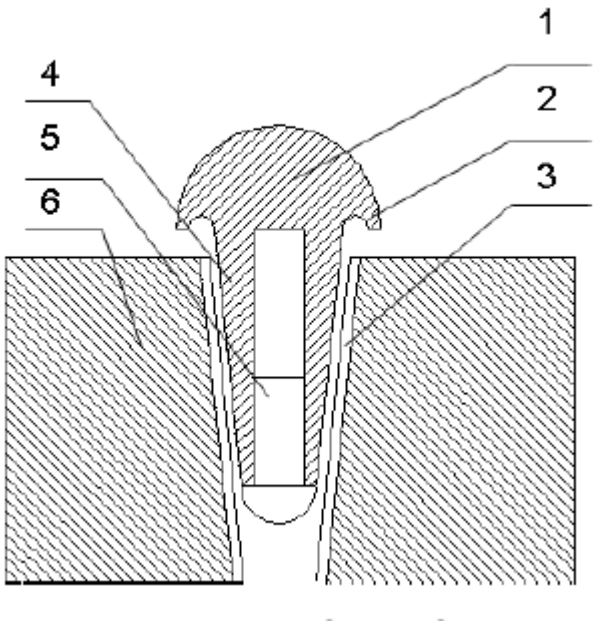
Tämän arinatyypin ongelma tulee esille vasta siinä vaiheessa, kun putket ovat vaurioituneet ja vanha putki pitäisi vaihtaa uuteen. Arinaan pulttiliitoksella tai hitsisaumalla liitetyn suuttimen saa nopeasti irrotettua ja vaihdettua uuteen, kun taas tässä tyypissä kattilan pohjan muuraus joudutaan piikkaamaan auki ja valamaan uudelleen. Tämä aiheuttaa paljon enemmän työtä ja kustannuksia kuin nykyaikaisemman suuttimen vaihto ja pidentää myös

huoltoseisokin kestoa, koska kattilan lämpötiloja kestävän pohjan muuraus on monen päivän prosessi. On siis täysin ymmärrettävää, miksi tätä arinatyyppiä ei enää ole käytössä.

3.7 Float nozzle

Tämä suutintyyppi vastaa toimintaperiaatteeltaan rotametriä, joka on tilavuusvirran mittaukseen käytetty laite. Kuvassa 19 näkyvä suutin koostuu kartiomaisesta ”kohosta”, joka on asetettu samalla tavalla kartiomaiseen reikään. Molempien poikkipinta-ala kasvaa alhaalta ylöspäin mennessä. Koho nousee putkessa ylöspäin virtaavan fluidin tilavuusvirran kasvaessa ja pysyy sellaisessa pisteessä, jossa kohoon vaikuttavat painovoima ja fluidin aiheuttama työntövoima ovat yhtä suuret.

Haluttiin valmistaa suutin, joka pienellä kuormalla ajettaessa tuottaisi tarpeeksi paine-eroa estääkseen petimateriaalin virtauksen väärään suuntaan, mutta jossa täydellä kuormalla ajettaessa olisi pieni paine-ero laitoksen omakäyttöhyötysuhteen parantamiseksi. Muissa suutintyypeissä, joissa ilman virtauskanavien poikkipinta-ala pysyy koko ajan samana tilavuusvirran kasvaessa kasvaa myös suuttimen aiheuttama painehäviö reilusti tilavuusvirran mukana. Tässä suuttimessa painehäviö ei kuitenkaan juurikaan muutu tilavuusvirran kasvaessa muuttuvan virtauksen poikkipinta-alan ansiosta (Yang et al 2007, s.2).



Kuva 19. Tilavuusvirtaan reagoivan suuttimen poikkileikkaus (Yang et al 2007, s.2)

Kuvassa 19 numerolla 1 merkattu kupolin muotoinen yläosa estää petimateriaalin kasaantumista suuttimen reiän lähettyville seisokin aikana ja numerolla 2 merkattu ura auttaa jakamaan ilmaa tasaisesti ja estää rinnakkaisten suutinten ilmasuihkujen aiheuttamia häiriöitä toistensa toimintaan. Numerolla 5 merkatun vastapainona toimivan pultin massaa muuttamalla voidaan tehdä hienosäätöjä suuttimen toimintaan vaikuttamalla leijutusilman virtausnopeudesta ja suuttimen massasta riippuvaan tasapainotilaan.

