

Keijo Kovero

# FCC:n reaktori-regeneraattori-riser-paineprofii- lin mittaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinöörityö

25.4.2018

Tekijä(t) Otsikko	Keijo Kovero FCC:n reaktori-regeneraattori-riser-paineprofiilin mittaus
Sivumäärä Aika	48 sivua + 2 liitettä 25.4.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	Diplomi-insinööri Esa Tamminen (Neste Oyj) Lehtori Timo Seuranen (Metropolia)
<p>Insinöörityö tehtiin Neste Oyj:n Porvoon öljynjalostamolla FCC-yksikössä.</p> <p>Insinöörityön tavoitteena oli mitata FCC-yksikön paineprofiili sekä tuottaa kirjallista aineistoa, jota voidaan käyttää FCC-yksikön operaattorien pätevyyskoulutuksessa.</p> <p>FCC-yksikön ydintä eli reaktori- regeneraattori- ja riser-osaa on operoinnin kannalta erittäin tärkeä ymmärtää sekä monitoroida. Katalyytin toimiva leijutus on yksi FCC-yksikön tärkeimmistä tekijöistä ja leijutusongelmat yksi tyyppivioista.</p> <p>Leijutusilmiön ymmärtäminen, monitorointi sekä mahdollisten ongelmien poistaminen parantaa FCC-yksikön käytettävyyttä. Hyvä paineprofiilin tuntemus nopeuttaa ja tarkentaa syiden selvittämistä FCC-yksikön ongelmaratkaisutilanteissa.</p> <p>Kirjallisuusosassa paneuduttiin leijutuksen teoriaan sekä selvitetään paineprofiilin teoria leijupedissä ja FCC-yksikön katalyyttiputkistoissa.</p> <p>Soveltavassa osuudessa mitattiin FCC-yksikön reaktori-regeneraattori-riser-osan-paine-profiili sekä laskettiin mittauksista paine- ja tiheysprofiili.</p> <p>Työn tuloksena mitattiin Porvoon Jalostamon FCC-yksikön paine- ja tiheysprofiili normaalioperoinnin aikana ja havaittiin mahdollisia ongelmakohteita yksikön katalyyttikierrossa.</p>	
Avainsanat	FCC, leijukatalyyttinenkrakkaus, paineprofiili, leijutus

Author(s) Title Number of Pages Date	Keijo Kovero Survey of the FCC unit's reactor-regenerator-riser pressure balance 48 pages + 2 appendices 25.4.2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Esa Tamminen, M.Sc (Neste Oyj) Timo Seuranen, Principal Lecturer (Metropolia)
<p>This thesis was made in the FCC-unit of Neste's Porvoo refinery.</p> <p>The objective of the thesis was to develop and perform FCC unit's single gauge pressure survey.</p> <p>It is vital to understand and monitor the core of the FCC unit, the reactor-regenerator-riser circuit. One of the most important factors for the FCC unit, is functional fluidization of the catalyst. Fluidization issues are one of the most common problem areas in FCC units.</p> <p>Clear understanding of the principles of fluidization, monitoring and solving the problems would increase the utilization of the FCC unit. Knowledge of the FCC unit's pressure balance will accelerate and clarify trouble shooting.</p> <p>The theory part concentrates on fluidization, fluidization on a catalyst bed and in the catalyst circulation of the FCC unit.</p> <p>In the practical part, the FCC units' pressure balance was surveyed and calculated from the single gauge pressure measurements.</p> <p>As result of the thesis, the pressure and density profile of Porvoo refinery's FCC-unit profile was measured once during normal operating, and some possible problem areas were found in the catalyst circulation.</p>	
Keywords	FCC, fluid catalytic cracking, pressure profile, fluidization

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Leijutus	2
2.1	Leijupetipartikkelien ominaisuudet	3
2.1.1	Muotokerroin	4
2.1.2	Huokoisuus	4
2.1.3	Geldart-luokittelu	6
2.2	Minimi- ja maksimileijumisnopeus	7
2.3	Leijupedit	11
2.3.1	Tasainen fluidisaatio	12
2.3.2	Kupliva fluidisaatio	12
2.3.3	Turbulenttinen ja nopea fluidisaatio	13
2.3.4	Pneumaattinen kuljettaminen	14
2.4	Leijutuksen ongelmia	14
2.4.1	Slugging-ilmio	14
2.4.2	Kanavoituminen	15
2.5	Hydrostaattinen paine ja leijutetun katalyytipetin pinnanmittaus	15
3	Leijukatalyyttinen krakkaus (FCC)	18
3.1	Prosessin yleiskuvaus	18
3.2	Katalyytti	19
4	Leijutus FCC-yksikössä	20
4.1	Katalyyttikierto	21
4.2	Katalyyttihopperi	23
4.3	Katalyytin laskuputket	23
4.4	Regeneroidun katalyytin luistiventtiili POV-2401	27
4.5	Nousuputki tai riseri	27
4.6	Reaktori ja strippausosa	28
4.7	Käytetyn katalyytin luistiventtiili POV-2403	28
5	Paineprofiilin mittaus	29

5.1	Yleinen ohje mittauksien suorittamiseksi	30
5.2	Paine- ja tiheysprofiili	32
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	45
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. FCC:n paineprofiilimittauspöytäkirja	
	Liite 2. Laskentakaavat paine- ja tiheysprofiilia varten	

## Lyhenteet

FCC	Leijukatalyyttinen krakkaus -yksikkö, Fluid Catalytic Cracker
TL2	Tuotantolinja 2
TL1	Tuotantolinja 1
TL3	Tuotantolinja 3
POV	Kauko-ohjattava luistiventtiili
RO-levy	Virtauksen kuristuslevy
TOP	Tuotannon optimointijärjestelmä

## 1 Johdanto

Tämä insinööri työ on tehty Porvoon öljynjalostamon leijukatalyyttisen krakkausyksikköön monitoroinnin kehittämiseksi.

FCC-yksikön tasemonitorointia on tehty uudella työvälineellä Porvoossa vuodesta 2014 lähtien ja se on tuonut esille erilaisia lisämonitorointitarpeita, joita ei voida toteuttaa pelkästään olemassa olevan automaatioinstrumentoinnin avulla.

FCC-yksikön ydin eli reaktori-regeneraattori-riser on operoinnin kannalta erittäin tärkeä ymmärtää sekä monitoroida. Leijutusilmiön ymmärtäminen, monitorointi sekä mahdollisten ongelmien poistaminen parantaa FCC-yksikön käytettävyyttä. Hyvä paineprofiilin mittaaminen nopeuttaa ja tukee juurisyyden löytämistä yksikön ongelmaratkaisutilanteissa.

Insinööri työnsä tavoitteena on mitata FCC-yksikön paineprofiili sekä tuottaa kirjallista aineistoa, jota voidaan käyttää FCC-yksikön operaattorien koulutuksessa

Neste Oyj on suomalainen korkealaatuisiin puhtaamman liikenteen polttoaineisiin keskittävänä jalostus- ja markkinointiyhtiö. Nesteen uusiutuvat tuotteet valmistetaan Porvoon, Rotterdamin ja Singaporen jalostamoilla ja erilaiset raakaöljypohjaiset öljytuotteet Naantalissa ja Porvoossa. Lisäksi Neste on osaomistajana perusöljyä valmistavassa laitoksessa Bahrainissa. [1.]

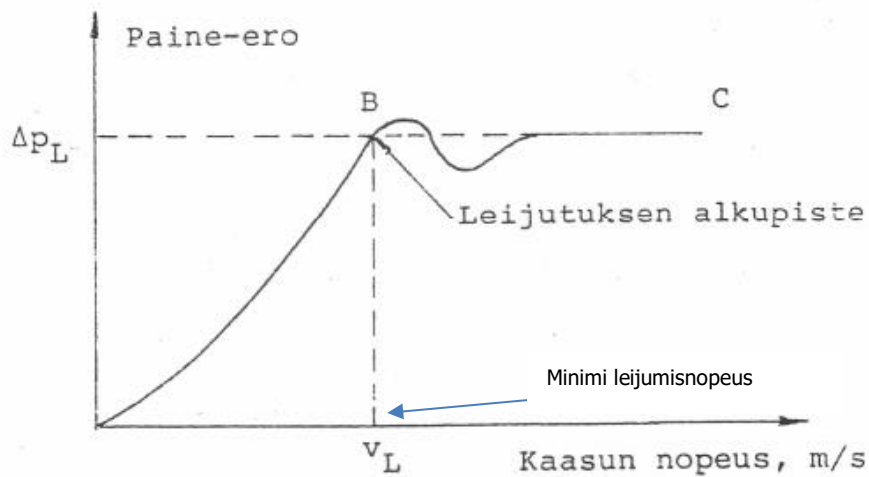
Porvoon jalostamo on jaettu viiteen tuotantolinjaan, jotka koostuvat yhteensä yli 40 prosessiyksiköstä. Porvoon jalostamo tuottaa kaikkia tärkeitä öljytuotteita liikenteen, teollisuuden ja energiantuotannon tarpeisiin. Erilaisia tuotteita ja komponentteja valmistetaan yhteensä noin 150 kpl. [2.]

Jalostamolla FCC-yksikön päätetehtävä on tuottaa bensiinijakeita krakkaamalla raskaampaa kaasuoiljysyöttöä. FCC-yksikkö on lisäksi merkittävä lyhytketjuisten olefiinien (C<sub>3</sub>- ja C<sub>4</sub>-olefiinit) tuottaja. Porvoon jalostamon FCC-yksikkö sijaitsee tuotantolinja 2:n (TL2) alueella, mutta siihen liittyvät rikinpoisto- ja tislauksyksiköt sijaitsevat tuotantolinjoilla 1 (TL1) sekä 3 (TL3). [3.]

## 2 Leijutus

Leijutus eli fluidisaatio määritellään tilaksi, jossa hienojakoinen kiintoaine käyttäytyy nesteen tavoin kaasu- ja/tai nestevirrassa. Kiintoainepartikkeli fluidisoituu, kun ylöspäin virtaava kaasu tai neste kohdistaa partikkeliin maanvetovoimaa suuremman työntövoiman, jolloin partikkeli alkaa leijumaan. [4.]

Leijutuksen eduksi voidaan laskea hyvä sekoittuminen, tehokas lämmönsiirto, tasainen lämpötilan jakautuminen leijupedissä sekä kiintoaineen käsittely ja kuljettaminen nesteen tavoin. [4.]



Kuva 1. Kiintoainepedissä syntyvä paine-ero, pedin läpi virtaavan kaasun virtausnopeuden funktiona [4, muokattu.]

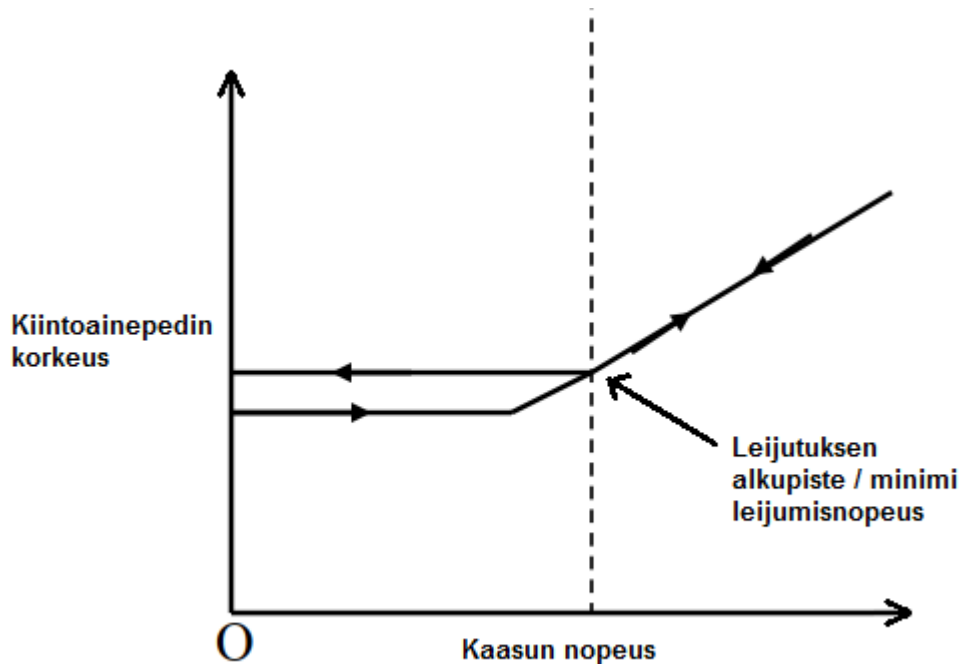
Käsitteen leijutus tarkastelussa käytetään yleisesti esimerkkinä rakeisen kiintoaineen muodostamaa kiintoainepetiä, joka lepää jakopohjan päällä. [4.]

Kiintoainepedin alapuolelta puhalletaan kaasua ja kerroksessa syntyvää paine-eroa ( $\Delta P$ ) mitataan. Paine-eroa tarkastellaan kaasun virtausnopeuden (m/s) funktiona. Kaasun virtausnopeuden kasvaessa paine-ero suurenee aluksi tasaisesti, kuten fluidisaatiokäyrästä (kuva 1) voidaan havaita. Kaasun virtausnopeutta edelleen nostettaessa tullaan lopulta tilanteeseen, jossa paine-ero vastaa kiintoainekerroksen aiheuttamaa staattista painetta (piste B). Mikäli kaasun virtausnopeutta kasvatetaan entisestään, heilahtaa paine-ero äkillisesti, koska kiintoainepeti alkaa "löystyä", minkä seurauksena kiintoainepedin virtausvastus laskee ja paine-ero hetkellisesti putoaa. [4.]



Kaasun virtausnopeuden edelleen kasvaessa kiintoainepartikkelit pääsevät vapaasti liikkumaan toisiinsa nähden ja kiintoainepeti alkaa laajeta korkeussuunnassa, paine-eron kuitenkin asettuessa samalla vakioarvoon ( $\Delta P_L$ ). Tämä on piste, jossa ylöspäin virtaava kaasu kohdistaa partikkeleihin kiintoainepedin painoa suuremman työntövoiman, jolloin partikkelit leijuvat vapaasti jakopohjan yläpuolella kaasuvirran kannattelemassa. Tätä ilmiötä kutsutaan fluidisaatioksi eli leijutukseksi. [4; 5.]

