



# **TULIPESÄN SÄÄDETTÄVÄN LÄMMÖNSIIRTIMEN TOTEUTUS KOEKATTILASSA**

Hannu Kuivas  
2011  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TULIPESÄN SÄÄDETTÄVÄN  
LÄMMÖNSIIRTIMEN TOTEUTUS  
KOEKATTILASSA

Hannu Kuivas  
Opinnäytetyö  
29.4.2010  
Kone- ja tuotantotekniikan  
koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
Kone- ja tuotantotekniikka	Insinööriyö	30	+	3
Suuntautumisvaihtoehto	Aika			
Energiatekniikka	2011			
Työn tilaaja	Työn tekijä			
Metso Power	Hannu Kuivas			
Työn nimi	Tulipesän säädettävän lämmönsiirtimen toteutus koekattilassa			
Avainsanat	Lämmönsiirto, kattilalaitos			

Työ tehtiin Metso Powerin koelaitokselle, jossa tutkitaan ja kehitetään uusia prosesseja energian tuotantoon sekä uusia sovellutuksia kierto- ja leijupeteihin. Koelaitos on 4 MW:n kattilalaitos Tampereen Messukylässä, missä testataan kiinteiden polttoaineiden käytettävyyttä ja päästöjä leijupolttomenetelmissä sekä savukaasujen aiheuttamia korroosioita putkistossa.

Opinnäytetyönä suunniteltiin koelaitoksen kattilaan lämmönsäädin, jolla voidaan säätää kattilanlämpötilaa online-periaatteella ajon aikana. Lämmönsäädin mitoitettiin virtaus-teknisesti ja siitä mallinnettiin Solidworks-ohjelmalla periaatekuva.

Työssä päädyttiin menetelmään, jossa nuohoimen tapaisella liikutusmekanismilla liikutetaan putkipatteria. Työltä vaadittava portaittainen ja online-periaatteellinen kattilanlämpötilan säätö toteutuu, kun patteria liikutetaan sähkömoottorilla lähes portaattomasti.

Liikutettavalla putkipatterilla saatiin poistettua se, että kattilan tulipesää jäähdytettäisiin kiertokaasulla tai primääri-sekundääri-ilmasuhdetta muuttamalla, koska nämä säätömenetelmät vaikuttavat prosessin olosuhteisiin ilmajaon ja leijunopeuksien muutoksilla. Paneelin asennuskorkeudeksi valittiin 3 metriä, jolloin paneelin pinta-alan täytyy olla vähintään 3,52 m<sup>2</sup>.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	6
2 POLTTOLAITTEET JA TULIPESÄNRAKENTEET .....	7
2.1 Arinapoltto .....	8
2.1.1 Kiinteä viistoarina .....	8
2.1.2 Alasyöttöarina .....	8
2.1.3 Mekaaninen ketjuarina .....	8
2.1.4 Valssiarina .....	9
2.2 Leijukerrospoltto .....	9
2.2.1 Leijupetikattila .....	10
2.2.2 Kiertopetikattila .....	12
3 LÄMMÖNSIIRTO .....	15
3.1 Johtuminen .....	15
3.2 Konvektio .....	15
3.3 Säteily .....	15
3.4 Kiertoleijukattilan lämmönsiirto .....	16
4 VIRTAUSTEKNIikka .....	20
4.1 Reynolds-luku .....	20
4.2 Laminaarinen virtaus .....	20
4.3 Turbulenttinen virtaus .....	20
4.4 Kiertoleijuvirtaus .....	21
5 UUDEN MENETELMÄN VALINTA .....	24
5.1 Nuohoin .....	24
5.2 Lämmönsiirtimen mitoitus .....	25
5.3 Virtausnopeuden määrittäminen .....	27
5.4 Tekniset ongelmat .....	28
6 YHTEENVETO .....	29
LÄHTEET .....	30
LIITTEET	
Liite 1 Lähtötietomuistio	

Liite 2 Laskentataulukko

Liite 3 Periaatekuva

# 1 JOHDANTO

Metso on kansainvälinen teknologiakonserni, jonka erikoisosaamista ovat teknologia- ja palveluratkaisut kaivos-, maarakennus-, voimantuotanto-, öljy- ja kaasu-, kierrätys- sekä massa- ja paperiteollisuudelle. Metsolla on suunnittelua, tuotantoa, hankintaa, palveluliiketoimintaa, myyntiä ja muuta toimintaa yli 300 yksikössä yli 50 maassa. Työntekijöitä on maailmanlaajuisesti noin 28 500, ja asiakkaita yli sadassa maassa. (1.)

Työ tehtiin Metso Powerin koelaitokselle, jossa tutkitaan ja kehitetään uusia prosesseja energian tuotantoon sekä uusia sovellutuksia kierto- ja leijupeteihin. Tampereen Messukylässä sijaitsevalla koelaitoksella on 4 MW:n leijupeti-pilot-kattila, missä testataan kiinteiden polttoaineiden käytettävyyttä ja päästöjä leijupolttomenetelmissä sekä savukaasujen aiheuttamia korroosioita putkistossa.

Koelaitoksen lämpötilaa säädetään siten, että kattilaan asennetaan laskennan perusteella sopiva määrä putkipattereita ja tarvittaessa loppusäätö tehdään kattilan kiertokaasulla tai primääri-sekundääri-ilmasuhdetta muuttamalla. Jälkimmäiset säätömenetelmät kuitenkin vaikuttavat prosessin olosuhteisiin ilmajaon ja leijunopeuksien muutoksilla. Kattilan lämmönsäätöön tarvittaisiin menetelmä, jonka kanssa ei tarvitsisi käyttää kiertokaasua tai primääri-sekundääri-ilmasuhdetta.

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella koelaitoksen kattilaan lämmönsäädin, jolla voidaan säätää kattilan lämpötilaa online-periaatteella ajon aikana. Säädetty lämmönsäädin mitoitetaan virtausteknisesti sekä piirretään Solidworks-ohjelmalla periaatekuva. Laitteelle laaditaan myös toimintaohje ja turvallisuusseloste. Ohje ja selostus tehdään käyttäjille sekä asentajille eikä niitä esitetä julkisesti salassapitovelvollisuuden takia.

## 2 POLTTOLAITTEET JA TULIPESÄRAKENTEET

Polttolaitteiden tehtävä on saada polttoaine palamaan, jolloin polttoaineeseen sitoutunut energia vapautuu lämmöksi. Jotta hyötysuhde saadaan mahdollisimman hyväksi, polttoaineen pitää palaa mahdollisimman täydellisesti, niin että ilmaylijäämää jää mahdollisimman pieneksi. Palamisprosessin täytyy tapahtua tasaisesti, halutun tehoisesti ja palamistehoa on voitava säätää tarpeen mukaan. Polttoaineiden erilaisuuden takia on pitänyt kehittää erilaisia polttomenetelmiä. Kiinteillä aineilla käytetään yleensä leijukerrosmenetelmiä, mutta voidaan myös käyttää erilaisia arinavaihtoehtoja. Nestemäisille, kaasumaisille ja kiinteistä polttoaineesta valmistetulle pölylle soveltuvat erityyppiset polttimet. (2, s. 126.)

Tulipesäksi nimitetään kattilan liekkiä ympäröivää osaa, jossa polttoaine palaa. Palamisessa vapautuva lämpö siirtyy osittain tulipesän seinämässä olevaan ja sitä jäähdyttävään höyrystin-putkistoon sekä kuumien savukaasujen mukana muihin kattilan osiin. (2, s. 126.)

Tulipesän ja polttolaitteiden sovittaminen yhteen on kattilan suunnitteluun liittyviä tehtäviä, millä varmistetaan paras mahdollinen palamistulos. Tämä tarkoittaa sitä, että polttolaitteessa muodostuvan liekin tulee mahtua hyvin tulipesään. Lisäksi poltinpolto-sa tulee tulipesän olla riittävän suuri, jotta savukaasujen ja syötetyn polttoaineen viipymisaika on palamisaikaa pidempi. (2, s. 126.)

Tulipesän kokoa voidaan kuvata kattilan tulipesän tilavuusrasituksella, joka saadaan jakamalla kattilaan tuotu polttoaineteho tulipesän tilavuudella. Tilavuusrasituksen arvot vaihtelevat kattilatyypin ja polttoaineen mukaan laajalla alueella ollen 50–7 000 kW/m<sup>3</sup>. Suomessa käytettävissä voimalaitoskattiloissa rasitukset ovat tavallisesti 100–500 kW/m<sup>3</sup>. Tilavuusrasitus kuvaa savukaasujen viiveaikaa tulipesässä. (2, s. 126.)