Tätä suutinta verrattiin testilaitteessa kuvan 10 vasemmanpuoleista suutinta vastaavaan monireikäsuuttimeen, joka oli ollut käytössä 135 MWe kiertoleijukattilassa Kiinassa. Tulokset vastasivat odotuksia ja kohosuuttimen paine-ero pysyi lähestulkoon vakiona tilavuusvirran muuttuessa, kun taas monireikäsuuttimen paine-ero nousi rajusti tilavuusvirran kasvaessa. Tämän tutkimuksen tehneeltä ryhmältä tai muiltakaan ryhmiltä ei kuitenkaan löytynyt asiaan liittyviä lisätutkimuksia, joissa olisi virtausmallinnuksen tai käytännön kokeiden avulla tutkittu ja jatkojalostettu kyseistä suutintyyppiä lisää.

4 Johtopäätökset

Työssä saatiin selvitettyä millaisia erilaisiin olosuhteisiin soveltuvia sekä erilaisia tehtäviin suunniteltuja suuttimia kiertoleijureaktoreissa käytetään. Toimintaperiaatteeltaan kiertoleijureaktorit eivät kuitenkaan eroa juurikaan eri sovellusten välillä, eli erilaisia polttokattiloihin tarkoitettuja suutinratkaisuja voidaan käyttää myös muissa sovelluksissa. Alla olevissa kappaleissa on kerrottu aluksi löydetyistä suuttimiin kehitellyistä ratkaisuista olosuhteiden sekä tehtävien selättämiseksi. Sen jälkeen on kerrottu suuttimien suunnitteluun sekä kustannuksiin löydettyjä huomioitavia asioita. Lopuksi on pohdittu tehdyn tutkimuksen vaikutuksia ja merkityksiä sekä tutkimuksen rajoitteita ja jatkotutkimuksen mahdollisuuksia.

Suuttimet voivat altistua kiertoleijureaktoreissa sovelluksen mukaan esimerkiksi eroosiolle, korroosiolle ja korkeille lämpötiloille. Eroosiota vastaan kamppailuun löydettyjä ratkaisuja oli esimerkiksi suuttimen materiaalipaksuuksien kasvatus, vaihdettavien kulutuspintojen lisääminen suuttimiin, kahdesta eri materiaalista koostuvat suuttimet sekä suuttimien virtauskanavien muokkaus. Korroosiota vastaan ratkaisuina olivat ruostumattomien terästen käyttö suuttimien materiaalina sekä suutinten lämpötilojen pitäminen syövyttävien aineiden aktiivisimman lämpötila-alueen ulkopuolella. Korkeiden lämpötilojen haittoja vastaan ratkaisu löytyy lämpötiloihin soveltuvan metallin valitsemisella. Suuttimen kanavien tukkeutuminen väärään suuntaan kulkeutuvan petimateriaalin takia voi myös aiheuttaa ongelmia. Tämän estämiseksi eräs patentti ehdottaa suuttimen vaihtamista niin isolla sisähalkaisijalla olevaan putkeen, ettei se ehdi mennä tukkeeseen huoltoseisokkien välissä.

Tiettyihin tehtäviin suunniteltuja suuttimia löytyi myös, tulipesässä olevien suurien hiukkasten poistoon sekä paine-eron säilyttämiseen vakiona kuorman muuttuessa. Sellaisiin sovelluksiin, joissa arinan päälle kertyy polttoaineen mukana tulleita hiukkasia, jotka ovat liian raskaita leijutettavaksi, voidaan käyttää ohjaavia suuttimia kuljettamaan kyseiset hiukkaset arinan poistoaukolle. Ylisuuria ja palamattomia hiukkasia voi tulla esimerkiksi metsäjätettä tai yhdyskuntajätettä polttaessa polttoaineen mukana, jos polttoainetta ei tarkasti seulota ennen kattilaa. Float suutin taas on rotametrin toimintaperiaatetta kopioiva suutin, jossa suuttimen painehäviö ei kasva leijutusilman tilavuusvirran kasvaessa, toisin kuin kaikissa muissa suutintyypeissä. Suuttimesta ei kuitenkaan löytynyt tietoa muusta kuin

pienessä testilaitteessa suoritetuista testeistä vuodelta 2007, eli suutin on luultavasti jäänyt prototyypiksi.