Kun kaasun virtausnopeutta nostetaan edelleen minimileijumisnopeuden yli, alkaa kiintoainepeti laajenemaan korkeussuunnassa, mutta paine-ero pedin yli pysyy edelleen vakiona. Pedin korkeus nousee kaasun virtausnopeuden funktiona kuten kuvassa 2 on esitetty, mutta kaasun virtausnopeuden kasvaessa tarpeeksi suureksi kiintoainepartikkelit alkavat kulkeutumaan pois pedistä kaasun mukana. [5.]



Kuva 2. Leijupedin korkeus kaasun nopeuden funktiona [5, muokattu.]

## 2.1 Leijupetipartikkelien ominaisuudet

Kaasun virtausnopeuden lisäksi leijutettavan kiintoaineen ominaisuudet, kuten hiukkaskoko, partikkelijakauma, muoto sekä tiheys vaikuttavat merkittävästi leijutukseen.

### 2.1.1 Muotokerroin

Muotokerroin kuvaa kiintoainepartikkelin muodon poikkeavuutta pallonmuodosta. Muotokerroin määritellään partikkelille seuraavasti.

$$\Phi = \frac{\text{pallon pinta-ala (tilavuus sama kuin mitattavalla partikkelilla)}}{\text{partikkelin todellinen pinta-ala}} \quad (1)$$

jossa  $\Phi$  on muotokerroin [-]

Täysin pyöreälle partikkelille muotokertoimen arvo on 1 ja kaikille muilla muodoilla välillä  $0 < \Phi < 1$ .

Kiintoainepartikkelin muotokerroin on melko helposti mitattavissa, mutta joskus käytetään myös viitteellisiä arvoja. Taulukossa 1 on esitetty viitteellisiä arvoja erilaisille partikkeleille.

Taulukko 1. Muotokertoimen arvoja erilaisille partikkeleille [6, s.441, muokattu.]

Partikkeli	Muotokerroin, $\Phi$
Hiekka	0,65...0,95
Katalyytti (yleisesti)	0,4...0,9
Murskattu kivihiili	0,65
Pölymäinen kivihiili	0,73
FCC katalyytti	0,58

Muotokertoimella on vaikutusta siihen, miten kiintoainepartikkelit pakkaantuvat ja täten myös kiintoaineen bulkkitiheyteen [6, s. 440.].

### 2.1.2 Huokoisuus

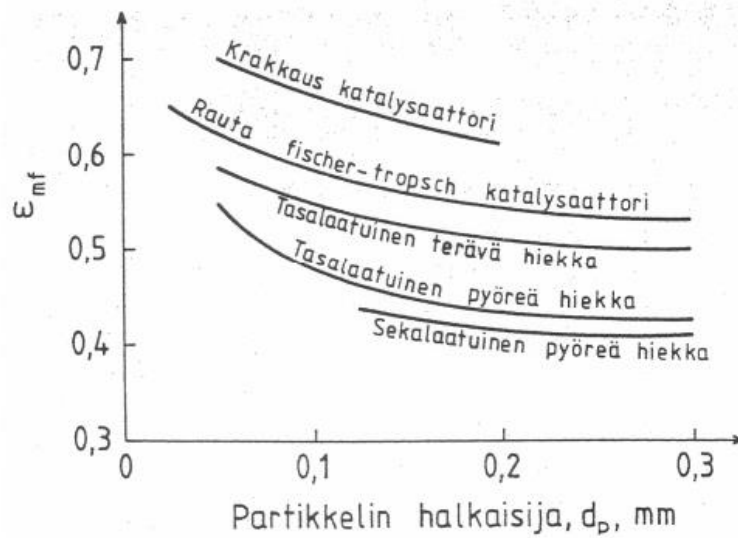
Partikkelien huokoisuus leijutuksen alussa ( $\epsilon_{mf}$ ) vaikuttaa voimakkaasti minimileijutusnopeuteen. Huokoisuuteen vaikuttavat partikkelien muoto sekä kokojakauma. Huokoisuutta ei tyypillisesti tunneta, mutta se on laskettavissa, mikäli muotokerroin tunnetaan. Alla olevaa Wenin ja Yunin yhtälöä voidaan käyttää arvioidessa huokoisuutta,  $\epsilon_{mf}$ . [7, s.124.]

$$\frac{1}{\Phi \cdot \epsilon_{mf}^3} \approx 14 \quad (2)$$

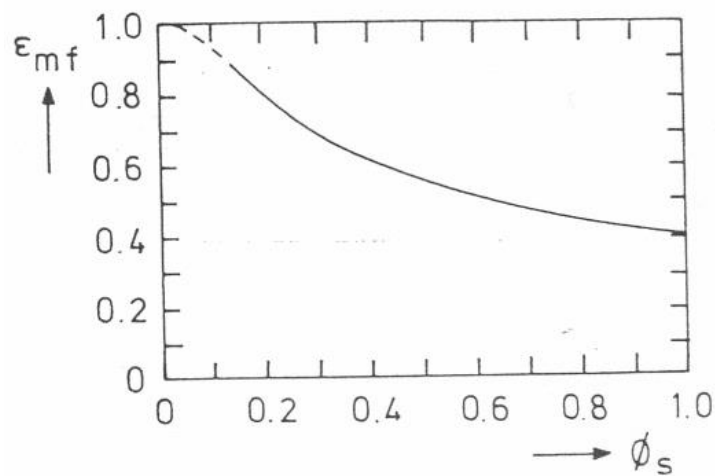
jossa  $\Phi$  on muotokerroin [-]

$\epsilon_{mf}$  on huokoisuus minimileijutusnopeudella [-]

Suuntaa antavia huokoisuusarvoja on esitetty myös käyrinä partikkelikoon ja muotoker-  
toimen funktiona.



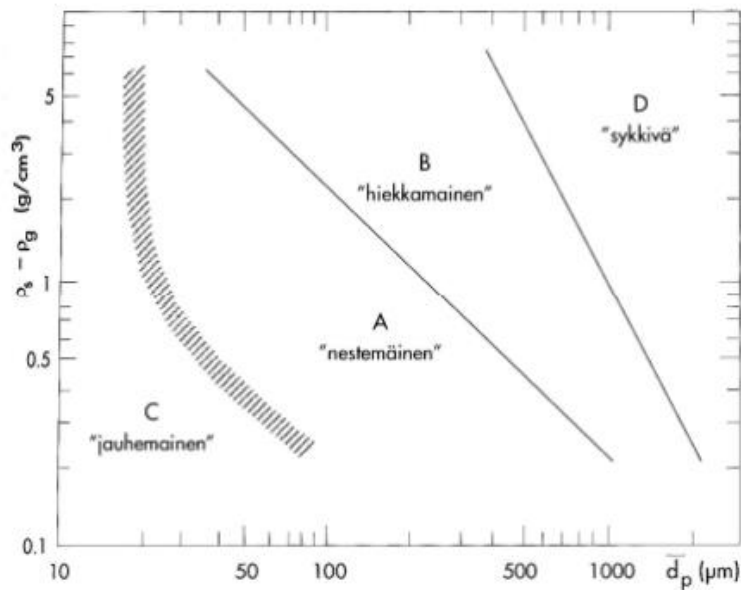
Kuva 3. Huokoisuus minimileijutusnopeudella kiintoaineen partikkeliin koon funktiona erilaisilla materiaaleilla [4.]



Kuva 4. Huokoisuus minimileijutusnopeudella muotokertoimen funktiona [4.]

### 2.1.3 Geldart-luokittelu

Kiintoainepartikkelit luokitellaan usein neljään eri Geldartin kategoriaan partikkelien keskimääräisen koon sekä leijutuskaasun ja partikkelin tiheyseron perusteella. Eri luokat kuvaavat kiintoaineen taipumusta leijua. Geldartin luokitusta käytetään tyypillisesti arvioidessa kiintoaineen sopivuutta leijutukseen eri järjestelmissä [8. s.1006]



Kuva 5. Geldartin leijutus diagrammi partikkelikoon ja tiheyseron funktiona [9, s.13.]

Geldartin luokka A:n partikkelit ovat pienikokoisia ja partikkelikoko on 30–100 μm sekä tiheys alhainen <1400 kg/m<sup>3</sup>. Partikkelit ovat olemukseltaan lähes "nestemäisiä". Tämän tyyppiset partikkelit ovat yleisesti helposti leijutettavissa. FCC-yksikössä käytettävä katalyytti on tyypillinen A-luokan partikkeli. [8, s.1006.]

Geldartin luokka B:n partikkelit ovat suurempia ja niillä on korkeampi tiheys, kuin A-luokan partikkeleilla. B-luokan partikkelikoko on tyypillisesti 100–800 μm ja tiheys välillä 1400–4000 kg/m<sup>3</sup>. Tämän luokan partikkelit ovat tyypillisesti "hiekkamaisia" ja ovat myös helposti leijutettavissa [8, s.1006.].

Geldartin luokka C:n partikkelit ovat erittäin hienojakoisia ja paakkuuntuvia. Partikkelikoko on tyypillisesti alle 20 μm. Tämän luokan partikkelit ovat erittäin vaikeasti leijutettavissa paakkuuntumislouheen vuoksi. Sementti ja jauhot edustavat tätä luokkaa. [8, s.1006.]

Geldartin luokka D:n partikkelit ovat suurikokoisia ja tiheitä, partikkelikoko on yli 1 mm. D-luokan partikkelit ovat tyypillisesti haastavia suuren kokonsa takia. Partikkelien leijuttaminen vaatii suuremman kaasun virtausnopeuden, mikä tyypillisesti aiheuttaa kiintoainepetin kanavoitumista ja "sykkivää" käyttäytymistä, mikä vaikeuttaa merkittävästi leijutuksen hallitsemista. Esimerkkinä tätä luokkaa edustavat jyvät ja kahvipavut. [8, s.1006.]

## 2.2 Minimi- ja maksimileijumisnopeus

Tärkeimpiä tekijöitä leijutuksessa on minimileijumisnopeus, eli piste, jossa leijutus todetaan alkavan. Leijutuksen alkaessa painehäviö kerrottuna patjan poikkipinta-alalla on yhtä suuri kuin kiintoainepetin paino. [7, s.124.]

$$\Delta p * A = L_{mf} * A * (1 - \varepsilon_{mf}) * g * (\rho_p - \rho) \quad (3)$$

jossa  $\Delta p$  on painehäviö kiintoainepatjan yli [Pa]

$A$  on kiintoainepetin poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>]

$L_{mf}$  on kiintoainepetin korkeus minimileijutusnopeudessa [m]

$\rho_p$  on kiintoaine partikkelin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho$  on kaasun tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\varepsilon_{mf}$  on kiintoaineen huokoisuus minimileijutusnopeudella [-]

$g$  on putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s<sup>2</sup>].

Lauseketta yksinkertaistamalla saadaan minimileijutusolosuhteille yhtälö

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) * (\rho_p - \rho) * g \quad (4)$$

Kiintoainepartikkelit ovat useimmiten kiintoainepedeissä epäsäännöllisen muotoisia, ja siksi kaavoissa käytetään lisäksi partikkelikokoa ja muotokerrointa. Painehäviö voidaan laskea sijoittamalla minimileijutusta vastaava huokoisuus. [7, s.124.]

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 \cdot \eta \cdot U}{(\Phi_s \cdot d)^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_p \cdot U^2}{\Phi_s \cdot d} \quad (5)$$

Lauseketta edelleen johtamalla ja tiedetyllä hiukkaskoolla [d] ja huokoisuus -arvolla [ $\varepsilon_{mf}$ ] saadaan toisen asteen yhtälön ratkaisuna minimileijutusnopeus [ $U_{mf}$ ] [7, s.124.]

$$\frac{1,75}{\Phi_s \cdot \varepsilon_{mf}^3} \cdot \left( \frac{d^2 \cdot U_{mf}^2 \cdot \rho^2}{\eta^2} \right) + \frac{150 \cdot (1-\varepsilon_{mf})}{\Phi_s^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} \cdot \frac{d \cdot U_{mf} \cdot \rho}{\eta} - \frac{d^3 \cdot \rho (\rho_p - \rho) \cdot g}{\eta^2} = 0 \quad (6)$$

jossa  $U_{mf}$  on minimileijutusnopeus [m/s]

$\Phi$  on partikkelin muotokerroin [-]

$\varepsilon_{mf}$  on kiintoaineen huokoisuus minimileijutusnopeudella [-]

d on partikkelin keskimääräinen halkaisija [m]

$\eta$  on kaasun dynaaminen viskositeetti [Pa\*s]

$\rho$  on kaasun tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_p$  on kiintoaine partikkelin tiheys [kg/m<sup>3</sup>].

Ergunin yhtälöstä johdettua kaavaa voidaan edelleen yksinkertaistaa, jos kiintoainepatjassa on vain joko suuria tai pieniä partikkeleita ja niiden oletetaan olevan muodoltaan pallomaisia.

Yksinkertaistettu kaava pienille ja pallomaisille partikkeleille:

$$U_{mf} = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho)}{1650 \cdot \eta}, \text{ kun } Re < 20 \quad (7)$$

jossa  $U_{mf}$  on minimileijutusnopeus [m/s]

d on partikkelin keskimääräinen halkaisija [m]

g on putoamiskihtiävyys [9,81 m/s<sup>2</sup>]

$\rho_p$  on kiintoaine partikkelin tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho$  on kaasun tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\eta$  on kaasun dynaaminen viskositeetti [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

Re on Reynolds-luku [-]

Yksinkertaistettu kaava suurille ja pallomaisille partikkeleille:

$$U_{mf}^2 = \frac{d \cdot g \cdot (\rho_p - \rho)}{24,5 \cdot \rho}, \text{ kun } Re > 1000 \quad (8)$$

jossa  $U_{mf}$  on minimileijutusnopeus [m/s]

d on partikkelin keskimääräinen halkaisija [m]

g on putoamiskiikkyvyys [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ]

$\rho_p$  on kiintoaine partikkelin tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho$  on kaasun tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

Re on Reynolds-luku [-]

Arvioitu Reynoldsin luvun arvio voidaan laskea sijoittamalla minimi leijutusnopeudella alla olevaan kaavaan:

$$Re_{mf} = \frac{d \cdot U_{mf} \cdot \rho}{\eta} \quad (9)$$

jossa Re on Reynolds-luku minimileijutusnopeudella [-]

$U_{mf}$  on minimileijutusnopeus [m/s]

d on partikkelin keskimääräinen halkaisija [m]

$\rho$  on kaasun tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

Ylärajan kaasun virtausnopeudelle määrittelee partikkelin kulkeutumisenopeudet systeemistä (entrainment), tosin joskus partikkelin kulkeutuminen järjestelmästä on toivottavaa. Yleisenä arviona maksimileijutusnopeudelle voidaan käyttää kiintoainepartikkelin laskeutumisenopeutta. [5.]