## **2.1 Arinapoltto**

Arinaksi kutsutaan kattilan pohjalle sijoitettavaa polttolaitetta. Kiinteäpolttoaine poltetaan arinan päällä joko paikallaan pysyvänä tai hitaasti liikkuvana kerroksena. (2, s. 146.)

Arinapoltto on vanhin kiinteille polttoaineille tarkoitettu höyrykattiloiden polttotapa. Aikojen kuluessa on kehittynyt monenlaisia arinaratkaisuja eritehoisille ja erityyppisiä polttoaineita polttavia. Hyvin toimivia arinaratkaisuja on useimmille kiinteille polttoaineille, kuten hiilelle, turpeelle, puulle ja puujätteelle. (2, s. 146.)

### **2.1.1 Kiinteä viistoarina**

Tavallisesti tasoarinat koostuvat vierekkäin kannatuspalkkien varaan ladotuista arinasauvoista. Sauvojen ulkonemat estävät niitä koskettamasta toisiaan koko sivupinnalta, jolloin niiden väliin jää rako, josta ilma virtaa arinan läpi polttoainekerroksen sekaan. Tasoarinoita valetaan myös yhtenäisiksi levyiksi, joissa on ilmareiät. Arinoiden aukojen yhteistä pinta-alaa sanotaan vapaaksi arinapinnaksi. Kiinteiden arinoiden vapaa arinapinta on mekaanisten arinoiden vapaata pintaa suurempi, kuitenkin tavallisesti alle 5 % koko arinapinnasta. Tasoarinoita käytetään pienissä kattiloissa, joihin polttoaine syötetään käsin. (2, s. 147.)

### **2.1.2 Alasyöttöarina**

Alasyöttöarinaan polttoaine syötetään alapuolelta tulipesän keskelle ruuvikuljettimen avulla. Polttoaine siirtyessään keon pohjalta pintaan vähitellen ensin kuivuu, sitten kaa-suuntuu ja lopuksi syttyy palamaan keon pinnalla. Esilämmitetty palamisilma, jota koko ilmamäärästä on noin 50–60 %, tuodaan arinan alta rengasmaisia ilmanavia pitkin. Arina koostuu ilmarei'illä varustetuista ympyrärenkaan osista. (2, s. 148.)

### **2.1.3 Mekaaninen ketjuarina**

Mekaaninen ketjuarina on liikkuva tasoarina. Arinan muodostavat kahden ketjun väliin sijoitetut, ketjuissa oleviin kiinnittimiin kiinnitetyt arinaraudat. Arinaraudat ovat irrotet-



tavia ja rikkoutunut rauta voidaan vaihtaa käytön aikana. Leveissä arinoissa on useita ketjuja ja useita rinnakkaisia rautoja. Palamisilman tuontia varten on arinarautojen toisiinsa liittyvissä pinnoissa uria, joiden kautta ilma pääsee virtaamaan palavaan polttoaineerrokseen. Ketjut ja niiden mukana koko arina saadaan liikkumaan pyörittämällä ketjuja vetävää ketjupyörää. Koko arinamattoa kannattavat ketjujen väliin kiinnitetyt, niiden mukana kulkevat kannatusrullat, jotka tukeutuvat arinaa kannatteleviin runkorakenteisiin. (2, s. 149.)

#### **2.1.4 Valssiarina**

Valssiarina muodostuu sylinterinmuotoisista pyörivistä valsseista. Valssin ulkokehänä on rengasmaiset arinaraudat. Primääri-ilma tuodaan valssiin, josta se siirtyy arinarautojen reikien kautta polttoaineeseen. Valssien avulla saadaan polttoaine sekoittumaan tehokkaasti, mikä on tarpeen erityisen huonolaatuista ja epähomogeenista polttoainetta kuten yhdyskuntajätettä poltettaessa. (2, s. 151.)

### **2.2 Leijukerros poltto**

Leijukerros polttoa ryhdyttiin soveltamaan energiantuotannossa 1970-luvulla. Sitä ennen sitä käytettiin monissa teollisuuden sovelluksissa. Viime vuosikymmenien aikana leijukerros poltto on yleistynyt laajasti. Leijukerros toimintaperiaate käy selville, kun tarkastellaan hiekkakerros käyttäytymistä ilman virratessa sen läpi eri nopeuksilla. Ilmavirran nopeuden kasvaessa kasvaa ilmavirtauksen painehäviö suoraan verrannollisena nopeuteen. Tällöin hiekkakerros muodostaa kiinteän ilmavirtauksen vaikutuksesta liikkumattoman kerros. (2, s. 153.)

Ilmavirtaa nopeutettaessa kasvaa painehäviö, ja tietyssä nopeudessa se on kasvanut hiekkakerros hydrostaattisen paineen suuruiseksi. Silloin ilmavirtauksen hiekkapartikkeleihin kohdistama voima on yhtä suuri kuin maan vetovoima ja hiekkakerros alkaa ilmavirtauksen vaikutuksesta leijua. Leijuvasta hiekkakerroksesta käytetään nimitystä peti. Tunnusomaista on ilmavirran vaikutuksesta tapahtuva hiekan sekoittuminen, joka laajenee leijutusnopeutta lisättäessä. Nopeutta, jossa peti alkaa leijua, kutsutaan minimileijutusnopeudeksi. Tämä nopeus riippuu hiekan hiukkaskokoista. Mitä pienempi hiukkaskoko on, sitä pienemmällä nopeudella peti saadaan leijumaan.

Lisättäessä leijukerrosnopeutta minimileijutusnopeudesta ei leijukerroksen aiheuttama painehäviö enää kasva vaan se pysyy leijukerroksen hydrostaattisen paineen suuruisena. (2, s. 154.)

Leijukerros alkaa kuplia kuin kiehuva vesi, kun nopeus on minimileijutusnopeutta suurempi. Tämä johtuu siitä, että minimileijutusnopeuden ylittävä ilmamäärä kulkee leijukerroksen läpi ilmakuplina. Tämä leijutustapa edustaa toista kahdesta kattiloissa käytetystä leijutustavasta. Kuplinnasta johtuen petiä nimitetään usein kuplivaksi leijukerrokseksi. Kuplivalla pedillä on selkeä raja, jossa se loppuu ja sen yläpuolinen kaasutila alkaa. (2, s. 155.)

Ilman leijunopeuden ollessa suurempi kuin hiekkapartikkelien lentoonlähtönopeus lähtevät hiukkaset kulkemaan leijutusväliaineen mukana. Tämä leijutustila edustaa toista kattiloissa käytetystä leijutustavasta. Koska petimateriaali kiertää leijutuskaasun mukana, nimitetään kattiloita kiertopetikattiloiksi tai kiertoleijukattiloiksi. Kiertopetikattiloissa savukaasun mukana kulkevat hiukkaset ja mahdollinen polttoaine erotetaan syklonissa savukaasuista ja palautetaan takaisin pesää. Kiertopetin tiheys pienenee korkeuden kasvaessa eikä selvää petipintaa ole havaittavissa. Painehäviö riippuu leijutusnopeudesta ja pölymäärästä. (2, s. 155.)