Tutkimuksessa saatiin tietoa myös suutinten suunnitteluprosessista. Kiertoleijureaktoreiden arinailmasuuttimia pitää usein tarkistella juuri sille kuuluvassa laitoksessa, koska niiden yhteistoimintaa on vaikea arvailla, vaikka ennakkotapauksia yhdistelmästä olisi saatavilla. Suuttimet ovat eräs tarkasteltavista kohteista, jos tahdotaan parantaa reaktorin prosessin hyötysuhdetta. Hyvin toteutettu suutinvalinta voi parantaa reaktorin toimintaa tuottamalla yhtenäisen ja vakaan leijutuksen, jolloin esimerkiksi polttoaineen palaminen ja lämmönsiirto leijupedistä paranevat. Pienen painehäviön aiheuttava suutin myös vähentää laitoksen puhaltimien käyttökustannuksia tuotettavan leijutusilman pienemmän paineen seurauksena. Reaktorien suutinten muutos tarvitsee myös luultavimmin tehdä vain kerran, koska hyvällä suunnittelulla ja testaamisella aikaansaatu suutin todennäköisesti lähentelee kaikkia sille asetettuja raja-arvoja. Varsinkin tätä varten modernit CFD ohjelmistot ovat todella hyviä, koska lähes kaikki testit pystytään toteuttamaan tietokoneella ennen prototyyppisuuttimen valmistusta. Löydetyistä suuttimista muutamassa oli käytetty suunnitteluvaiheessa virtausmallinnusta ja aikaansaadut suuttimet täyttivät kaikki niille asetetut tavoitteet.

Arinailmasuuttimien kustannuksien vähentämiseen liittyen valmistajien välillä oli eroja. Osa löydetyistä suuttimista oli tarkasti suunniteltuja, jotta suuttimet kuluttaisivat itseään ja toisiaan mahdollisimman vähän ja joissain suuttimissa oli irrotettavia ja vaihdettavia kulutuspaloja, jotta koko suutinta ei tarvitse vaihtaa. Tällaisessa vaihtoehdossa suunnittelu- ja valmistuskulut ovat korkeat, mutta suuttimien huoltamiseen ei tarvitse varata paljoa rahaa varman toiminnan ansiosta. Toinen ääripää on tavallisesta teräsputkesta hitsaamalla tehdyt suuttimet tai massatuotantona tehdyt karkeaa valettua terästä olevat suuttimet. Näissä suuttimissa huollettavien suuttimien määrä voi olla korkea, mutta todella matalilla valmistuskustannuksilla voidaan päästä loppupelissä halvemmalla.

Työssä aikaansaatu suomenkielinen katalogi erilaisista kiertoleijureaktoreiden suutintyypeistä mahdollistaa asiaan tutustumisen huomattavasti nopeammin, kuin että alkaisi etsimään kymmenien eri lähteiden kautta tietoa erilaisista toteutuksista. Tiedonhaun vaikeus voi lannistaa etsimästä tietoa mielenkiintoa herättäneestä aiheesta ja tämän työn tapaisen listan avulla voi asiaan perehtyä ja ruveta etsimään lisää tietoa, jos mielenkiinto heräsi vielä lisää. Tätä työtä tehdessä selkeästi vaikein osuus oli juuri mainittu lähteiden etsiminen. Kiertoleijureaktoreita valmistavien tai toimittavien yritysten omilta

verkkosivuilta tietoa löytyi todella niukasti. Vain muutamalla valmistajalla kerrottiin, minkälaisia suuttimia heidän laitteissaan käytetään. Tämä luultavasti johtuu yksinkertaisesti siitä, ettei haluta antaa kilpaileville yrityksille ideoita. Yleisellä tasolla tietoa suuttimista löytyi kiertoleijureaktoreita käsittelevistä kirjoista. Suuttimiin liittyviä tutkimuksia tehneiltä ryhmiltä tietoa löytyi paremmin, mutta näissä tapauksissa oli aina keskitytty johonkin tiettyyn suuttimeen, eli näitä lähteitä joutui etsimään reilusti.

Kerättyä listaa erilaisista suutintyypeistä olisi mahdollista jatkaa, laajentaa ja täydentää. Tästä aiheesta olisi paljon helpompi kirjoittaa, jos aihe olisi entuudestaan tuttu ja aiheeseen liittyvä sanasto olisi paremmin hallussa. Aiheen tutkiminen vähäisillä taustatiedoilla johti siihen, että järkevien hakusanojen ja -termien löytäminen hankaloitti tiedonhakua. Kielimuuri oli myös ongelma varsinkin patenttijulkaisuja tutkiessa.