Laskeutumisenopeus ( $V_{\text{laskeutuminen}}$ ) voidaan laskea Stokes-yhtälön avulla. Yhtälö kuvaa kiintoaineen laskeutumisenopeutta väliaineessa.

$$V_{\text{laskeutuminen}} = \frac{(\rho_p - \rho) * g * d^2}{18 * \eta} \quad (10)$$

jossa  $V_{\text{laskeutumien}}$  on partikkelin laskeutumisenopeus väliaineessa [m/s]

$d$  on partikkelin keskimääräinen halkaisija [m]

$g$  on putoamiskiihtyvyyden arvo [9,81 m/s<sup>2</sup>]

$\rho_p$  on kiintoaine partikkelin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho$  on kaasun tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\eta$  on kaasun dynaaminen viskositeetti [Pa\*s]

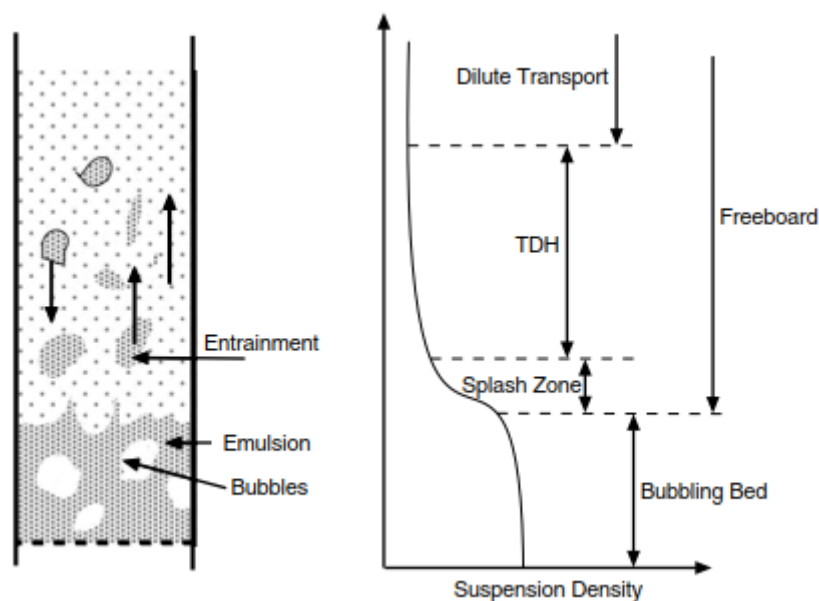
Kun halutaan välttää partikkelien poistuminen systeemistä väliaineen mukana, käytettävä toimintanopeus tulisi olla minimileijutusnopeuden ja laskeutumisenopeuden välillä. Tasalaatuisilla kiintoainepedeillä laskeutumis- ja minimileijutusnopeuden suhdeluku ( $V_{\text{laskeutuminen}} / U_{mf}$ ) on tyypillisesti 30- tai joskus jopa 100-kertainen [5.]

Kuplivan leijupedin pinnalla purskahtelevilla kaasukuplilla on taipumusta sinkauttaa kiintoainepartikkeleita ylöspäin leijupedin pinnasta. Riippuen kiintoainepartikkelien nopeudesta, partikkelin koosta ja kaasun virtausnopeudesta, kiintoainepartikkelit nousevat irti leijupetistä eri korkeuksille. Kiintoainepitoisuus laskee leijupedin pinnasta korkeuden funktiona. Korkeutta, jossa kiintoainepitoisuus laskee jyrkästi ja pysyy sen jälkeen lähes



vakiona, kutsutaan irtautumiskorkeudeksi (Transport Disengagement Height, TDH). Irtautumispisteen jälkeen hienot kiintoainepartikkelit eivät enää palaa leijupetiin, vaan kulkeutuvat eteenpäin kaasuvirran mukana. [10.]

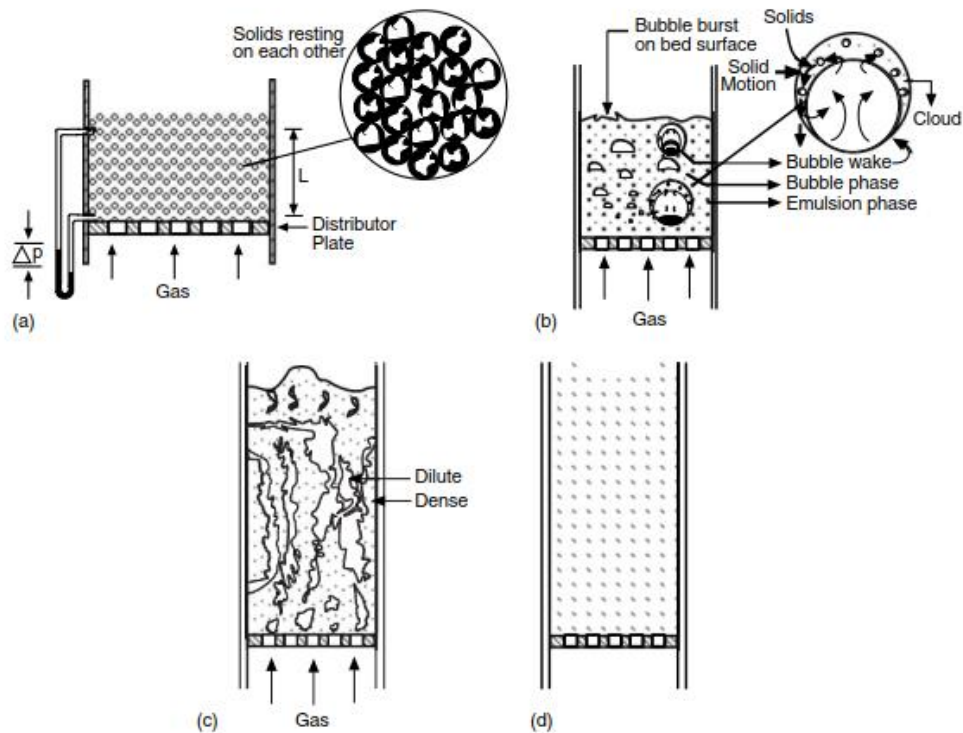
Karkeat kiintoainepartikkelit nousevat leijupedin pinnasta kaasukuplien purskahtaessa, mutta putoavat takaisin leijupetiin. Tätä leijupedin aluetta kutsutaan roiskealueeksi (splash zone). Irtautumiskorkeuden määrittäminen on tärkeää laitteiston suunnittelussa, jotta liiallinen kiintoaineen kulkeutuminen pois leijupedistä saadaan estettyä laite valinnoilla. [10.]



Kuva 6. Kuplat nousevat pedin pinnalle ja purskahtavat sekä samalla sinkauttavat kiintoainepartikkeleita leijupedistä. Kiintoainepitoisuus laskee korkeuden kasvaessa leijupedin pinnasta, mutta pysyy lähes vakiona irtautumiskorkeuden jälkeen [6, s.26.]

### 2.3 Leijupedit

Leijupedit luokitellaan kiintoainepartikkelien käyttäytymisen perusteella eri luokkiin. Kaasun virtausnopeuden kasvattamisella on merkittävin vaikutus leijupedin käyttäytymiseen. Esimerkiksi alhaisilla virtausnopeuksilla kiintoainepartikkelit pysyvät paikoillaan, mutta suurilla kaasun virtausnopeuksilla kiintoaine kulkeutuu kaasun mukana laitteistosta pois. Kaasun virtausnopeutta muuttamalla kiintoainepartikkelit siirtyvät eri leijutusalueille. Leijutusalueet kuvastavat leijupedin kiintoainepartikkelipitoisuutta leijupedin korkeuden suhteen. [6, s.21.]



Kuva 7. Yleisimmät leijutusalueet on havainnollistettu kuvassa. Kohta (a) kuvastaa kiintoainepetiä, jonka läpi virtaa leijutuskaasua. Kohta (b) kuvaa kuplivaa fluidisaatiota ja kaasukiertoa kuplan muodostumista leijupedin pinnalla. Kohta (c) kuvastaa turbulenttista fluidisaatiota ja (d) pneumaattista kuljettamista [6, s.23.]

### 2.3.1 Tasainen fluidisaatio

Geldartin A luokkaan kuuluvien hienojakoisten kiintoaineiden leijupedeissä kaasun virtausnopeuden nosto minimileijutusnopeuden jälkeen saa pedin laajenemaan, mutta leijupetiin ei muodostu kuplia. Leijupedeissä, joissa leijutetaan Geldartin B- ja D- luokan isompi kokoisia partikkeleita, leijupeti alkaa kuplia lähes välittömästi, kun minimileijutusnopeus on saavutettu. Leijupetiä, jossa kuplia ei muodostu, kutsutaan tasaiseksi tai homogeeniseksi leijupediksi. [8, s.1007.]

### 2.3.2 Kupliva fluidisaatio

Kaasun virtausnopeuden noustua yli minimileijutusnopeuden, leijupetiin alkaa muodostua kuplia ja kaasun kanavoitumista. Toisin sanoen, minimileijutusnopeutta vastaavan kaasumäärän ylittävä osa läpäisee leijupedin kuplina. Nousevat kuplat sekoittavat leijupetiä tehokkaasti, mutta koska kuplat nousevat pedissä nopeammin, kuin tasaisesti

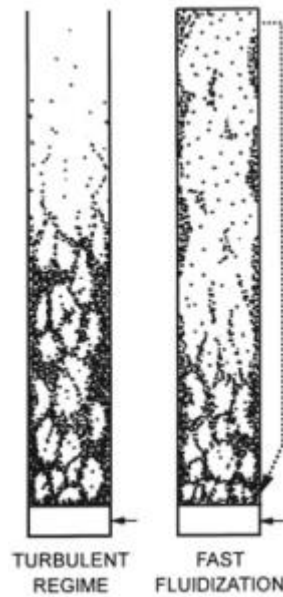
jakaantunut kaasu, kaasun kontakti petimateriaalin kanssa vähenee, heikentäen esimerkiksi reaktorin tehokkuutta. Kapeissa laitteistoissa kuplat kanavoituvat patjan keskiosaan, jolloin kiintoaine nousee kaasun mukana keskeltä ylös ja virtaa laitteiston reunoja pitkin alas. Kuplitetun pedin rajapinta on kuitenkin selkeästi erotettavissa ja kiintoainepitoisuus putoaa nopeasti leijupedin rajapinnan jälkeen. [8, s.1007; 4.]

Muutokset leijupedin kuplimisessa vaikuttavat partikkelien liikkumiseen ja näkyvät sekoittumisen sekä lämmönsiirron tehokkuudessa. Leijutuslaitteiston kaasunjaolla on suuri vaikutus kuplien muodostumiseen ja käyttäytymiseen. [8, s.1007; 4.]

### 2.3.3 Turbulenttinen ja nopea fluidisaatio

Kun kaasun virtausnopeutta edelleen nostetaan kuplivassa pedissä, kiintoainepartikkeleihin kohdistuva voima kasvaa suuremmaksi kuin partikkelien paino, jolloin partikkelit alkavat nousta voimakkaasti leijutuskaasun mukana ylöspäin. Turbulenttisessä fluidisaatiossa leijupedillä ei ole selkeää rajapintaa eikä kuplia ole enää havaittavissa. Turbulenttista fluidisaatioaluetta pidetäänkin siirtymäalueena kuplivasta fluidisaatiosta pneumaattiseen kuljettamiseen. [9, s.11; 8, s.1008.]

Nopea fluidisaatio on erittäin lähellä turbulenttista fluidisaatiota. Merkittävin ero on, että nopeassa fluidisaatiossa kaasun virtausnopeus on sen verran suuri, että se käytännössä tempaisee mukaansa kaikki kiintoaineet reaktorista, joten reaktorista poistuvaa kiintoainetta on lisättävä jatkuvasti lähelle reaktorin alaosaan. [8, s.1009.]



Kuva 8. Turbulenttisen ja nopean fluidisaation havainnekuvat. Selkeää leijupedin rajapintaa ei ole havaittavissa, eikä varsinaisesti kuplintaakaan. Nopeassa fluidisaatiossa kiintoainetta poistuu reaktorista ja poistuvaa kiintoainetta on korvattava uudella kiintoaineella. [8, s.1007.]

#### 2.3.4 Pneumaattinen kuljettaminen

Pneumaattisessa kuljetuksessa leijutuskaasun virtausnopeus on sen verran suuri, että kiintoainepartikkelit eivät pysy leijupedissä, vaan kulkeutuvat kaasuvirran mukana eteenpäin. Tyypillisesti pneumaattisessa kuljettamisessa kiintoainepartikkelit ovat pieniä ja määrä on vähäinen. [9, s.11; 8, s.1008.]

Pneumaattisessa kuljettamisessa kiintoainepitoisuus reaktorin korkeuden funktiona on lähes vakio ja partikkelien viipymäaika reaktorissa on lyhyt, koska ne nousevat vain ylöspäin. [9, s.11; 8, s.1008.]