### **2.2.1 Leijupetikattila**

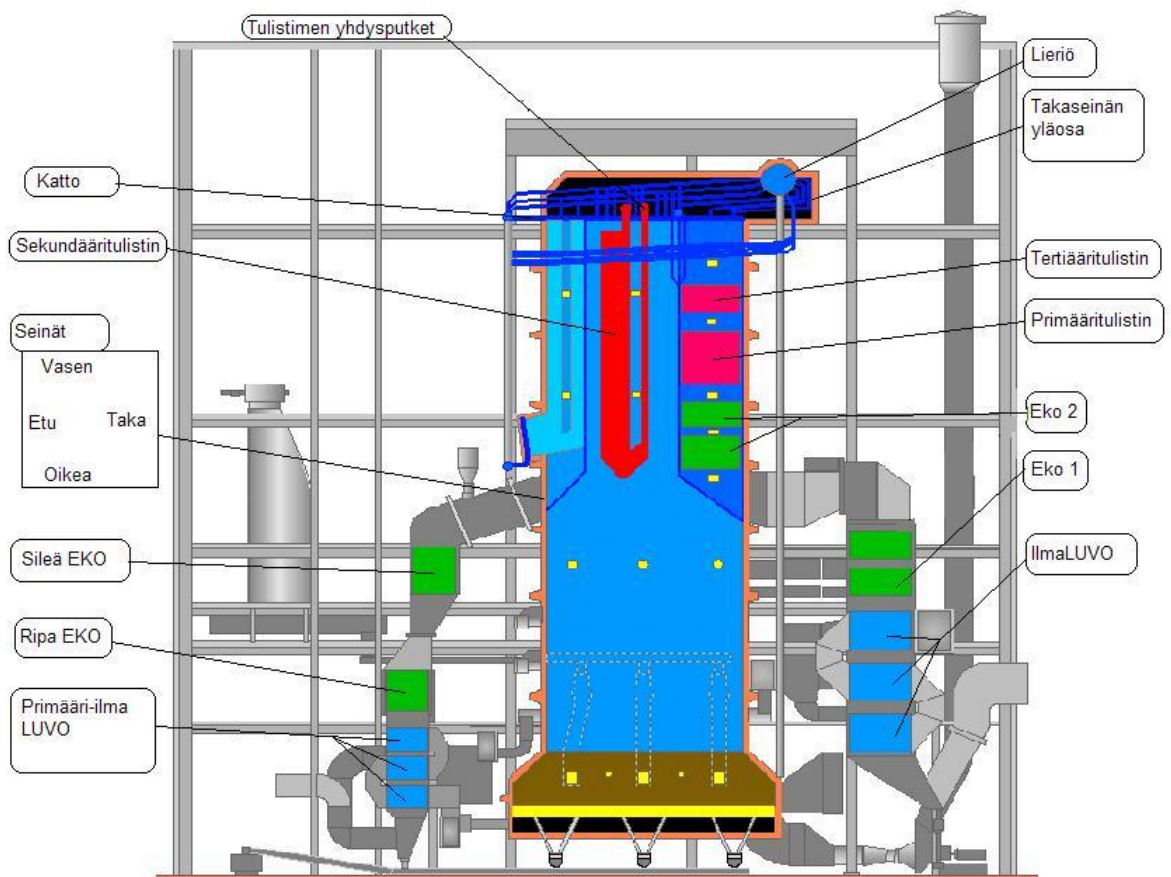
Hiekan keskiraekoko leijupetikattilassa on 1–3 mm ja leijutusnopeus 0,7–2 m/s. Hiekkakerroksen korkeus on 0,4–0,8 m, jolloin se aiheuttama painehäviö on 6–12 kPa. (2, s. 157.)

Petin suuren lämpökapasiteetin ansiosta polttomenetelmä soveltuu hyvin kosteiden polttoaineiden polttoon eikä kuivausta tarvita. Kosteaa polttoainetta sekoitetaan kuumaan hiekkakerrokseen, jossa se kuivuu nopeasti ja lämpenee syttymislämpötilaan. Suuri lämpökapasiteetti myös tasaa tehokkaasti polttoaineiden laatuheilahteluja. (2, s. 157.)

Ennen kuin pääpolttoainetta, joka on jokin kiinteä kostea aine, voidaan syöttää kattilaan, on peti lämmitettävä tasolle, joka varmistaa pääpolttoaineen turvallisen syttymisen, eli

lämpötilatasolle 500–600 °C. Alkulämmitys toteutetaan joko petiin tai sen päälle sijoite-  
tuilla öljy- tai kaasulämmittimillä. (2, s. 158.)

Polttoaine syötetään petin päälle mekaanisella syöttölaitteistolla. Polttoainesiilon ala-  
puolinen kuljetin syöttää polttoaineen sulkusyöttimen kautta pudotusputkeen, josta se  
putoaa petin päälle (kuva 1). Jotta polttoaine saadaan jakautumaan tasaisesti koko petin  
alueelle, syöttöputkia täytyy olla useampia. Mekaanisten syöttölaitteiden etu on esim.  
pneumaattisiin laitteisiin verrattuna niiden sallima laajempi kiinteänpolttoaineen koko-  
jakauma ja vähäisempi esikäsitteilyn tarve. (2, s. 158.)



KUVA 1. Leijupetikattila (3)

Tulipesän alaosa putket vuorataan tulenkestävällä massalla. Vuorauksen tarkoituksena on estää putkien kuluminen ja suojella niitä ylikuumentumiselta. Tulipesän pohjana on ilmajakoarina, joka koostuu joko teräslevyyn tai jäähdytysputkistoon hitsatuista suuttimista. Myös arinassa on tulenkestävä vuoraus. Arinan painehäviön tulee olla n. 30–50 % leijupetin painehäviöstä. Tällä varmistetaan ilman tasainen jakautuma petiin. (2, s. 158.)

Petin lämpötila on pidettävä niin alhaisena, ettei polttoaineen tuhka sula eikä edes pehmenene, jolloin tuhkan vaikutuksesta hiekka sintraantuisi. Sintraantuneen hiekan poistaminen kattilasta on hankalaa ja yleensä vaatii kattilan alasajon. Tämän vuoksi petin lämpötila pidetään n. 100 °C tuhkan pehmenemispisteen alapuolella, mikä kotimaisilla polttoaineilla on n. 900 °C. (2, s. 158.)

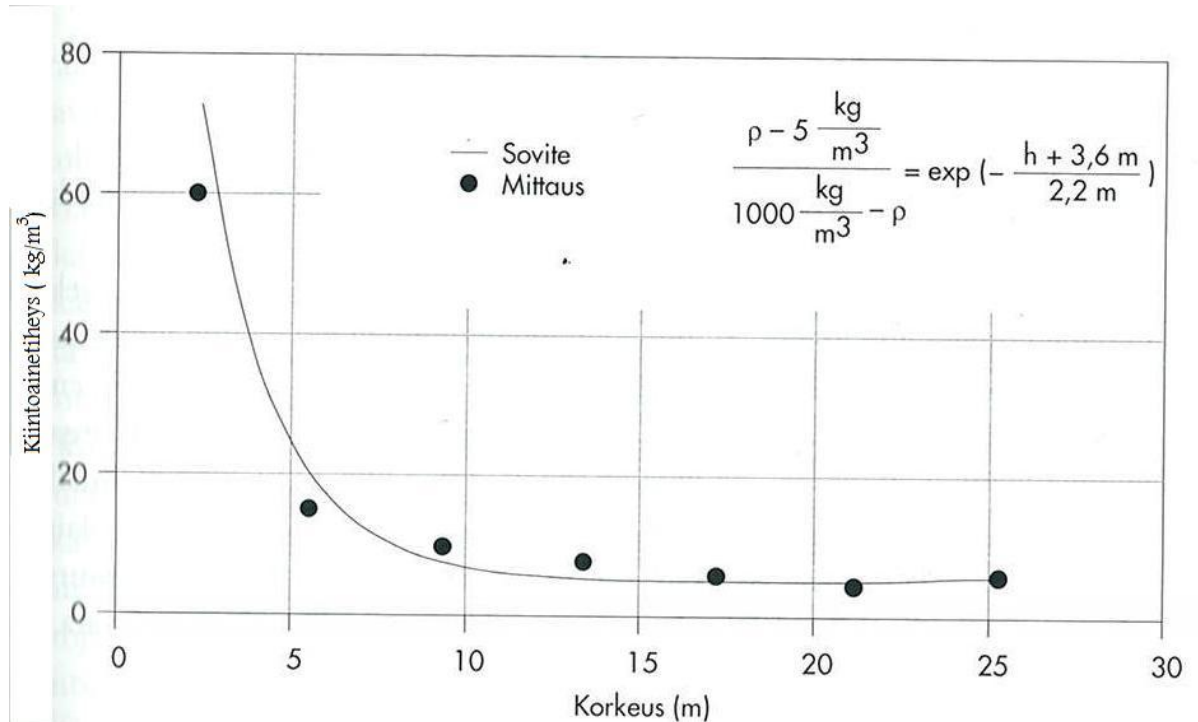
Palamisen vaatima happi saadaan osittain leijutusilmasta. Leijupetikattilan säätöalue on 100–30 %. Minimitehoa rajoittaa minimileijutusnopeus ja petin lämpötila, jonka tulisi olla vähintään 700 °C. Yläpäässä tehoa rajoittaa leijupetin maksimilämpötila ja petimateriaalin karkaaminen sekä palamattomien määrän kasvu. Säätöaluetta voidaan laajentaa käyttämällä leijutukseen kiertokaasua pienillä kuormilla ja jakamalla peti erillisiin osastoihin. (2, s. 158.)