Lähteet

Basu Prabir. 2015. Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance. Greenfield Research Incorporated. 370s. ISBN 978-3-319-06172-6

Carvalho Mariana, Cardoso Marcelo, Vakkilainen Esa. 2015. Biomass gasification for natural gas substitution in iron ore pelletizing plants. Renewable energy 81 (2015) sivut 566-577. 12s. doi: 10.1016/j.renene.2015.03.056.

De Lena Eduardo, Arias Borja, Romano Matteo C., Abanades J.Carlos. 2021. Integrated calcium looping system with circulating fluidized be reactors for low CO2 emission cement plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, 114, doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103555.

Huhtinen Markku et al. 2022. Voimalaitostekniikka. 6. painos. Helsinki. Opetushallitus. 2002. 344s. ISBN 978-952-13-5426-7s

Huang Zhong, Deng Lei, Che Defu. 2019. Experimental and CFD simulation studies on Bell-type air nozzles of CFB Boilers. Applied Sciences. 14s. doi: 10.3390/app9183805

Mirek Pawel, Mirek Justyna, Sekret Robert, Nowak Wojciech. 2005. Nozzles in CFB boilers. Circulated Fluidized Bed Technology VIII, sivut 877-884. 8s.

Mirek Pawel, Sekret Robert, Nowak Wojciech. 2007. The influence of Air Nozzles' Shape on the NOx Emission in the Large-Scale 670 MWT CFB Boiler. The 12th international conference on fluidization – New paradigm in fluidization engineering. Engineering Conferences International. 9s.

Mirek Pawel, Nowak Wojciech, Klajny Marcin, Jablonski Janusz. 2010. A Novel construction of a low-pressure-drop air nozzle working with a 535 MWe CFB boiler. The 13th international conference on fluidization – New paradigm in fluidization engineering. Engineering Conferences International. 9s.

Mirek Pawel. 2011. Designing of primary air nozzles for large-scale CFB boilers in a combined numerical-experimental approach. Chemical Engineering And Processing 50 (2011) sivut 694-701. 8s. doi: 10.1016/j.cep.2011.04.006

Mustafa Metin Cam, Cenk Celik, Mansour Al Qubeissi, Hakan Serhad Soyhan. 2023. Designing a new bell-type primary air nozzle for a large-scale circulating fluidized bed boilers. Fuel 335 (2023). 38s. doi: 10.1016/j.fuel.2022.127065

Pat. FI 116315B. 2005. Leijupetireaktorin arinasuutin. Foster Wheeler Energia Oy, (Lehtonen P., Soininen R. ja Makkonen P.). 23s.

Pat. KR 20130047091A. 2013. Air nozzle of circulating fluidized bed combustion boiler. Hyundai Heavy Ind Co LTD (Jeong Jin Yeoung, Lee Kyung Mo, Min Byeong Su). 14s.

Pat. WO 2010/011457 A2. 2010. Fuel fluidizing nozzle assembly. Alstom Technology LTD, Baden: Sveitsi. (Bober Thomas). 20s.

Pat. US 6,868,795 B2. 2005. Bubble cap assembly. The Babcock & Wilcox Company ja Blasch Precision Creamics Inc. (Maryamchic Mikhail et al). 11s.

Raiko Risto et al, 2002. Poltto ja palaminen. Helsinki. Teknistieteelliset akatemiat ja International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 750s. ISBN 951-666-604-3

Rodriguez N., Alonso M., Abanades J.C. 2010. Experimental investigation of a circulating fluidized-bed reactor to capture CO_2 with CaO. Spanish research council. 11s. doi: 10.1002/aic.12337

Vakkilainen Esa, 2017. Steam generation from biomass. Construction and Design of Large Boilers. Elsevier. 302s. ISBN 978-0-12-804389-9

Valmet, 2017, CFB Evolution to Biomass [Verkkodokumentti], [Viitattu 11.2.2023]. Saatavissa: https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/new-technology/VPCFBCoalBiomass/

Valmet, 2020, Valmet gasifier: Smart power from biomass and waste [Verkkodokumentti]. [Viitattu 25.3.2023]. Saatavissa: https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/

Yang Hai-Rui, Huang Zhi-Min, Yue Guang-Xi, Lu Jun-Fu. 2007. Characteristics of a Float Nozzle designed for circulating fluidized bed boilers. Chemical Engineering Technology 10 (2010) sivut 1398-1400. 3s. doi: 10.1002/ceat.200700044