### 2.4 Leijutuksen ongelmia

#### 2.4.1 Slugging-ilmiö

Leijutuksessa kaasukuplat voivat yhdistyä noustessaan reaktorissa ylöspäin ja lopulta täyttää koko reaktorin leveyden, jolloin puhutaan slugging-ilmiöstä. Kaasukuplan nostamat kiintoaineliuskat nousevat nopeasti ylöspäin, kunnes hajoavat ja kiintoaine va-

joaa alas. Tämän jälkeen uusi kiintoaineliiska muodostuu ja tämä epätasainen liike toistuu. Ilmiö, joka johtaa epätasaiseen lämpötilan jakaumaan reaktorissa ja rasittaa laitteistoja mekaanisesti, on erittäin ei-toivottu. Slugging-ilmiötä esiintyy tyypillisesti kapeissa leijupedeissä. [8, s.1009; 4.]

#### 2.4.2 Kanavoituminen

Kun kaasu on jakautunut epätasaisesti, mutta noudattaa toivottua virtauslinjaa pedin läpi, on leijupeti tällöin kanavoitunut. Ilmiö on erittäin ei-toivottu leijutuksessa, sillä se vähentää kiintoaineen ja kaasun kontaktia sekä vähentää kaasun viipymäaikaa reaktorissa. Kanavoituminen aiheuttaa slugging-ilmiön tavoin epätasaista lämpötilan jakaumaa ja pahimmillaan kuumia pisteitä (hot spot) laitteistossa, jossa kiintoaine ei ole kunnolla fluidisoitunut. Kanavoituminen reaktorissa johtuu useimmiten fluidin (kaasun/nesteen) epätasaisesta jakautumisesta reaktoriin. Kanavoituminen on kumuloituva ilmiö, eli kun leijupetiin muodostuu yksi virtauskanava, siitä virtaa yhä enemmän kaasua ja lopulta koko pedin leijutus voidaan menettää. [8, s.1009; 4.]

#### 2.5 Hydrostaattinen paine ja leijutetun katalyyttipetin pinnanmittaus

Nestepatsaan aiheuttama paine eli hydrostaattinen paine on riippuvainen nestepatsaan korkeudesta. Mitä syvemältä paine mitataan, sitä suurempi vesipatsas on mittauksen yläpuolella ja sitä suuremman paineen nestepatsas luo. Tiheydeltään raskaammalla nesteellä, paine kasvaa nopeammin syvyyden suhteen. Paine on ainoastaan riippuvainen nestepatsaan korkeudesta ja nesteen tiheydestä, ei nesteen määrästä tai nestesäiliön muodosta. Hydrostaattisen paine noudattaa alla olevaa kaavaa [11, s.327.]

$$p = \rho * g * h + p_0 \quad (11)$$

jossa  $p$  on hydrostaattinen paine [Pa]

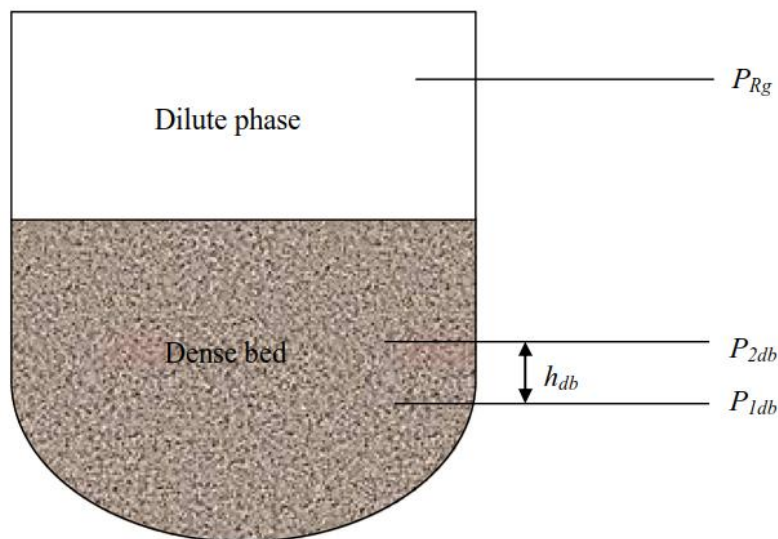
$p_0$  on nestepintaan kohdistuva ulkoinen paine [Pa]

$\rho$  on nesteen tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$  on putoamiskiikkyvyys [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ]

$h$  on nestepatsaan korkeus [m].

Prosessiteollisuudessa leijutetun katalyytin pinnankorkeus mitataan tyypillisesti paine-eroon perustavilla pinnanmittauksilla, jossa paine-ero muutetaan nestepatsaan korkeudeksi. Pinnan korkeuden laskemiseksi leijupetireaktorissa tulee ensin määrittää katalyyttipedin keskimääräinen tiheys. Tiheys tulee laskea tiheästä pedistä (dense phase) [12.]



Kuva 9. Havainnekuva katalyyttipedin pinnanmittauksesta. Katalyyttipedin tiheys tulee laskea pedin tiheästä osasta (dense phase) [12.]

$$\rho_{db} = \frac{P_{2db} - P_{1db}}{g \cdot h_{db}} \quad (12)$$

jossa  $\rho_{db}$  on katalyyttipedin tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$P_{2db}$  on katalyyttipedin pinnanmittauksen ylemmän paineyhteen paine [Pa]

$P_{1db}$  on katalyyttipedin pinnanmittauksen alemman paineyhteen paine [Pa]

$h_{db}$  on pinnanmittausyhteiden välinen korkeusero [m]

$g$  on putoamiskihtiävyys [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ]

Kun katalyyttipedin keskimääräinen tiheys on saatu laskettua, voidaan katalyyttipedin korkeus lopulta laskea. Katalyyttipetiin kohdistuva ulkoinen paine tulisi mitata katalyyttipedin yläpuolelta (lean phase). [12.]

Pinnankorkeus lasketaan alla olevalla kaavalla:

$$h_{db} = \frac{P_{Rg} - P_{1db}}{g * \rho_{db}} \quad (13)$$

jossa  $h_{db}$  on katalyyttipinnan korkeus [m]

$P_{Rg}$  on nestepintaan kohdistuva ulkoinen paine [Pa]

$P_{1db}$  on katalyyttipedin pinnanmittauksen alemman paineyhteen paine [Pa]

$\rho_{db}$  on katalyyttipedin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  on putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s<sup>2</sup>]

Katalyyttipedin korkeus tyypillisesti ilmaistaan prosentteina (0–100 %) mittausyhteiden korkeuseron suhteen, jossa 0 % on alimman pinnanmittaus yhteen korkeusasema ja 100 % ylemmän pinnanmittauksen korkeusasema.

### 3 Leijukatalyyttinen krakkaus (FCC)

Leijukatalyyttisiä krakkausyksiköitä (FCC, Fluid Catalytic Cracking) pidetään öljyjaloitamoitten yhtenä tärkeimpänä konversioprosessina ja se on eniten käytetty prosessi raskaiden öljyjen muuttamiseksi kevyemmiksi ja samalla arvokkaimmiksi tuotteiksi. FCC-yksikkö koostuu reaktori- ja tislauksosasta. [13.]

Öljyteollisuustekniikka lisensoivat yhtiöt ovat kehittäneet useita hieman toisistaan poikkeavia FCC-yksiköitä. Vaikka lisensoijien FCC-yksiköiden konfiguraatiot hieman poikkeavat toisistaan, kaikilla yksiköillä on kuitenkin sama perusidea. Porvoon öljynjalostamolla oleva leijukatalyyttinen krakkaus -yksikkö on alun perin Texacon lisensoima. [13.]

Seuraava prosessin yleiskuvaus koskee Nesteen Porvoon öljynjalostamon FCC-yksikköä.

#### 3.1 Prosessin yleiskuvaus

FCC-yksikön sydämenä pidetään reaktoriosaa, joka käsittää riserin eli nousuputken, reaktorin ja regeneraattorin. Prosessissa erittäin hienojakoinen katalyytti kiertää jatkuvasti riseristä reaktoriin, reaktorista regeneraattoriin, ja lopulta takaisin riserille. Katalyytti pidetään kiertoliikkeessä leijutuksen avulla. [3.]

Regeneraattorissa leijuva katalyytti siirtyy painovoimalla riserin alaosaan, johon sumutetaan myös FCC-yksikön esilämmitetty öljysyöttö sekä hajotushöyry. Riserissa hiilivetyisyöttö pääsee kosketuksiin regeneraattorista tulevan kuumen (noin 670–700 °C) regeneroidun katalyytin kanssa, jolloin kuuma katalyytti höyrystää hiilivetyisyötön ja samalla jäähdyttää katalyyttiä. Riserin alaosaan ajetaan hajotushöyryä leijutuksen ja aineensiirron tehostamiseksi. Öljysyöttö krakkautuu riserissa katalyytin sekä korkean lämpötilan (noin 545–560 °C) vaikutuksesta ja kuljettaa katalyyttiä nousuputkea pitkin reaktoriin. FCC-yksikössä krakkausreaktiot tapahtuvat pääasiassa nousuputkessa eli se on varsinaisesti yksikön reaktori. [14, s.76; 13.]

Riseristä poistuva reaktioseos yhdessä katalyytin kanssa johdetaan reaktoriin sisällä oleviin sykloneihin, joissa kaasumaisesta reaktioseoksesta erotetaan kiinteä katalyytti. Kaa-



sumainen hiilivety-reaktioseos poistuu reaktorin ylimenolinjan kautta FCC-yksikön tislaukseen tuotejakeiden erottamista varten. Sykloneissa erotettu katalyytti putoaa alas reaktorin strippausosaan. Reaktorin strippausosassa katalyyttiä leijutetaan höyryllä ja samalla pyritään erottamaan kevyet hiilivedyt katalyytin huokosista. Näin parannetaan FCC-yksikön tuotesaantoja ja vähennetään turhaa hiilivetyjen polttamista regeneraattorissa koksien polton yhteydessä. Nimestään huolimatta, FCC-yksikön reaktorissa ei varsinaisesti enää tapahdu krakkausreaktioita. Operointipaine reaktorissa on noin 170 kPa(g). [14, s.76; 13.]

Reaktorin strippausosasta katalyytti valuu laskuputkea (standpipe) pitkin regeneraattoriin. Katalyyttipartikkelien pintaan riserissa muodostunut koksi poltetaan regeneraattorissa polttoilman avulla, jotta katalyytin aktiivisuus saataisiin palautettua entiselle tasolle. Regeneroinnissa koksien poltto vapauttaa huomattavan määrän lämpöenergiaa, jolloin katalyytin lämpötila on noin 670–700 °C. Regeneraattorissa katalyytti leijutetaan polttoilmavirtauksen avulla. Regenerointiin tarvittava polttoilma komprimoidaan FCC-yksikön suurilla ilmakompressoreilla. Regeneroitu leijuva katalyytti valuu katalyyttihopperin kautta laskuputkea pitkin riserin alaosaan, missä se kohtaa taas hiilivetytyötön ja katalyytti aloittaa uuden kierron reaktoriosassa. Regeneraattorin operointipaine on noin 180 kPa(g). [3.]

Regeneraattorin yläosassa on sykloneja hienon katalyyttipölyn erottamiseksi savukaasuista. Pölynpoistosityklonien avulla hienojakoinen katalyyttipöly kerätään talteen, jotta hienot katalyyttipartikkelit eivät päädy savukaasujen mukana ulkoilmaan. Pölynpoiston jälkeen savukaasut johdetaan lämmöntalteenottokattilaan, jossa savukaasujen sisältämällä lämpöenergialla kehitetään tulistettu korkeapaineista höyryä jalostamon höyryverkon tarpeisiin. [3.]

### 3.2 Katalyytti

Katalyytit ovat aineita jotka lisäävät reaktionopeutta, mutta eivät periaatteessa kulu itse reaktiossa.

FCC-yksikössä käytettävä katalyytti on erittäin hienojakoista kiintoainetta, jonka pääaineita ovat zeoliitti (piitä ja alumiinioksidia), sidosaine (alumiinioksidi) ja täyteaine (sa-

vea). Zeoliitillä on suurin vaikutus reaktorituotteiden selektiivisyyteen ja katalyytin aktiivisuuteen. Yksikössä käytettävän katalyytin suorituskyky on riippuvainen katalyytin rakenteesta, tyypistä ja krakkausmekanismista. Markkinoilla on useita erilaisia katalyytteja FCC-yksiköihin, ja sopivan katalyytin valinnassa pyritään valitsemaan jalostamolle "oikea" vaihtoehto, jolla saavutetaan toivottu tuotejakauma. [15, s.79.]

FCC-yksikön katalyytin aktiivisuus laskee syötön sisältämien metallien aiheuttamasta kontaminaatiosta, höyryn ja lämmön (regeneraattori) sekä mekaanisen kulumisen vaikutuksesta. Yksiköstä myös poistuu tuotteiden ja savukaasujen mukana pieniä määriä hienojakoista katalyyttiä. Aktiivisuutta ja katalyytti-inventaaria tulee pitää yllä ajoittaisilla tuorekatalyyttilisäyksillä, muuten seurauksena voi olla yksikön konversion lasku ja yksikön tuotejakauman muuttuminen raskaampaan suuntaan. [13.]

FCC-katalyytin keskimääräinen partikkelikoko on 60–100  $\mu\text{m}$  ja bulkkitiheys (apparent bulk density, ABD) 750–900  $\text{kg}/\text{m}^3$ . FCC-yksikön katalyytti luokitellaan ominaisuuksiensa takia Geldartin A-luokan kiintoaineeksi. [16.]