### **2.2.2 Kiertopetikattila**

Kiertopetikattiloissa käytetään suurempia leijutusnopeuksia ja hienojakoisempaa petimateriaalia kuin leijupetikattiloissa. Kiertopetikattiloiden leijutusnopeus on 3–10 m/s ja hiekan raekoko 0,1–0,5 mm. Näin ollen kiertopetikattila toimii leijutusalueella, jolle on ominaista voimakas pyörteisyys ja hiukkasten hyvä sekoittuminen. (2, s. 159.)

Kiertopetistä ei erotu selvää pintaa, vaan petin tiheys pienenee korkeuden funktiona (kuva 2) osan hiekasta lähtiessä savukaasujen mukaan. Tulipesästä savukaasun mukaan lähteneet hiukkaset erotetaan sykloonissa ja palautetaan takaisin tulipesään. Kattilan pääosat ovat tulipesä ja siihen liitetty sykloni. Syklonin jälkeen savukaasukanavassa sijaitsevat pääosa tulistimista sekä veden ja ilman esilämmittimet. Pääosassa kiertopetikattiloita on luonnonkiertojärjestelmä, koska kattiloita käytetään teollisuuden ja yhdyskuntien vastapainevoimalaitoksissa ja halutut tuorehöyryn paineet mahdollistavat luon-

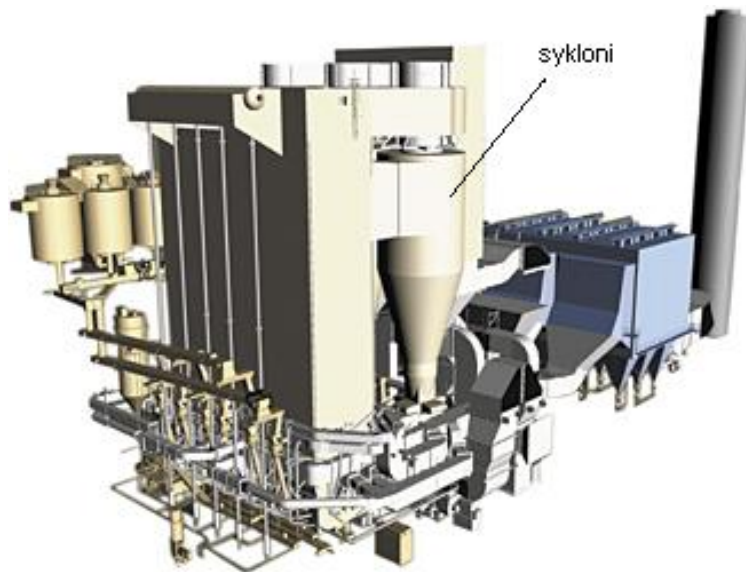
nonkierron. Muutamia leijukerroskattiloita on myös rakennettu läpivirtauskattiloiksi. (2, s. 159.)



KUVA 2. Korkeuden merkitys kiintoainetiheyteen (4, s. 507)

Polttoaine syötetään kiertopetikattilaan joko etuseinän kautta tai sekoittamalla se syklonista palaavan hiekan joukkoon. Yleensä käytetään pelkästään jälkimmäistä tapaa. Mikäli sillä ei saada aikaan tarpeeksi tasaista syöttöä, voidaan suuriin tulipesiin osa polttoaineesta syöttää myös etuseinän kautta. Syklonin alle rakennetulla polvella estetään savukaasujen virtaus tulipesästä sinne. Hiekkakierron aikaansaamiseksi polvien eri kohtiin johdetaan suuttimista paineilmaa, joka siirtää hiekan polvesta tulipesään joltavaan laskuputkeen. Mikäli polttoaine syötetään syklonista palaavan hiekan joukkoon, se syötetään laskuputken kohdalla. (2, s. 160.)

Hienojakoinen tuhka poistuu kattilasta savukaasujen mukana, kun se on niin hienojakoista, ettei se enää erotu syklonissa (kuva 3) savukaasuista. Savukaasujen mukana kulkeva lentotuhka erotetaan niistä normaaliin tapaan. (2, s. 161.)



*KUVA 3. Kiertopetikattila ja sykloni (5)*

Palamisilma tuodaan kattilaan primääri- ja sekundääri-ilmana. Primääri-ilma eli leijutusilma tuodaan kattilaan pohjasuuttimien kautta. Sen osuus koko ilmamäärästä on polttoaineen mukaan 40–60 %, ja eräät vähän haihtuvia komponentteja sisältävät polttoaineet tarvitsevat sitä jopa 75 %. Sekundääri-ilma johdetaan leijukerrokseen parille eri tasolle muutama metri arinan yläpuolelle. Sekundääri-ilmamäärää voidaan säätää portaattomasti 15–100 %. (2, s. 162.)

## 3 LÄMMÖNSIIRTO

Kattilan lämpöpintojen tehtävänä on siirtää mahdollisimman tehokkaasti savukaasujen sisältämää lämpöenergia kattilan vesi-höyrykiertoon. Kattilan lämpöpinnolla tarkoitetaan kaikkia sellaisia lämmönsiirtoon osallistuvia pintoja, joita lämmitetään polttoaineesta kehitetyllä savukaasulla ja joita jäädytetään lämpöä talteenottavalla massavirralla. Savukaasut jäähtyvät kattilan tulipesässä vallitsevasta 800–1 300 °C:n lämpötilasta ilman esilämmittimen jälkeiseen 130–200 °C:n lämpötilaan. (2, s. 184.)

### 3.1 Johtuminen

Lämmön olemukseen kuuluu, että lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan. Lämpö virtaa alemman lämpötilan suuntaan. Lämmönvirtausta lämpötilaeron vaikutuksesta kiinteän väliaineen läpi kutsutaan lämmönjohtumiseksi. Eri aineiden lämmönjohtavuus vaihtelee. Metallit johtavat lämpöä hyvin ja kaasut huonosti. (2, s. 204.)

### 3.2 Konvektio

Konvektioksi kutsutaan lämpövirtausta liikkuvasta nestemäisestä tai kaasumaisesta aineesta kiinteään pintaan tai päinvastoin. Konvektiota on kahta lajia, vapaa ja pakotettu. Pakotetussa konvektiossa lämmönsiirtoa parantava virtaus synnytetään jonkin laitteen avulla. Vapaaksi konvektioksi kutsutaan lämmönsiirtoa, joka syntyy seisovan nesteen, kaasun ja kiinteän aineen välille. Tällöinkin nesteeseen tai kaasuun syntyy lämpöä siirtävä virtaus lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen vaikutuksesta, eikä lämmönsiirto tapahdu johtumalla. (2, s. 205.)

### 3.3 Säteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen, lähettävät lämpötilansa perusteella energiaa sähkömagneettisena säteilynä. Kiinteät ja nestemäiset aineet säteilevät laajalla spektrialueella, kun taas kaasujen spektrien aallonpituusalueet ovat kapeat. Kun kappaleen lämpötila on sama kuin ympäristön, ympäristö säteilee kappaleeseen yhtä paljon lämpöä kuin kappale ympäristöön. Tällöin lämpöä ei siirry, mutta

lämpötilaeron kasvaessa myös lämmön siirtyminen kylmempään kappaleeseen suurenee. (2, s. 206.)

### 3.4 Kiertoleijukattilan lämmönsiirto

Lämmönsiirtopinnat voidaan sijoittaa kiertoleijukattiloissa kiertojärjestelmän eri osiin. Tärkeimmät sijoitusalueet ovat reaktorin seinät, reaktorin sisäosat sekä palautusjärjestelmä. Lämmönsiirron määrittämiseksi kiertoleijukattilassa ei ole toistaiseksi käytettävissä yleisesti hyväksytyjä lämmönsiirtokorrelaatioita, vaan ainoastaan eri tutkijoiden esittämiä yksittäisiä korrelaatioita tai tietyn laitteen antamia koetuloksia. Tyypilliset kokonaislämmönsiirtokertoimen arvot kattilan eri lämmönsiirtovyöhykkeille ovat seuraavia:

- reaktorin seinäpinnat      80...250 W/m<sup>2</sup>K
- reaktorin sisäosat          50...250 W/m<sup>2</sup>K
- palautusjärjestelmä      300...500 W/m<sup>2</sup>K. (4, s. 509.)

Lämmönsiirtokertoimen arvot riippuvat huomattavasti myös lämmönsiirtopinnan geometriasta. Erillisillä putkimaisilla lämmönsiirtosondeilla on mitattu huomattavasti suurempia lämmönsiirtokertoimia kuin todellisissa kattiloissa on esiintynyt. Normaalisti kiertoleijukattilassa lämpöpinnat ovat paneelirakenteeseen perustuvia. Tällöin suuriin pintoihin syntyvät paksut rajakerrokset pienentävät lämmönsiirtoa. (4, s. 510.)

Kiertoleijukattilassa lämmönsiirtoon vaikuttaa oleellisesti kaasu-kiintoainesuspension virtauskäyttäytyminen. Lämmönsiirtopinnan läheisyydessä vaihtelevat sekä ajallisesti että paikallisesti kiintoaineen ja kaasun tilavuusominaisuudet, nopeudet sekä lämpötilat. (4, s. 510.)

Reaktorin alaosassa saattavat kiintoainetiheydet olla kohtalaisen suuria, jolloin tällä alueella voidaan käyttää kuplivalle tai turbulentille leijukerrokselle kehitettyjä lämmönsiirtokorrelaatioita. Kiertoleijureaktorin alaosaan ei eroosiovaaran tai muiden mitoitussellisten ja prosessitekniisten tekijöiden johdosta sijoiteta lämpöpintoja. (4, s. 511.)



Suuri osa kiertoleijukattiloiden lämmönsiirtokorrelaatioista perustuu reaktorin poikkipinnan suhteen keskimääräistettyihin suureisiin. Tällöin esimerkiksi kiintoainesuspension tiheys määritetään yleensä reaktorin pystysuuntaisten painegradienttien avulla. On kuitenkin syytä pitää mielessä, että lämmönsiirtopintojen läheisyydessä saattaa kiintoainekonsentraatio olla todellisuudessa huomattavasti suurempi kuin koko poikkipinnalle määritetty keskimääräinen arvo. Tällöin todellisen tiheyden sijoittaminen keskimääräiseen tiheyteen perustuvaan korrelaatioon antaa virheellisen tuloksen lämmönsiirrolle. Lämmönsiirtokorrelaatiot perustuvat jollakin etäisyydellä seinästä tehtyihin lämpötilamittauksiin, jolloin korrelaatiot pätevät vain vastaavasti määritettyä lämpötilaa käyttäen. (4, s. 511.)

Lämmönsiirto jaetaan kiertoleijutarkasteluissa yleensä kolmeen osa-alueeseen: kaasukonvektioon, kiintoainekonvektioon sekä kaasu-kiintoainesuspension säteilyyn. Säteilyn osuus heikkenee voimakkaasti lämpötilan laskiessa ja käytännössä se on merkityksetön lämpötiloissa alle 500...600 °C. Säteilyn täsmällinen tarkastelu on hankalaa, koska siihen vaikuttavat lämpötilat ja tiheydet muodostavat lämpöpintojen lähelle rajakerrokset, jotka lisäksi vaihtelevat voimakkaasti ajallisesti. Normaalisti kiertoleijukattilassa säteilyn suuruus on 0...140 W/m<sup>2</sup>K. Koska kuitenkin suspension lämpötila on jäähdettävän seinämäpinnan läheisyydessä muuta virtausta kylmempi, on rajakerroksessa esiintyvä säteily päävirtauksessa esiintyvää vähäisempää. Tämä saattaa johtaa siihen, että todellinen säteily seinämälle on huomattavasti pienempi. (4, s. 511.)

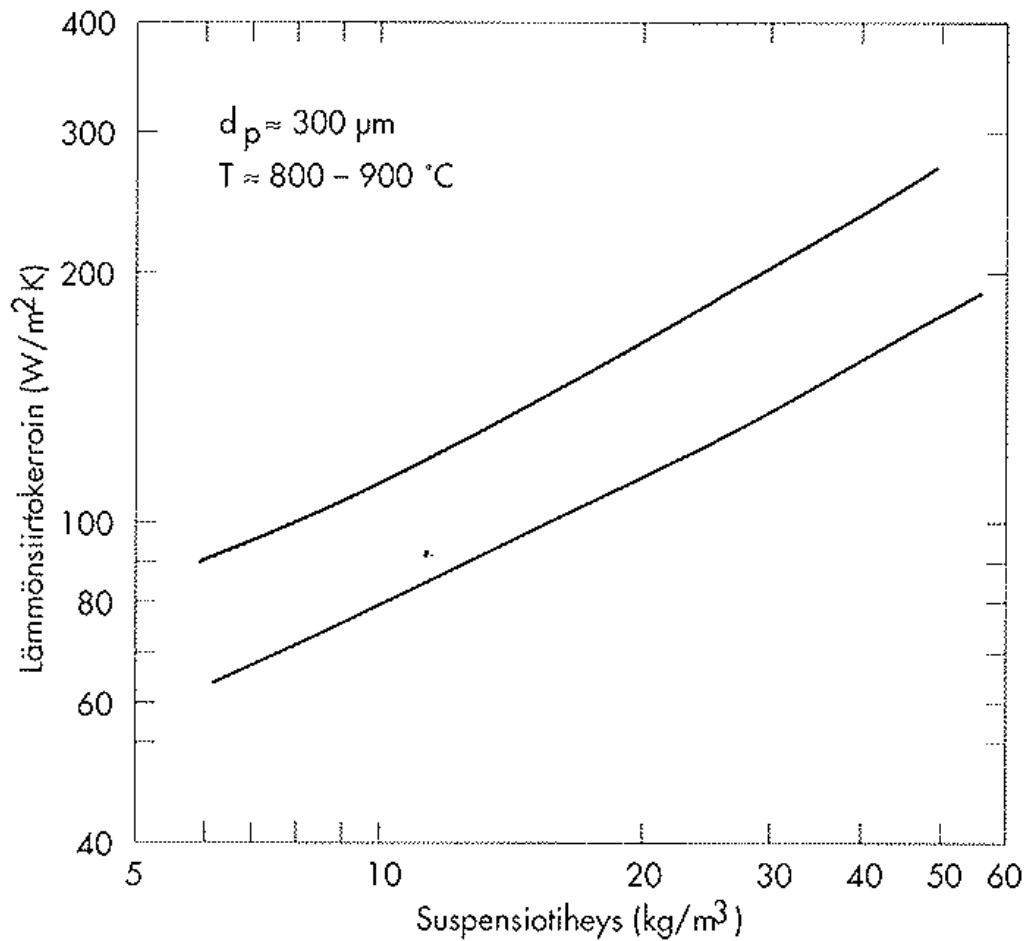
Kiintoainekonvektion suuruuteen vaikuttaa merkittävästi seinäpinnan lähellä olevien kiintoainetihentymien käyttäytyminen. Kiintoainetihentymät virtaavat pääosin alaspäin ja jäähdetyispinnan läheisyydessä ne luovuttavat osan lämpöenergiastaan seinämälle, jolloin niiden lämpötila putoaa alle keskimääräisen ympäristön lämpötilan. Siten ne muodostavat pudotessaan muuta virtausta kylmemmän rajakerroksen seinäpinnan läheisyyteen. Prosessiolosuhteista riippuen harvan suspension osuus lämmönsiirtoon vaihtelee. Harvan suspension virtaus tapahtuu suurelta osin alhaalta ylöspäin ja näin ollen sen synnyttämä rajakerrosalue kasvaa ja siten lämmönsiirto laskee alhaalta ylöspäin mentäessä. Kokonaisuudessaan konvektiolämmönsiirto on suurimmillaan reaktorissa alaosassa, jossa keskimääräiset kiintoaineosuudet ovat suurimpia. Yleispätevää kattavaan koetietoon perustuvaa korrelaatiota kiintoainekonvektiolle ei ole toistaiseksi esitetty. (4, s. 512.)

Kaasukonvektion merkitys kasvaa kiintoainekonsentraation pienentyessä tai kaasun virtausnopeuden kasvaessa. Pelkän kaasukonvektion mittaaminen erikseen on vaikeaa, ja käytännön korrelaatioissa se onkin useimmiten sisällytetty kiintoainekonvektioon. (4, s. 512.)

Kiertoleijuvirtauksen lämmönsiirtomalleissa on tehty oletuksia kiintoainetihentymien käyttäytymisestä ja seinämävyöhykkeen rakenteesta. Ongelmana näillä malleilla on yleensä se, että niissä on useita parametrejä, joiden selvittämiseen ei ole toistaiseksi laajalla alueella pätevää mittausaineistoa. Tällaisia parametreja ovat esim. Kiintoainetihentymien tiheys, nopeus, viiveaika seinämällä hetkellinen lämmönsiirtokerroin sekä esiintymistaajuus. (4, s. 512.)