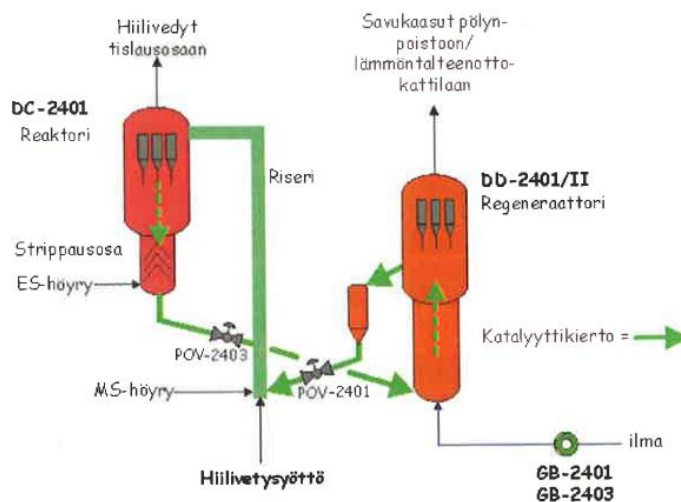
#### **4 Leijutus FCC-yksikössä**

FCC-yksiköissä on tunnistettavissa lähes kaikki tyypillisimmät leijutusalueet. FCC reaktorin strippausosassa katalyyttipeti luokitellaan kuplivaksi fluidisaatioksi. Regeneraattorissa polttoilman virtausnopeudet ovat suuria, joten useimmissa regeneraattoreissa leijupeti on turbulenttinen. Laskuputkissa leijutuskaasun virtausnopeudet ovat minimileijutusnopeuden ja minimikuplintaanopeuden välillä, joten ideaalisessa tilanteessa laskuputkien leijupeti tulisi olla tasaisen fluidisaation alueella. Riserissa katalyytin katsotaan toimivan nopean fluidisaation alueella [17, s.201.]. Yksikössä leijutuskaasuna käytetään joko polttoilmaa tai höyryä riippuen siitä mistä prosessin osasta on kyse.

Minimileijutusnopeus [ $U_{mf}$ ] FCC-yksiköissä on tyypillisesti alhainen, luokkaa 0,03–0,06  $\text{m}/\text{s}$ . Minimi kuplimisnopeus, jossa katalyyttipetiin alkaa muodostua kuplia, on noin 2,5–3,5 kertaa korkeampi kuin minimileijutusnopeus. Leijupeti muuttuu turbulenttiseksi, kun kaasun virtausnopeus on noin 100–200 kertaa korkeampi kuin minimileijutusnopeus. [17, s.201.]

#### 4.1 Katalyyttikierto

FCC-yksikössä leijuva katalyytti on kokoajan liikkeessä, toisin kuin kiintopetireaktorissa (fixed bed). FCC-yksikössä katalyyttikierron määrää säädetään automaatiojärjestelmästä kauko-ohjattavilla luistiventtiileillä (POV). Porvoon jalostamon FCC-yksikön katalyyttikiertoa säädetään regeneraattorista riseriin POV-2401:llä ja reaktorista regeneraattorin POV-2403:lla. Reaktoriosassa leijutuskaasuna käytetään höyryä ja regenerointiosassa polttoilmaa.



Kuva 10. FCC-katalyyttikierron havainnekuva. Katalyytin virtaussuunta on merkitty kuvaan vihreällä nuolella. [3.]

Katalyyttikierron toiminta on FCC-yksikön kannalta erittäin tärkeässä osassa. Katalyyttikierron ongelmien tunnistaminen vaatii hyvää ymmärrystä reaktori- ja regeneraattoriosan paineprofiilista sekä muuttujista, jotka vaikuttavat katalyytin leijutukseen. Kierron toimintaan vaikuttavat yksikön laitteiden fyysinen sijoittelu sekä katalyytin leijumisominaisuudet, kuten katalyytin partikkelikoko. [15, s.229.].

FCC-yksikössä eräs tärkeimmistä operointimuuttujista on katalyytti-öljysuhde (catalyst-to-oil ratio). Suhdeluvussa verrataan katalyyttikierron määrää yksikön tuoresyötön määrään. Katalyytti-öljysuhteeseen vaikutetaan muuttamalla riippumattomia operointimuuttujia poikkeuksena tuoresyötön määrä. Yleisesti ottaen, mitä suurempi katalyytti-öljysuhde, sitä suurempi konversio saavutetaan yksikössä. Tästä syystä katalyyttikierron

maksimoinnilla sekä katalyyttikierron tasaisella toiminnalla on mahdollista saavuttaa huomattavia taloudellisia hyötyjä. [13.]

Epätasainen katalyyttikierto on yksi FCC-yksikön tyypillisimmistä ongelmista. Epätasaista katalyyttikiertoa esiintyy, kun katalyytti ei luo tasaista ja yhtenäistä painetta koko laskuputken matkalla. Tällöin katalyytillä on taipumusta pakkaantua laskuputkeen aiheuttaen seuraavan tapaisia oireita: [15. s.234]

- laskuputkien merkittävää tärinää tai heilumista
- laskuputkien ääntelyä
- nopea painetason muutos luistiventtiilin yläpuolella
- paine-eron heiluntaa luistiventtiilien yli
- epätasaista reaktorin lämpötilan- ja/tai pinnansäätöä
- paineheilautelua regeneraattorilla

Useampi tekijä myötävaikuttaa epätasaiseen katalyyttikiertoon, mutta mahdollisia häiriötekijöitä ovat:

- tuntematon kappale (mahdollisesti irronnut laitteiston osa) toimii virtausvastuksena laskuputkessa
- epätasainen leijutus: liikaa tai liian vähän leijutusilmaa tai -höyryä
- tasapainokatalyytin (equilibrium catalyst) hienojakoisen katalyyttijakeen puute. Katalyytin fysikaalisten ominaisuuksien muutokset voivat johtua ongelmista esimerkiksi sykloneissa.

Kirjallisuudessa julkaistuissa FCC-yksikön vianetsintäkaavioista epätasaisen katalyyttikierron vian etsinnässä tulisi ensisijaisesti toimia seuraavasti:

- tarkistaa, että leijutuskaasua ei ajeta liian paljoa eikä liian vähän. Myös mittauksien pursotukset on tarkastettava
- tarkistaa, onko tuorekatalyytin ominaisuuksissa tapahtunut muutosta
- tarkistaa, onko laskuputkiin ja katalyyttihopperiin tehty tai tapahtunut rakenteellisia muutoksia
- tarkistaa regeneraattorin tasapainokatalyytin hienojakoisuus ja partikkelijaukauma. [15, s.234.]

#### 4.2 Katalyyttihopperi

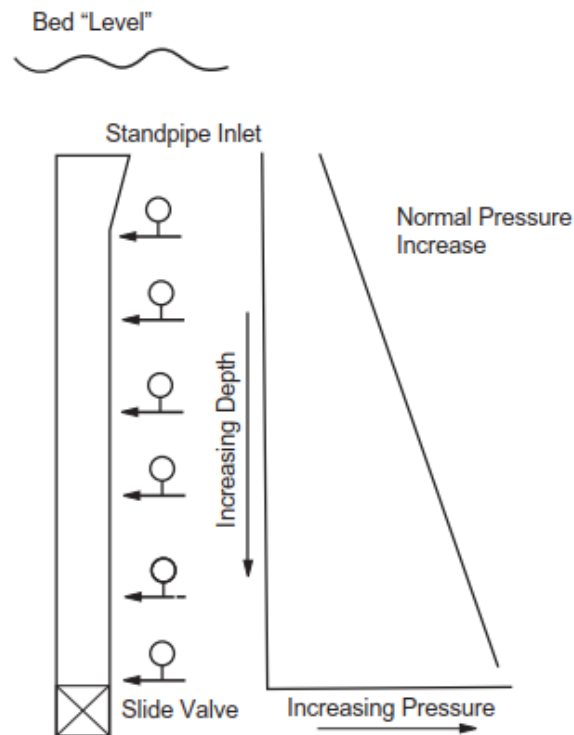
Regeneraattorin ja pystyputken (riser) välissä sijaitsee hopperi (catalyst hopper), jossa katalyytin tiheyttä voidaan säätää sopivaksi laskuputkea varten regeneraattorin olosuhteista riippumatta. Mitä korkeampi hopperissa oleva katalyytin tiheys on, sitä suurempi on laskuputkeen muodostuva paine. [15, s.166.]. Katalyytin tiheys hopperissa säädetään alueelle 320–500 kg/m<sup>3</sup> [13.].

#### 4.3 Katalyytin laskuputket

Periaatteessa FCC-yksikön laskuputkien (standpipe) paineen oletetaan käyttäytyvän lineaarisesti, koska sitä suurempi hydrostaattinen paine on, mitä alemmaa laskuputkesta painemittaus suoritetaan. Missä tahansa korkeudessa mitattu paine laskuputkessa tulisi olla karkeasti verrannollinen putkessa virtaavan leijutetun katalyytin tiheyteen. Katalyytin tiheys tulisi pitää laskuputkessa noin tasolla 560–720 kg/m<sup>3</sup>. [15, s.171.]

Laskuputkiin ajetaan leijutuskaasua, jotta putkissa kulkeva katalyytti pysyy leijutetussa tilassa. Liiallinen leijutuskaasun ajaminen voi saada ei toivotusti katalyyttipedin kupli-  
maan laskuputkissa. Katalyytin tulee virrata laskuputkissa kuplien ohi, jolloin kuplat toimivat ikään kuin virtausvastuksena rajoittaen katalyyttikierron määrää. Laskuputkien toimintaa ja leijutuskaasujen määrien oikeellisuutta on hyvä arvioida mittaamalla laskuputkien paineprofiili. [18.]

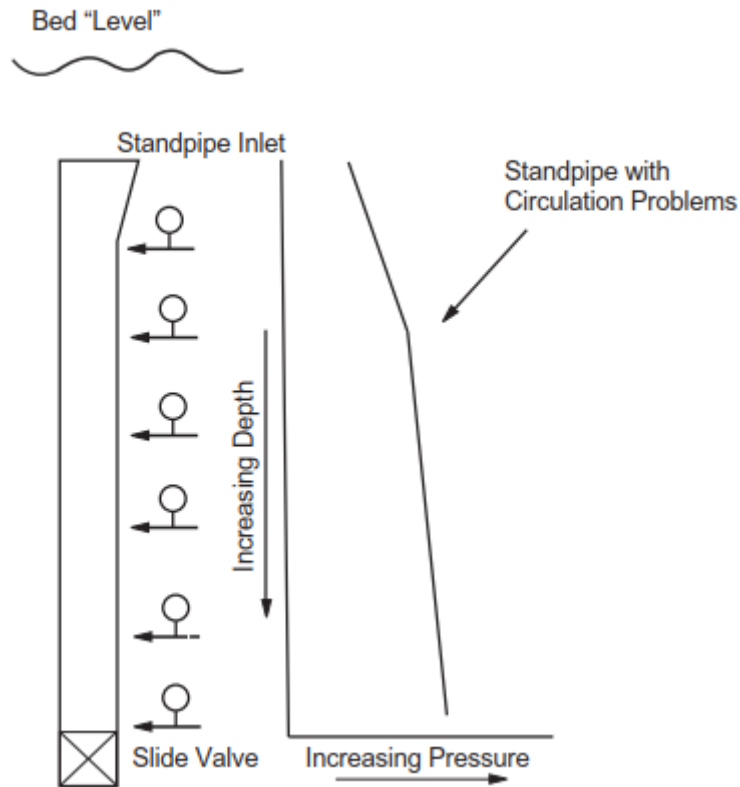
Kuvassa 11 on esitetty, miltä paineprofiili tulisi laskuputkessa ideaaltilanteessa näyttää. Kuvasta 11 voidaan havaita, että paine kasvaa lineaarisesti mitä alhaisemmalta tasolta tai syvemmältä paine laskuputkesta mitataan. [19.]



Kuva 11. Ideaalinen paineprofiili laskuputkessa. Paineen tulisi kasvaa lineaarisesti [18.]

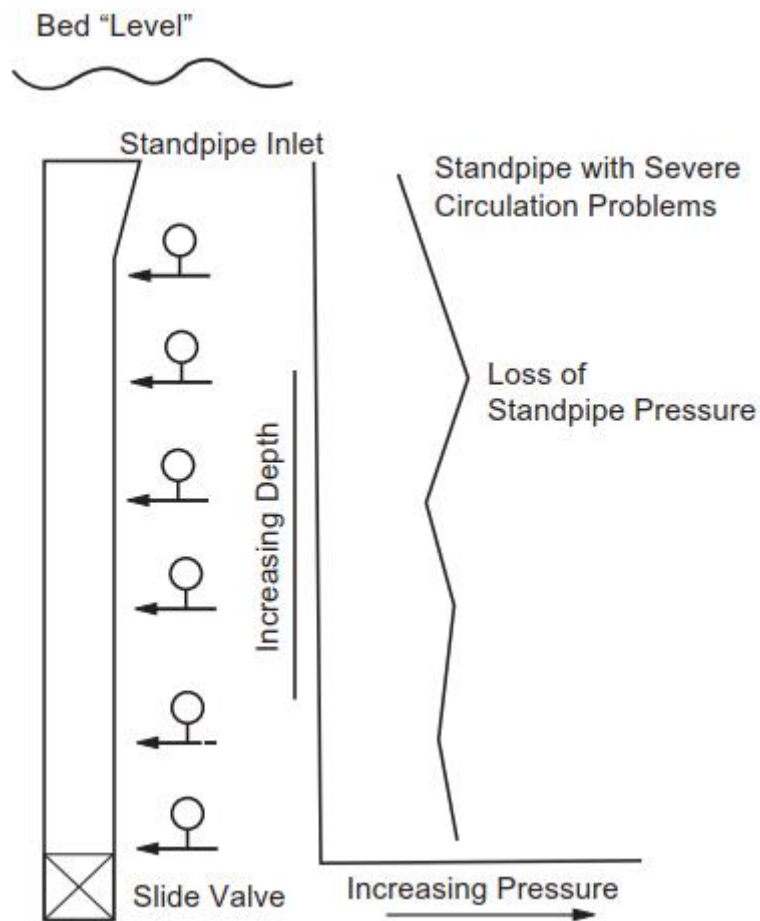
Mikäli katalyytin leijutus laskuputkessa menetetään, katalyytti voi alkaa kantamaan osan omasta painostaan laskuputken seinämiä vasten. Tämä on havaittavissa paineenlaskuna ja epälineaarisenä paineen nousuna laskuputkessa (ks. kuva 12).

Kuvassa 12 on havaittavissa, että laskuputkessa esiintyy lievää katalyyttikierron ongelmaa. Aluksi paine kasvaa lineaarisesti, mutta toisen painemittauspisteen jälkeen paine laskuputkessa ei enää kasva toivotulla tavalla.