Kiertoleijukattiloista saatavan koetiedon avulla on kehitetty useita prosessin keskimääräisiin päämuuttujiin perustuvia lämmönsiirron korrelaatioita. Päämuuttujat, kuten keskimääräiset nopeudet, tiheydet, lämpötilat ja hiukkaskokojakaumat, ovat kohtalaisen helposti mitattavissa tai muuten määritettävissä. Tällaiset korrelaatiot antavat hyviä tuloksia vain geometrisesti samankaltaisissa tapauksissa. Geometrisia eroja syntyy mm. reaktorin mittasuhteista, lämmönsiirtopintojen mittasuhteista, pintojen muotojen erilaisuudesta, ilman tuontipaikkojen sijainnista ja muodosta sekä hiukkasmateriaalin raekokojakaumasta. (4, s. 512.)

Kiertoleijukattiloiden normaalitoiminta-alueella voimakkain lämmönsiirtoon vaikuttava tekijä on kiintoainepitoisuus. Kuvassa 4 on esitetty tyypillinen lämmönsiirtokertoimen alue suspensiotiheyden funktiona lämpötila välillä 800–900 °C. Toisaalta kiintoainepitoisuuden lämmönsiirtopintojen tasolla vaikuttaa oleellisesti kaasun keskimääräinen nopeus, joten sen muutoksilla on huomattava vaikutus välillisesti lämmönsiirtoon. (4, s. 512.)



KUVA 4. Suspensiotiheyden vaikutus lämmönsiirtokerroimeen seinämän lähellä (4, s. 513.)

Lämpötilan muutokset vaikuttavat erityisesti säteilyn osuuteen lämmönsiirtokerroimes-  
sa. Siten kokonaislämmönsiirtokerroin kasvaa reaktorin lämpötilan kasvaessa. Lämpö-  
tilan vaikutus näkyy suhteellisesti voimakkaimmin reaktorin yläosassa pienillä kaasun  
nopeuksilla, jolloin kiintoaineosuudet ovat pieniä. Tämän seurauksena on tällöin sätei-  
lyn osuus kokonaislämmönsiirrosta suurimmillaan. Normaalitapauksessa kiintoaineen  
hiukkaskoko on reaktorin lämmönsiirtoalueella välillä 50...1 000  $\mu\text{m}$ . Tällä alueella  
hiukkaskoon suureneminen heikentää lämmönsiirtoa. (4, s. 513.)

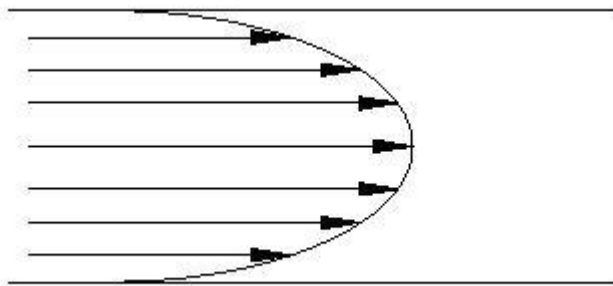
## 4 VIRTAUSTEKNIikka

### 4.1 Reynolds-luku

Reynoldsin luku ilmaisee virtausosaseen vaikuttavien hitausvoimien ja viskositeetti-voimien suhteen. Virtauksessa vaikuttavat yleensä painevoima, hitausvoima ja kitkavoima, jossa kahden virtauksen tulee olla fysikaalisesti yhdenmuotoisia.

### 4.2 Laminaarinen virtaus

Laminaarisessa eli kerroksittaisessa virtauksessa osaset liikkuvat pitkin virtaviivoja, jotka ovat kuvan 5 mukaisesti putken pituusakselin suuntaisia. Osaset eivät sekoitu keskenään.



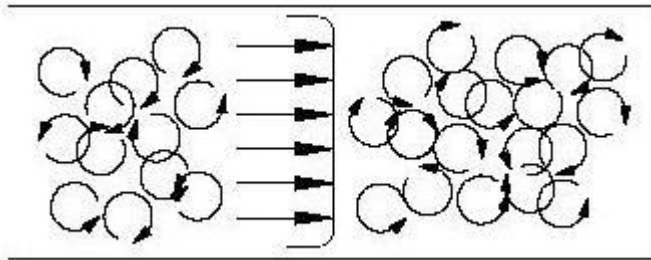
KUVA 5. Laminaarinen virtaus (6)

Mitattaessa kitkahäviötä, havaitaan että halkaisijaltaan samankokoisissa ja yhtä pitkissä putkissa virtausvastus on sama, vaikka pinnankarheus vaihtelee. Pyöreissä putkissa laminaarivirtaus esiintyy, kun Reynoldsin luku on pienempi kuin 2 300.

### 4.3 Turbulenttinen virtaus

Turbulenttisessa eli pyörteisessä virtauksessa esiintyy aksiaali suuntaisen siirtymisen ohella myös poikittaisliikettä, kuten kuvassa 6 näkyy. Tästä johtuen virtausosaset sekoittuvat jatkuvasti. Turbulenttisessa putkivirtauksessa kitkahäviö riippuu toisin, kuin laminaari virtauksessa seinämänkärheudesta. Nopeusjakautuma on selvästi tasaisempi,

kuin laminaarisessa virtauksessa. Virtausta esiintyy, kun Reynoldsin luku ylittää arvon 2 300.



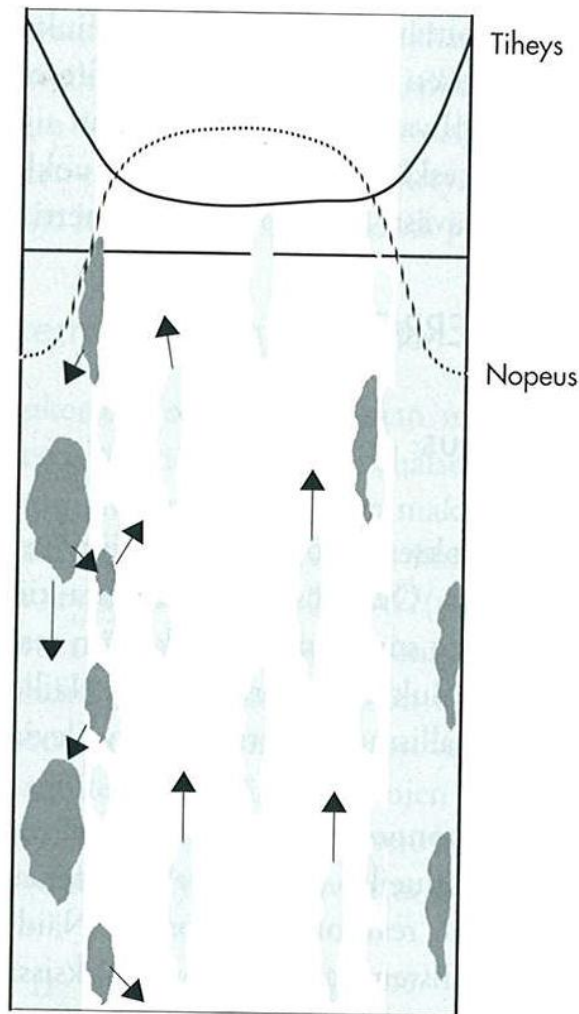
KUVA 6. Turbulenttinen virtaus (6)

Virtauksissa pyritään aina turbulenttiseen virtaukseen sen aiheuttaman pienemmän painehäviön ja suuremman lämmönsiirtokertoimen ansiosta.

#### 4.4 Kiertoleijuvirtaus

Kun kaasun nopeus leijukerroksessa nousee kiertoleijuvirtauksen alueelle, kiintoainetiheys reaktorin yläosissa kasvaa. Osa ylöspäin virtaavista kiintoainehiukkasista muodostaa paikallisia tihentymiä, joista suuri osa virtaa alaspäin reaktorissa ja liike poikkeaa virtauksessa olevien yksityisten hiukkasten virtauksesta. (4, s. 505.)

Kiintoainetihentymien luonnolliset syntymisalueet ovat reaktorin seinäpintojen läheisyydessä, jolloin näillä alueilla kiintoainekonsentraatioiden aikakeskiarvot ovat huomattavasti suurempia kuin reaktorin keskiosissa. Näiden seinämäalueiden paksuus on tois-  
taiseksi esitetyissä teollisten kattiloiden mittauksissa vaihdellut kiintoainetiheydestä ja korkeustasosta riippuen välillä 0 ...30 cm. Seinämäalueelle muodostuvat kiintoainetihentymät pyrkivät putoamaan painovoiman vaikutuksesta alaspäin kuljettaen siten kiintoainehiukkasia reaktorin ylemmistä osista alas. Näin reaktoriin muodostuu kiintoainemateriaalille sisäinen kierto, jossa kiintoaine kulkeutuu yksittäisinä hiukkasina ylöspäin ja osa materiaalista palaa kiintoainetihentymänä alas lähinnä reaktorin seinämäalueella. Tämä kierto tasoittaa omalta osaltaan lämpötilaeroja, joita polton reaktiot ja reaktoriin sijoitetut lämmönsiirtopinnat pyrkivät synnyttämään. Kuvassa 7 on havainnollistettu tyypillisen kiertoleijuvirtauksen rakenne. (4, s. 505.)



KUVA 7. Kiertoleijuvirtauksen rakenne (4, s. 506)

Täydellä kuormalla kiertoleijureaktorin pohja-alueella kiintoainetiheydet saattavat olla kohtalaisen suuria eli yli  $300 \text{ kg/m}^3$ , kun taas reaktorin yläosassa tiheydet ovat tyypillisesti vain  $0 \dots 20 \text{ kg/m}^3$ . Tällöin reaktorista poistuvan ja erottimen avulla takaisin palautettavan kiertovirran suuruus vaihtelee normaalisti välillä  $0 \dots 20 \text{ kg/m}^3$  kuormituksesta ja kiintoaineen laadusta riippuen. (4, s. 506.)

Kiertoleijukattilan normaali polttoainetehon säätöalue vaihtelee täydestä tehosta  $20 \dots 50$  %:n tehoon. Pienillä kuormilla kiintoainetiheys reaktorin yläosassa pienenee ja leijutus-tilassa saatetaan siirtyä aina kuplivaleijutilaan asti. Tällöin polttotapahtumaa voidaan arvioida myös kuplivaleijukerrosteorioiden avulla. Pienillä kuormitustasoilla alkaa arinan painehäviön pienuus vaikeuttaa leijutusta. (4, s. 506.)

Perusongelmana tarkasteltaessa teoreettisesti kaasu-kiintoainesuspensiovirtausta on se, että kaasun virtauksen lisäksi olisi kunkin yksittäisen hiukkasen virtaus ja vaikutus kaasun virtaukseen otettava huomioon. Tällainen menettely on kuitenkin käytännössä mahdotonta, minkä vuoksi yleensä pyritään esittämään kiintoaineen käyttäytyminen yksittäisten hiukkasten sijasta yhtenä tai useampana jatkuvana faasina. Käytännön laskentatarpeisiin sopivissa virtausyhtälöissä joudutaan tarkastelu rajoittamaan jollain tavalla määritettyihin kesimääräisiin suureisiin. (4, s. 506.)

## 5 UUDEN MENETELMÄN VALINTA

Kattilaa ajettaessa asennetaan seinille putkipaneeleita lämpötilan säätöä varten. Paneelit ovat joko 0,3 MW ja 0,1 MW kokoisia. Paneelien määrä ja asennuspaikka riippuu siitä, kumpaa leijupolttomenetelmää käytetään. Ajettaessa kierto-leijupolttoa kattilaan asennetaan puolta enemmän paneeleita, kuin kerrosleijupoltossa. Paneeleita täytyy joko asentaa lisää tai poistaa menetelmän muuttuessa. Myös silloin, kun kattilassa testataan uusia polttoaineita, täytyy jokaiselle polttoaineelle löytää sopiva määrä paneeleita, jotta lämpötila saadaan oikeaksi.

Vanhaa putkipaneelien vaihtomenetelmää pyritään parantamaan siten, että kattilan lämpötilaa voidaan säätää online-periaatteella ajon aikana. Näin ollen myös asennustyöt vähenisivät. Ratkaisun tulee olla sellainen, ettei se oleellisesti häiritse kattilan virtauksia tai muuta toimintaa. Lisäksi rakenteen täytyy olla sellainen, että 0...0,5 MW:n teholla voidaan säätää koelaitoksen tulipesän lämpötilaa portaittain ajon aikana.

Menetelmän ideoimiseen ja valitsemiseen osallistui suurin osa koelaitoksen henkilökunnasta. Tarkoituksena oli löytää mahdollisimman monta erilaista ideaa. Sopivia vaihtoehtoja löytyi kaksi, joista toinen oli lämpöpintojen mekaaninen peittäminen ja toinen nuohointyyppinen lämpöpinnan siirto. Molemmista menetelmistä selvitettiin sekä hyvät että huonot puolet. Peittämismenetelmässä ongelmana on mm. se, että peittämiseen tarkoitettuja ripoja täytyy jäähdyttää vedellä tai muuten rivat voivat sulaa pois. Jos ripoja jäähdytettäisiin vedellä, siihen kuluisi lähes yhtä suuri teho, kuin peitettävänä olevan putkipaneelin ottama teho. Tämän perusteella valittiin nuohointyyppinen lämpöpinnan siirto (liite 3), jossa putkipaneeli saadaan liikkumaan sähkömoottorin ja kierteen avulla. Menetelmällä saataisiin poistettua se, että kattilan tulipesää jäähdytettäisiin kiertokaa-sulla tai primääri-sekundääri-ilmasuhdetta muuttamalla.

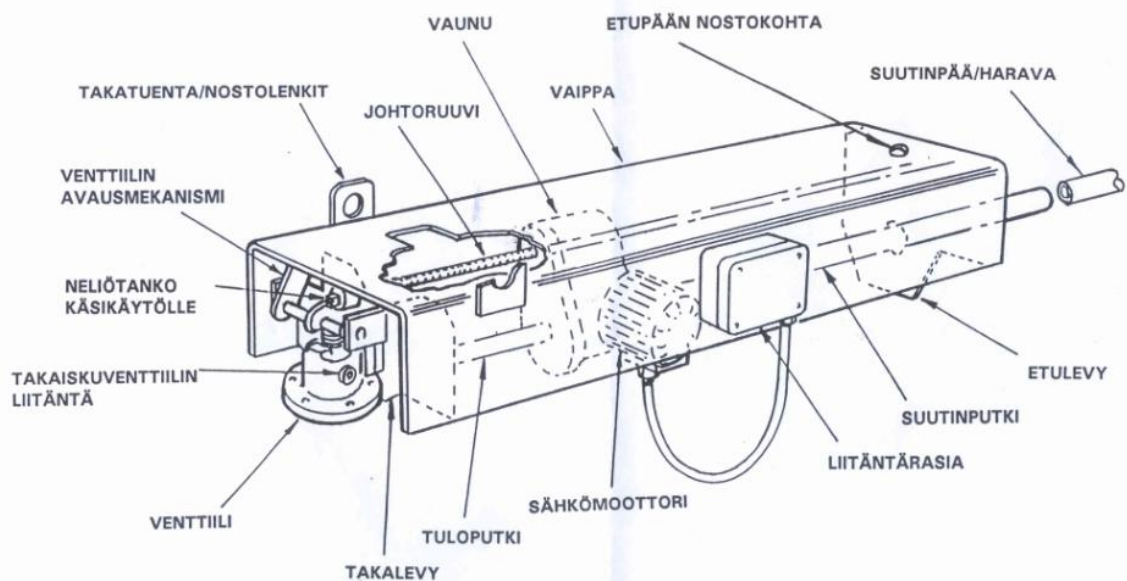
### 5.1 Nuohoin

Kattilan tulistinalueella käytetään höyrynuohousta. Nuohoushöyrynä toimii kattilan



välitulistuksen höyry. Käytettävä höyrynpaine on maksimissaan 40 bar, nuohoimella painetta säädetään kuristusventtiilillä tasolle 29 - 27 bar. Höyrynuohuksessa tarvittava höyrynlämpötila on minimissään 240 °C.

Kuvan 8 mukainen nuohoin muodostuu nuohousvaunusta ja puhallusputkesta. Nuohousvaunussa sijaitsee käyttömoottori, joka vaihteiston ja johtoruuvin avulla kuljettaa vaunua nelikulmaputkea pitkin. Puhallusputkea tuetaan kahdella tukirullalla, jotka ovat vinoasti kiinni etulevyssä ja tukevat näin koko leveydeltään puhallusputkea sekä myötäilevät sitä pyörimissuuntaan. Nuohousventtiili avautuu, kun vaunu lähtee liikkeelle. Avautuessaan höyry työntyy sisäputkeen, edelleen nuohousputkeen ja lopulta suutinpään suuttimien kautta puhdistettaville pinnoille.