Kuva 12. Laskuputken paineprofiili jossa on havaittavissa katalyyttikierron ongelmia. [18.]

Kuvassa 13 on esitetty, miltä vakava katalyyttikierron ongelma näyttää laskuputken paineprofiilissa. Kuvassa 13 paine laskee toisen mittauspisteen jälkeen, eikä paine laskuputkessa enää kasva alaspäin tultaessa.



Kuva 13. Laskuputken paineprofiili, jossa on havaittavissa vakavia katalyyttikierron ongelmia. [18.]

Kuvat 12 ja 13 viittaavat, että katalyyttikierto laskuputkissa on mahdollisesti häiriintynyt ylimääräisestä virtausvastuksesta (vuorauksen kappale irronnut tai jokin muu laitteiston osa pettänyt) tai katalyytti ei leiju kunnolla koko laskuputken matkalla. On myös mahdollista, että katalyytti kuplii laskuputkessa, toimien virtausvastuksen tavoin. [19.]

Jos laskuputkissa ei saada luotua riittävää painetta, ei saada myöskään luotua riittävää paine-eroa luistiventtiilien yli, lopulta rajoittaen koko FCC-yksikön katalyyttikierron määrää. Epätasainen paineprofiili laskuputkessa aiheuttaa katalyyttikierron virtauksien heilumista, joka vaikeuttaa yksikön operointia huomattavasti.

Laskuputken (regenerated catalyst standpipe) korkeus antaa ajavan voiman, paine-eron, katalyytin siirtoon regeneraattorista reaktoriosaan. Paineen saa aikaan laskuputken lähdön ja luistiventtiilin välinen korkeusero. [15, s.166.]



Reaktorin strippausosasta käytetty katalyytti virtaa käytetyn katalyytin laskuputkeen (spent catalyst standpipe). Ajoittain katalyytti leijuu vain osittain stripperin pohjakartiossa. Tästä syystä kartio-osaan ajetaan höyryä katalyytin leijumisen parantamiseksi ennen, kuin se virtaa laskuputkeen. Leijutuksen menetys stripperin pohjakartiossa voi aiheuttaa tiheän faasin kertymän kartion seinämille. Tämä katalyyttikertymä voi rajoittaa katalyytinvirtausta aiheuttaen epätasaisuutta yksikön katalyyttikierrrossa ja vähentäen painetta laskuputkessa. [15, s.166.]

#### 4.4 Regeneroidun katalyytin luistiventtiili POV-2401

Regenerointiosan luistiventtiilillä (regenerated catalyst slide valve) on kolme tehtävää: säätää regeneroidun katalyytin määrää riserille, pitää yllä paine-eroa palautusputken ja riserin välillä sekä suojaa regeneraattoria takaperin virtaukselta riserilta. Tyypillinen paine-ero venttiilin yli tulisi olla 13–55 kPa ja venttiilin asento 25–60 %. [15, s.166, s.229.]

Luistiventtiilien aiheuttamat rajoitteet johtuvat usein huonosti säädetyistä laskuputkien leijutuskaasumääristä. Epäoptimaalinen leijutuskaasun määrä voi vähentää ja heiluttaa paine-eroa luistiventtiilin yli. [18.]

#### 4.5 Nousuputki tai riseri

Kuuma regeneroitu katalyytti kulkeutuu pystysuoraa nousuputkea (riser) pitkin reaktoriin ja strippausosaan. Katalyytin ja höyryn kulkeutumiseen vaadittava voima saadaan korkeapaineisella höyryllä sekä suurella katalyytin ja krakkautuneen öljyhöyryseoksen tiheyserolla. Yksikön paineprofiilin kannalta, katalyytin kulkeutuminen riserissa aiheutuu tyypillisesti noin 34–62 kPa:n painehäviön. Tämä painehäviö johtuu suurimmissa määrin katalyytin aiheuttamasta staattisesta paineesta. Operointimuutokset, kuten suurempi katalyyttikierto tai pienempi hajoitushöyryn virtausnopeus, tai muut toimenpiteet, jotka vaikuttavat reaktioseokseen, voivat lisätä painehäviötä ja täten vaikuttaa POV-venttiilin (POV-2401) paine-eroon ja venttiiliasentoon. [15, s.167.]

#### 4.6 Reaktori ja strippausosa

Normaali katalyyttipinta reaktorissa (reactor) on strippausosan (stripper) ylälaidassa ja ensimmäisen vaiheen syklonien laskuputkien alapuolella. Reaktorin strippausosan pinnansäätö ohjaa luistiventtiiliä POV-2403, jonka kautta käytetty katalyytti virtaa reaktorista regeneraattoriin. [13.]

Reaktorissa ja strippausosassa katalyyttipintaa säädetään, jotta katalyytillä on riittävä viipymäaika tarpeeksi tehokkaalle hiilivetyjen strippaukselle ennen katalyytin kulkeutumista regeneraattoriin. Lisäksi varmistetaan riittävä staattinen paine käytetyn katalyytin sujuvalle kulkeutumiselle regenerointiosaan sekä riittävä vastepaine, jolla estetään kuumien savukaasujen kulkeutuminen takaperin regeneraattorilta reaktoriosaan. [15, s.167.]

#### 4.7 Käytetyn katalyytin luistiventtiili POV-2403

Käytetyn katalyytin luistiventtiin (spent catalyst slide valve) tehtävänä on säätää stripperin katalyyttipintaa sekä käytetyn katalyytin virtausta regeneraattorille. Tyypillisesti paine-ero venttiin yli FCC-yksiköissä on 21–41 kPa. [15, s.166.]

POV-venttiilien aiheuttamat rajoitteet johtuvat usein huonosti säädetystä laskuputkien leijutuskaasumääristä. Epäoptimaalinen leijutuskaasun määrä voi vähentää ja heiluttaa paine-eroa POV-venttiin yli. [18.]

## 5 Paineprofiilin mittaus

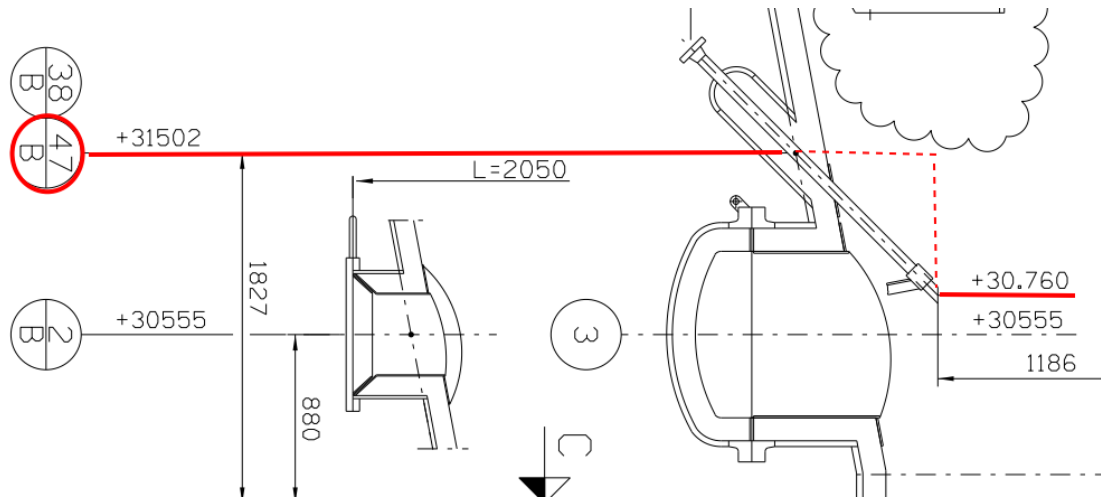
Paineprofiili käsittelee hydraulikkaa reaktori- regeneraattori- ja riseri-osan katalyyttikierrrossa. Paineprofiilin mittaaminen (single gauge pressure survey) suoritetaan mittaamalla paine katalyyttikierron eri pisteistä yhdellä kalibroidulla painemittarilla. Paineprofiili tulisi mitata yksiköstä säännöllisesti normaalioperoinnin aikana referenssitason määrittämistä varten. Kun yksikön referenssitaso ja "normaali" vaihteluväli painetasoissa on selvillä, ongelman ratkaisu helpottuu huomattavasti. Paineprofiilin mittaus olisi suositeltavaa myös häiriötilanteissa, mutta käytännössä kuitenkin painemittauksien suorittaminen siinä tilanteessa on haastavaa siihen kuuluvien resurssien takia ja, koska leijutukseen liittyvät häiriöilmiöt voivat olla hyvinkin nopeita.

Katalyyttikierron paineprofiilin mittaamisen tavoitteena on varmistaa tasainen katalyyttikierto, havaita mahdolliset ongelmakohdat, maksimoida katalyyttikierto ja paine-ero POV-venttiilien yli sekä minimoida FCC-yksikön ilma- ja märkäkaasukompressorin kuormat.

Paine- sekä pinnanmittauksien ja laitteiston rakennekuvien korkeusasemien perusteella pystytään laskemalla arvioimaan painetasot sekä tiheydet reaktori-regeneraattori-riseri-osassa ja täten arvioimaan yksikön toimintaa.

Paineprofiilin mittaamisessa käytettiin digitaalista Wika CPG1500 -tarkkuuspainemittaria. Painemittarin mittausalue on 0...+4 bar(g) ja mittausresoluutio on 0,01 kPa(g). Valmistaja lupaa mittarille 0,1 % tarkkuuden täydellä mitta-alueella. Painemittari on tarkkuudeltaan lisenssin (CB&I) suosituksen mukainen (riittävä tarkkuus 1 kPa). Painemittari on kalibroitu Nesteen automaatiokunnossapito-osastolla ja valmistaja suosittelee, että mittari olisi kalibroitava kerran vuodessa. Painemittari jouduttiin tilaamaan mittauksen suoritusta varten, koska Nesteellä olleen digitaalisen painemittarin mittausresoluutio ei riittänyt paineprofiilin mittausta varten. Painemittari on asennettavissa jalostamolla tyypillisesti käytettävien paikallisten painemittarien kierteille (G ½ putkikierte).

Paineprofiililaskennoissa käytettävissä mittauksien korkeusasemassa on käytettävä laitteen sisällä olevan sisäputken korkeusasemaa, ei läpiviennin korkeusasemaa. Sisäputken korkeusasemaa on käytettävä, koska tästä pisteestä instrumentti käytännössä mittaa paineen. Instrumenttiyhteiden korkeusasemat on selvitetty laitteiden rakennekuvista.

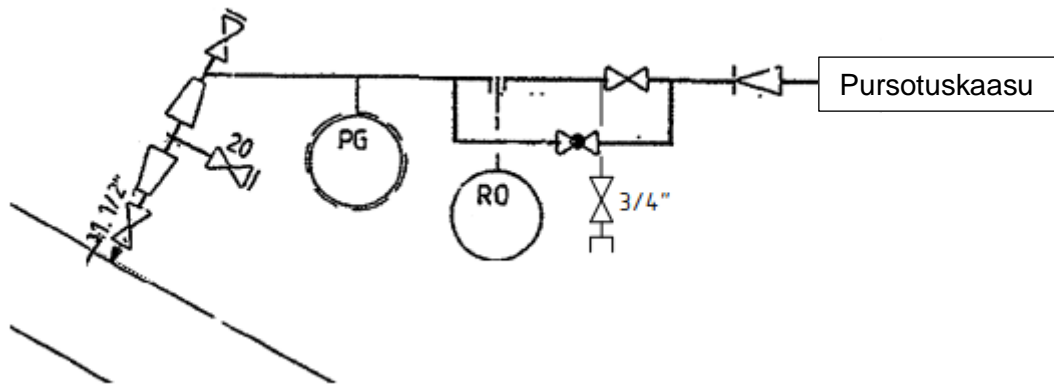


Kuva 14. Kuvassa on esitetty esimerkki mittauspisteiden korosta. Laskennoissa tulee käyttää mittayhteen koron sijaan (47 B, +31502 mm) sisäputken korkeusasemaa laitteen sisällä (+30760 mm), koska tästä pisteestä instrumentti mittaa paineen.

### 5.1 Yleinen ohje mittauksien suorittamiseksi

Lähes kaikissa mittauskohteissa on valmiiksi paikalliset painemittarit. Mittauskierroksella painemittarin tilalle asennetaan digitaalinen painemittaus. Mittaustulos kirjataan ylös mittauspöytäkirjaan (liite 1), jonka jälkeen analoginen paikallinen painemittari asennetaan takaisin kohteeseen.

Mittauskohteet on pursotettu joko ilmalla, poltтокаasulla tai höyryllä katalyytin kulkeutumisen estämiseksi mittausinstrumentteihin tai eristysventtiilien väliin. Painemittari on asennettava pursotuskaasusäätöventtiiliin tai reikälevyn (RO-levy) jälkeiseen linjaan, jotta pursotuskaasun paine ei vaikuta mittaustulokseen. Automaatiotyönjohtajan kanssa käydyssä keskustelussa, hän suositteli sulkemaan pursotuskaasuvirtauksen mittauskohteelle mittauksen ajaksi. Lyhyen pursotuskaasukatkoksen ei tulisi vaarantaa instrumenttien käytettävyyttä. On kuitenkin huomioitava, että mikäli kaasu toimii ilmastuskaasuna ja vaikuttaa katalyytin leijutukseen, kaasuvirtauksia ei saa missään tapauksessa katkaista, koska se saattaa aiheuttaa häiriön yksikön katalyyttikiertoon.



Kuva 15. Mittauskohteen pursotuksen toteutus. Tarkkuuspainemittari asennetaan mittauksen ajaksi PG:n tilalle.

Diplomityössä Leijukatalyytisen krakkauksen kevytkaasun käsittelyn rajoitteet [20, s.35.] todetaan, että reaktoriosaan syötettävä pursotuskaasuna käytettävä polttoaasun mas-savirta on hyvin alhainen, vaikka polttoaasun paine ja moolimassa olisivat korkeat. Tä-ten voidaan todeta, että pursokaasun vaikutus painemittauksien tuloksiin on hyvin vähäi-nen.

Mittauskierros on suositeltavaa suorittaa, kun yksikkö on tasaisessa ajossa ja merkittäviä operointimuutoksia ei olla suorittamassa. Nesteen jalostamon FCC-yksikön viikkotase näytteet haetaan tiistai aamuisin klo 8 ja prosessidata 7.00–8.00. Siksi on suositeltavaa, että myös mittauskierros suoritetaan samoihin aikoihin. Mittauskierros vie kauemmin, kuin yhden tunnin, mutta tasepiste olisi hyvä saada osumaan mittausajanjaksoon.

Osassa mittauskohteita painemittaus voi hetkellisesti vaikuttaa DCS-järjestelmän mit-tauksiin, jotka ovat yhteydessä turva-automaatioon. Esimerkiksi painemittaus PI-2462:lla ja PI-2464:lla voi pahimmassa tapauksessa hetkellisesti heilauttaa paine-eromittausta ja ajaa yksikön tarpeettomasti lukitukseen. Siksi on suositeltavaa, että luistiventtiilien paine-erolukitukset PDIZ-2473 ja PDIZ-2408 ohitetaan mittauksen ajaksi. Kun reaktorilla tehdään mittauksia, on myös pinnansäätö LC-2407 otettava käsiohjaukseen ohjaa-mosta. Tällöin mahdollinen hetkellinen pinnamittaushäiriö ei liikuttaisi käytetyn katalyytin luistiventtiiliä POV-2403:a aiheuttaen turhan prosessin heilahduksen. Käytännössä kui-tenkin painemittausten aiheuttama mittaushäiriö on erittäin epätodennäköistä, sillä mit-tauskierroksessa vaihdetaan vain paikallinen analoginen painemittari digitaaliseen tark-kuusmittariin.

Osa mittausyhteistä voi olla tukkeessa vaikeuttaen painemittausta. Mittauskohteiden pursojen toiminta olisi hyvä varmistaa esimerkiksi vuorokausi ennen mittauskierrosta.

## 5.2 Paine- ja tiheysprofiili

Insinööriyön paine- ja tiheysprofiilin mittauskierron yksikössä kalibroidulla mittarilla suoritettiin FCC-yksikössä 6.3.2018 klo 8.37–12.11. Samaan aikaan yksikössä oli meneillään tasenäytetierros. Mittauskierrosta oli suorittamassa kaksi instrumenttiasentajaa ja insinööriopiskelija Keijo Kovero. Mittauskierron suorittamiseen kului aikaa noin neljä tuntia. Aikaa kului muun muassa mittauskohteiden etsimiseen sekä muutaman mittauskohteen luokse oli rakennettava telineitä, jotta painemittarin vaihto voitiin suorittaa turvallisesti. Lisäksi osa paikallisista painemittareista oli jämähtänyt kiinni kierteille, joten paikallisen painemittarin vaihto digitaaliseen painemittariin vei paljon aikaa osassa kohteissa. Suurella todennäköisyydessä mittauskierron on mahdollista suorittaa jopa kolmeen tuntiin, kun mittauskohteiden sijainti ja kierteet on voideltu helppoa irrotusta varten.

Kun painemittauksia oltiin suorittamassa pinnanmittausyhteiden LI-2431 ja LI-2408 luona, ohjaamo-operaattoria pyydettiin laittamaan pinnansäädin käsiajolle, jotta mittaus ei voisi vaikuttaa vahingossakaan prosessinohjaukseen. Lisäksi paine-erolukituksen PDIZ-2473 ja PDIZ-2408 suojaustoiminnot ohitettiin mittauksien varotoimena. Mittauksien aikana automaatiojärjestelmässä ei kuitenkaan tapahtunut mitään normaalista prosessiheilunnasta poikkeavaa, joten varotoimen tarpeellisuutta on syytä arvioida uudelleen seuraavalla mittauskierroksella. Mittauskierroksella havaittiin, että painemittauksien PG-2423 ja PI-2406 mittauspisteet olivat tukossa ja painetta ei saatu mitattua tarkkuusmittarilla. Mittauspisteiden yhteitä ei saatu avattua painemittausta varten kierroksen aikana. Käytetyn katalyytin laskuputkessa on käyntijakson aikana kuumia pisteitä ja olisi ollut mielenkiintoista nähdä onko laskuputken paine- ja tiheysprofiililla jotain epäilyttävää. Mittausyhteet puhdistetaan ja avataan viimeistään FCC-yksikön huoltopysäytyksessä keväällä 2018.

Jotta, mittausdatasta saataisiin kuitenkin parempi arvio yksikön paine- ja tiheysprofiliin, päädyttiin PI-2406:n painelukemaksi kirjaamaan automaatiojärjestelmän osoittama paine.



Kuva 16. Analogisen painemittarin tilalle on asennettu digitaalinen tarkkuuspainemittari mittauskierroksella.

Päivämäärä:		<b>6.3.2018</b>					
Mittauskohde nro.	Tagi (jos on)	Korko [m]	Paine [kPa]	Mittaus aika	TOP data [kPa]	Huomiot	
1	PG-2417	46,027	<b>147</b>	<b>11:11</b>		Norm. PG yhde	
2	PI-2410	44,293	<b>164</b>	<b>11:13</b>	<b>164</b>	Norm. PG yhde	
3	LI-2431 YLÄYHDE	37,708	<b>165</b>	<b>11:05</b>		Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta mittauksen ajaksi <b>Vaatii telineet</b>	
4	LI-2431 ALAYHDE	21,266	<b>204</b>	<b>10:54</b>		Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta	
5	PG-2422	17,927	<b>222</b>	<b>10:17</b>			
6	PG-2423	16,849		<b>Mittaus tukossa</b>			
7	PI-2406	17,599	<b>218</b>	<b>Mittaus tukossa, TOP arvo</b>	<b>218</b>	Huom. PDIZ-2408 ohitus	
8	PI-2407	15,730	<b>191</b>	<b>10:26</b>	<b>192</b>	Huom. PDIZ-2408 ohitus	
9	PI-2498	32,373	<b>173</b>	<b>8:37</b>	<b>174</b>	Norm. PG yhde	
10	PI-2453	28,743	<b>182</b>	<b>8:45</b>	<b>182</b>	Norm. PG yhde	
11	LI-2408 YLÄYHDE	24,630	<b>179,5</b>	<b>9:00</b>		Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta mittauksen ajaksi <b>Vaatii telineet</b>	
12	LI-2408 ALAYHDE	10,830	<b>210</b>	<b>11:24</b>		Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta	
13	PI-2459	18,600	<b>186</b>	<b>9:05</b>	<b>187</b>	Norm. PG yhde	
14	PI-2467	14,801	<b>191</b>	<b>11:30</b>	<b>193</b>	Norm. PG yhde	
15	PI-2460	12,886	<b>205</b>	<b>11:21</b>	<b>206</b>	Norm. PG yhde	
16	PI-2461	10,317	<b>216</b>	<b>11:40</b>	<b>216</b>	Norm. PG yhde	
17	PG-24180	10,000	<b>238</b>	<b>12:11</b>		Norm. PG yhde	
18	PG-24181	4,536	<b>255</b>	<b>12:13</b>		Norm. PG yhde	
19	PI-2462	4,554	<b>256</b>	<b>11:43</b>	<b>256</b>	Huom. PDIZ-2473 ohitus	
20	PI-2464	2,117	<b>230</b>	<b>11:52</b>	<b>228</b>	Huom. PDIZ-2473 ohitus	

Kuva 17. Kuvassa on esitetty 6.3.2018 suoritetun mittauskierroksen mittauspöytäkirja. Mittauspöytäkirjaan kirjattiin kierroksella paine yhden kPa:n tarkkuudella ja mittauksen kellonaika.

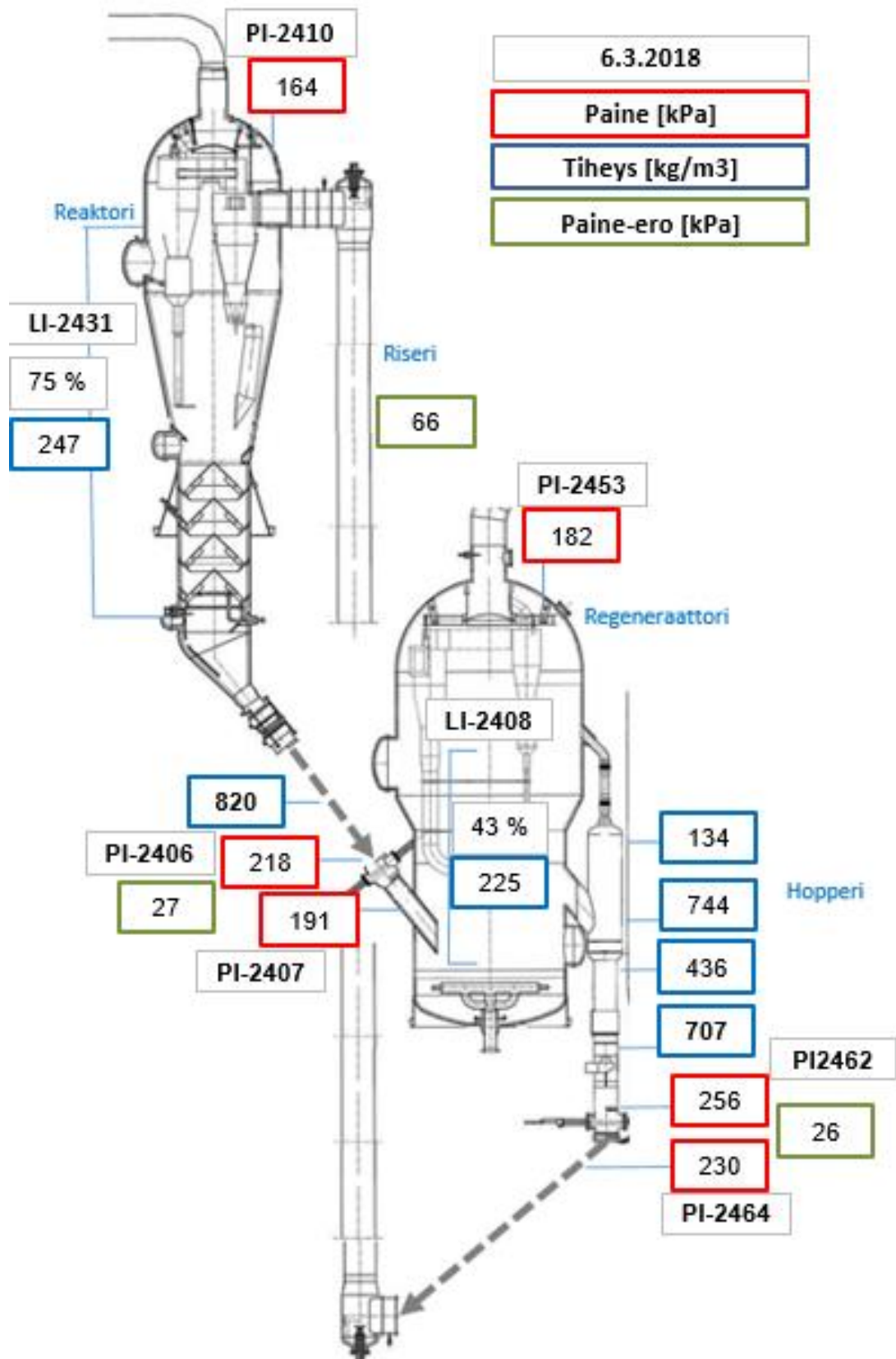


Painemittauksien ja instrumentoinnin korkeusaseman perusteella laskettiin yksikölle paine- ja tiheysprofiili. Osa painemittauksista ovat suoraan mitattuja, mutta tiheydet ja pinnanmittaukset sekä katalyytinluomat hydrostaattiset paineet ovat laskennallisia.

Paine- ja tiheysprofiilin laskut on esitetty liitteessä 2.

Tag	Reaktori	Arvo	Yksikkö
PI-2410	Reaktorin paine	164	kPa
LI-2431	Katalyyttipedin pinta LI-2431, laskennallinen	75 %	[%]
	Katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine reaktorissa	32	kPa
	Paine käytetynkatalyytin laskuputken yläosassa	196	kPa
	Katalyytin luoma hydrostaattinen paine laskuputkessa	22	kPa
PI-2406	Paine käytetyn katalyytin luistiventtiin yläpuolella	218	kPa
PI-2407	Paine käytetyn katalyytin luistiventtiin alapuolella	191	kPa
	Paine-ero käytetynkatalyytin luistiventtiin yli	27	kPa
	Katalyyttipedin keskimääräinen tiheys reaktorissa	247	kg/m <sup>3</sup>
	<b>Regeneraattori</b>	<b>Arvo</b>	
PI-2453	Paine regeneraattorissa	182	kPa
LI-2408	Katalyyttipedin pinta LI-2408, laskennallinen	43 %	[%]
	Katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine regeneraattorissa	13	kPa
	Katalyyttipedin keskimääräinen tiheys reaktorissa	225	kg/m <sup>3</sup>
	<b>Hopperi</b>	<b>Arvo</b>	
	Katalyytin tiheys hopperin yläosassa	134	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys hopperin keskiosassa	744	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys hopperin alaosassa	436	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys regeneroidunkatalyytin luistiventtiilillä	707	kg/m <sup>3</sup>
	Keskimääräinen katalyytin tiheys hopperissa	590	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine hopperissa	26	kPa
	Paine regeneroidunkatalyytin laskuputken yläosassa	208	kPa
	Katalyytin luoma hydrostaattinen paine laskuputkessa	49	kPa
PI-2462	Paine regeneroidunkatalyytin luistiventtiin yläpuolella	256	kPa
PI-2464	Paine regeneroidunkatalyytin luistiventtiin alapuolella	230	kPa
	Paine-ero regeneroidunkatalyytin luistiventtiin yli	26	kPa
	<b>Riseri</b>	<b>Arvo</b>	
	Paine-ero riserissa	66	kPa
	<b>Laskuputket</b>	<b>Arvo</b>	
	Käytetynkatalyytin laskuputken korkeusero	2,687	m
	Regeneroidunkatalyytin laskuputken korkeusero	7,052	m
	Katalyytin tiheys käytetynkatalyytin laskuputkessa	820	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys regeneroidunkatalyytin laskuputkessa	707	kg/m <sup>3</sup>

Kuva 18. Kuvassa on esitetty mittauskierroksen perusteella laskettu tiheys- ja paineprofiili. Ruskealla värillä on merkitty mittaustulos, valkoiset kentät ovat laskennallisia arvoja ja sinisellä laskennalliset tiheydet.