KUVA 8. Höyrynuohoin (3)

## 5.2 Lämmönsiirtimen mitoitus

Menetelmäksi valittiin nuohointyyppinen paneelien liikuttaminen. Lämmönsiirtimelle on kattilassa kolme paikkaa johon se voitaisiin asentaa. Ensimmäisenä lasketaan paneelille pinta-alat keskiarvoihin perustuen kaikissa kolmessa kohtaa (liite 2), että löydetäisiin optimaalinen kohta. Laskennan aluksi katsotaan kuvan 2 käyrästä perusteella

jokaiselle korkeudelle kiintoaineen suspensiotiheys. Suspensiotiheyteen perustuen saadaan kuvasta 5 lämmönsiirtokerroin 850 °C kohdalta. Lämmönsiirtokerroin sijoitetaan pinta-alan kaavaan 1, kun tuleva vesi on 60 °C, kattilan keskimääräinen lämpötila on 850 °C ja mitoituksen lähtökohtana on saada 0,5 MW teho putkipaneelilla.

$$A_{\text{kok.pint a-ala}} = \frac{\Phi}{\alpha \Delta T_1} = \frac{500000W}{180 \frac{W}{m^2 K} \cdot (850 - 60) \text{ } ^\circ C} = 3,52 m^2 \quad \text{KAAVA 1}$$

$A_{\text{kok.pint a-ala}}$  = tarvittava pinta-ala putkipaneelille

$\Phi$  = teho, jolla tulipesänlämpötilaa säädetään

$\Delta T_1$  = tulipesänlämpötilan ja putkistossa virtaavan veden lämpötilaero

Yhden putken lämmönsiirtopinta-ala saadaan kaavalla 2, kun putken sisähalkaisija on 25,4 mm ja ainevahvuus on 6,3 mm. Putken ulkohalkaisija on 31,7 mm. Putken pituudeksi rajoitetaan 3,2 m, jotta putkipaketti ei ylettyisi toiseen seinään asti.

$$A_{\text{putken.pint a-ala}} = 2\pi rh = 2 \cdot \pi \cdot 0,01585 m \cdot 3,2 m = 0,31868 m^2 \quad \text{KAAVA 2}$$

$A_{\text{putken.pint a-ala}}$  = yhden putken pinta-ala

$h$  = putken pituus

Kahden ensimmäisen pinta-ala kaavan perusteella saadaan lämmönsiirtimeen putkien lukumäärä laskettua kaavalla 3, kun putkien pituus on 3,2 m.

$$X_{\text{putkien.määrä}} = \frac{A_{\text{kok.pint a-ala}}}{A_{\text{putken.pint a-ala}}} = \frac{3,52 m^2}{0,31868 m^2} = 11,03 \approx 11 \text{ Putkea} \quad \text{KAAVA 3}$$

$X_{\text{putkien.määrä}}$  = montako putkea tarvitaan kokonaispinta-alaan

Laskennan jälkeen todettiin, että 3 m korkeus on optimaalisin korkeus lämmönsiirtimelle. Kahden muun korkeuden laskennat ovat liitteestä 2. Putkien koon ja pinta-alan perusteella voidaan määrittää virtausnopeus vedelle.

Työssä mitoitetaan palkit, kannatinrullien akselit ja putket siten, että ne kestävät vesikierron aiheuttamat voimat sekä laitteen painon aiheuttamat voimat. Mitat ja tarkemmat tiedot palkeista sekä akseleista ja niiden sijainneista ovat liikesalaisuuksia.

### 5.3 Virtausnopeuden määrittäminen

Virtausnopeuden määrittämistä varten on tiedossa, kuinka paljon tehoa virtauksen mukana täytyisi poistaa. Tuleva vesi on 60 °C ja 6 bar:n paineessa neste saa korkeintaan lämmetä 158 asteeseen. Lähtevän veden lämpötilaksi valitaan 150 °C, jotta höyrystymistä ei tapahdu. Nesteen tiheys ja ominaislämpökapasiteetti valitaan lämpötilojen keskiarvolla, koska molemmat muuttuvat lämpötilan noustessa. Seuraavaksi lasketaan veden massavirta ja virtausnopeus. Massavirta saadaan kaavalla 4.

$$q_v = \frac{\Phi}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} = \frac{500 \text{ kW}}{955 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,225 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot (150 - 60) \text{ } ^\circ\text{C}} = 0,00137688 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ KAAVA 4}$$

$C_p$  = ominaislämpökapasiteetti

$\Phi$  = teho, jolla tulipesänlämpötilaa säädetään

$\Delta T$  = putkistossa virtaavan veden lämpötilaero

$\rho$  = tiheys

Virtausnopeus saadaan kaavalla 5.

$$v = \frac{q_v}{A_{\text{putken.}}} = \frac{4 \cdot 0,00137688 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot 0,0254^2 \text{ m}^2} = 2,717 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ KAAVA 5}$$

$A_{\text{putkien}}$  = tuloputken pinta-ala

$q_v$  = massavirta

## 5.4 Tekniset ongelmat

Menetelmässä ongelmana on se, että kun kattilan seinään tehdään reikä ja alhaalla tulipesässä on vähän painetta, voi hiekkaa tulla reiästä lämmönsiirtimen kotelon sisälle. Kotelon sisälle pääsevä hiekka voi helposti tukkia laakereita ja estää kuljetusrullien kunnollisen pyörimisen. Jos hiekkaa tulee paljon kotelon pohjalle, se pysäyttää koko laitteiston. Lämpölaajenemisien suhteen päädyttiin menetelmään, jossa lämpölaajenemiset ohjataan alaspäin. Näin ylhäällä olevat putket pysyvät mahdollisimman hyvin paikallaan eivätkä putket väännättäisi liikutusmekanismeja ja tiivistepintaa.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä suunniteltiin koelaitoksen kattilaan lämmönsäädin, jolla voidaan säätää kattilanlämpötilaa online-periaatteella ajon aikana. Lämmönsäädin mitoitettiin virtaus-tekniisesti ja siitä mallinnettiin Solidworks-ohjelmalla periaatekuva.

Työssä päädyttiin menetelmään, jossa nuohoimen tapaisella liikutusmekanismilla liikutetaan putkipatteria. Näin ollen työltä vaadittava portaittainen kattilanlämpötilan säätö toteutuu, koska patteria voidaan liikuttaa sähkömoottorilla lähes portaattomasti. Menetelmällä saatiin poistettua se, että kattilan tulipesää jäähdytettäisiin kiertokaasulla tai primääri-sekundääri-ilmasuhdetta muuttamalla. Ongelmana kuitenkin on kattilan sivuun tehtävä reikä tulipesässä olevan pienen paineen takia. Paine saattaa työntää hiekkaa reiästä kattilan ulkopuolella olevaan koteloon ja vaikeuttaa paneelin liikuttamista. Paneelin asennuskorkeudeksi valittiin 3 metriä, jolloin paneelin pinta-alan täytyy olla vähintään  $3,52 \text{ m}^2$ . Paneelissa on siis 11 ulkohalkaisijaltaan 31,7 mm ja 3,2 metriä pitkää putkea.

## LÄHTEET

1. Metso lyhyesti. Saatavissa:

[http://intra.metso.com/corporate/home\\_fin.nsf/FR?ReadForm](http://intra.metso.com/corporate/home_fin.nsf/FR?ReadForm). Hakupäivä 29.3.2011.

2. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki. 1994.

Höyrykattilatekniikka. 5 painos. Helsinki: Edita.

3. Kuivas, Jussi 2011. Re: Toppilassa tehtävän kattilan likaantumistutkimuksen

johdosta. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: [t7kuha00@students.oamk.fi](mailto:t7kuha00@students.oamk.fi). 13.1.2011

4. Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko – Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari. 2002.

Poltto ja palaminen. toinen täydennetty painos. Jyväskylä: International flame research foundation.

5. Alhomens Kraft. Saatavissa:

[http://personal.inet.fi/yritys/scartcom/referenssi\\_tiedostot/image007.jpg](http://personal.inet.fi/yritys/scartcom/referenssi_tiedostot/image007.jpg). Hakupäivä

1.3.2011.

6. Putkivirtaus. Saatavissa:

<http://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/4.+Putkivirtaus>. Hakupäivä 28.3.2011.