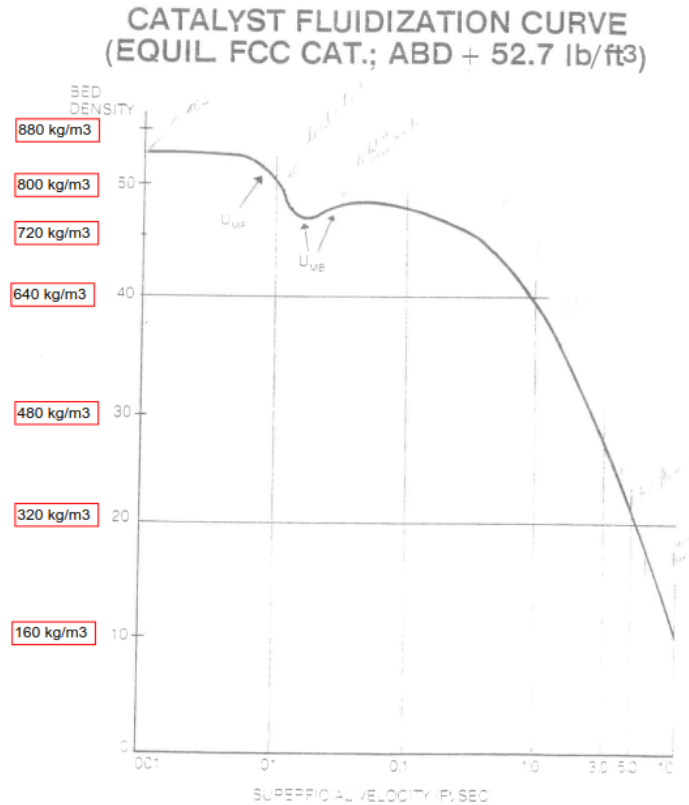
Kuva 19. Kuvassa on esitetty FCC:n paine- ja tiheysprofiilin tulokset sijoitettuna yksinkertaistetun reaktori-osan kuvaan.

Reaktoriosan pinnanmittauksen LI2431 voidaan todeta vastaavan melko hyvin automaatiojärjestelmän lukemia. Eroa painemittauksen ja automaatiojärjestelmän näyttämän mittauksen välillä on noin 3 prosenttia.

Reaktoriosan katalyyttipedin tiheys on alhainen, mutta on otettava huomioon, että tiheys kuvaa keskimääräistä pedin tiheyttä reaktorissa. Tiheys on laskettu LI2431:n mittausyhteiden välillä. Strippausosan tiheys on korkeampi kuin keskimääräinen pedin tiheys.

Käytetyn katalyytin laskuputken kanssa oli suurimpia haasteita mittauskierroksella. Mittausyhteiden korkeusasemien selvittäminen oli vaikeaa, koska rakennekuvia oli haastava löytää ja niissä ei varsinaisesti lukenut mittausyhteiden korkeustietoja. Korot arvioitiin laskemalla olemassa olevilla tiedoilla. Itse mittauskierroksella havaittiin, että usea paikallisen painemittarin paineyhde oli tukossa ja tästä syystä ei tarkkuusmittarilla ei saatu kirjattua painelukemaa. Tämä on erittäin harmillista, sillä alustavien arvioiden mukaan laskuputken toiminnassa epäiltiin olevan ongelmia ja laskuputken paineprofiiliin toivottiin tuovan uutta tietoa toiminnan arviointiin.

Saatujen tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tiheydet käytetyn katalyytin laskuputkessa ovat  $820 \text{ kg/m}^3$ . Korkea katalyytin tiheys viittaa siihen, että katalyytti ei välttämättä leiju laskuputkessa nostoen tiheyttä. Lisäksi käynnin aikana havaittu kuuma piste viittaa siihen, että leijumaton katalyytti ei siirrä lämpöä riittävällä tasolla laskuputkessa aiheuttaen kuumia pisteitä (hot spot) ja ongelmia rakenteiden ylikuumentuessa. Tämä on luonnollisesti erittäin epätoivottavaa, ja siksi reaktorin strippausosan ja laskuputken ilmastuskaasujen määriä tulisi tarkastella tilanteen korjaamiseksi ja suorittaa uusi tiheys- ja paineprofiilin mittauskierros. Kuvasta 20 voidaan arvioida, että laskuputken katalyyttitiheyden ollessa  $820 \text{ kg/m}^3$  ollaan aivan rajoilla onko minimileijumisnopeus ( $U_{mf}$ ) ylitetty, ja katalyytti ei välttämättä leiju.



Kuva 20. FCC:n katalyyttipedin tiheys kaasun virtausnopeuden funktiona. [21.]

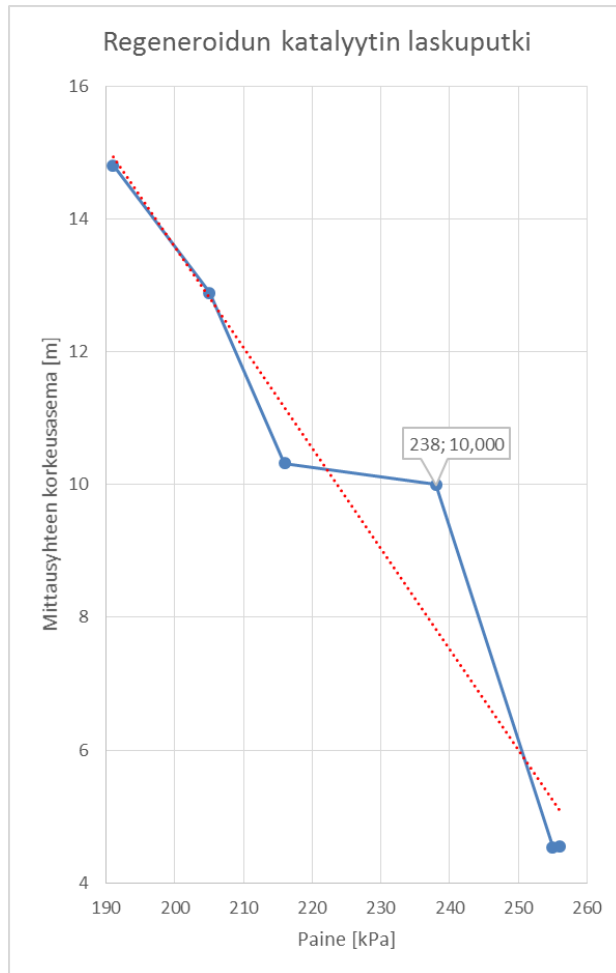
Paine-ero käytetyn katalyytin luistiventtiilin yli (27 kPa) on kirjallisuuden antamien ohjearvojen rajoissa.

Regeneraattoriosan pinnanmittaus LI2408 näyttää tarkkuuspainemittarilla suoritetun mittauskierroksen perusteella 5 % liian alhaista lukemaa. On kuitenkin huomioitava, että katalyyttipedin pinta elää hieman jatkuvasti ja mittauskierroksen aikana kirjattu tulos on hetkellinen ja mittausten välillä on useampi minuutti.

Regeneraattorin katalyyttipedin tiheys on alhainen, mutta on tiheys kuvaa keskimääräistä pedin tiheyttä reaktorissa. Tiheys on laskettu LI2408:n mittausyhteiden välillä.

Hopperissa on useita painemittauksia, joten tiheysprofiili pystytään laskemaan useasta eri korkeudesta. Huomion arvoista on, että tiheydet vaihtelevat huomattavasti mittaustaikojen suhteen. Hopperin yläosassa tiheys on odotetusti alhainen, koska yläosasta ei ole enää havaittavissa selkeää katalyyttipetiä. Hopperin keskiosan tiheys on kirjallisuuden antamissa ohjearvoissa. Hopperin alaosan tiheys on kirjallisuusarvojen suosituksia alhaisempi, mutta kuitenkin Nesteen operointiohjeistuksen mukaisissa arvoissa. Korkeampi hopperin alatiheys nostaisi myös regeneroidun katalyytin

laskuputken tiheyttä, mutta koska tiheydet laskuputkessa on jo suositusten ylärajoilla, tiheyden nostaminen hopperissa ei ole suositeltavaa, sillä hopperin tehtävänä on säätää katalyyttitiheys sopivaksi laskuputkea varten. Voidaankin siis todeta, että tulosten perusteella hopperin toiminta on hyvällä tasolla.

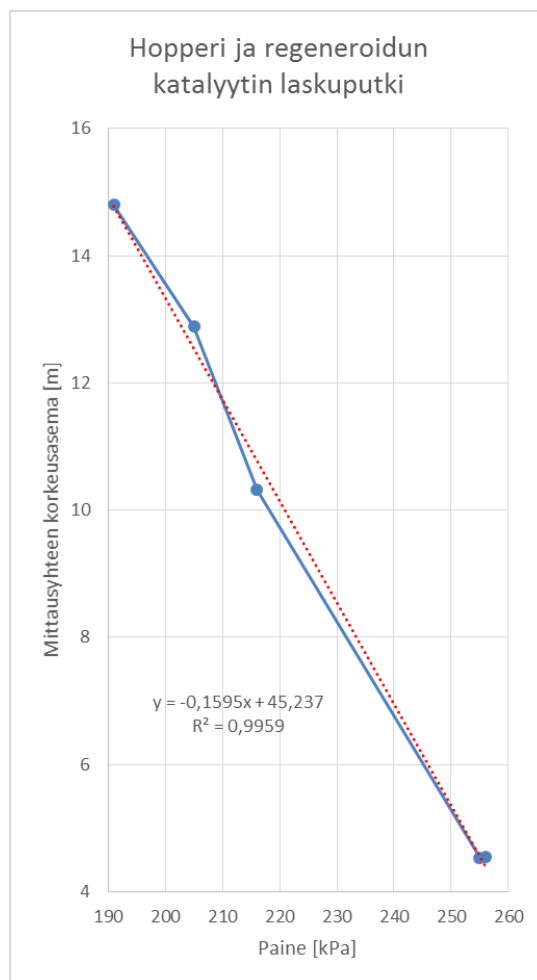


Kuva 21. Regeneroidun katalyytin laskuputken ja hopperin paine korkeuden funktiona. Paine kasvaa mitä syvemältä mittaus on suoritettu.

Regeneroidun katalyytin laskuputkessa on vain muutama painemittausyhde laskuputken paineprofiilin määrittämiseksi. Mittauskiirroksen tuloksia tarkastellessa kuvassa 21 mittauspisteen numero 17 arvo erottuu joukosta. Mittauksen mukaan paine nousee 31,7 cm matkalla jopa 22 kPa. Tämä tarkoittaisi, että katalyytin tiheys mittauspisteiden välillä olisi yli  $7000 \text{ kg/m}^3$ , mikä ei ole käytännössä mahdollista. Mittauspisteen tulosta voidaan siis pitää virheellisenä. Mahdollisesti virheen on aiheuttanut pursotuskaasulinjastoon lauhtuneet nesteet.

Kuvissa 21 ja 22 on mukana hopperin keski- ja alaosan painemittauksien tulokset, koska laskuputkessa on vain kaksi kelvollista mittaustulosta. Muuten paineprofiilin tulokset olisivat aina lineaarisia.

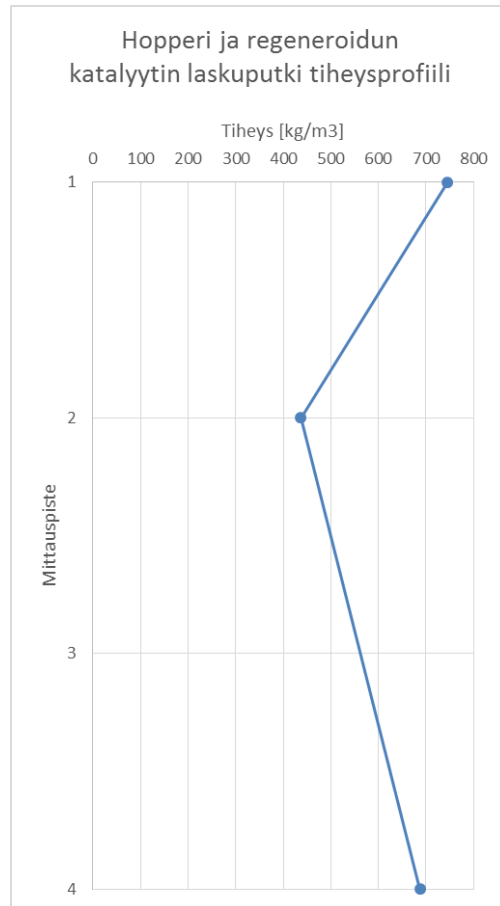
Kun hopperin ja regeneroidun katalyytin laskuputken mittausdatasta jätetään huomioimatta virheellinen mittaus, paine- ja tiheysprofiili näyttää huomattavasti loogisemmalta. Kuvan 22 pisteistä voidaan kuitenkin todeta, että laskuputken kuvaaja on lähellä kuvassa 12 esitettyä paineprofiilia. Kuvassa 21 voidaan havaita, että paine kasvaa melko tasaisesti mitä syvempää mittaus on suoritettu. Kuitenkaan 12,9 metrin ja 10,3 metrin välillä paine ei kasva lineaarisesti.



Kuva 22. Kuvassa on esitetty regeneroidun katalyytin laskuputken ja hopperin paine korkeuden funktiona, ilman mittauspiste numeroa 17.

Hopperissa ja regeneroidun katalyytin laskuputkessa on havaittavissa, että laskuputkessa esiintyy mahdollisesti kohtalaista katalyyttikierron ongelmaa. Kuvassa 23 tiheys laskee yhdessä mittauspisteessä alle suositusten. Tämä on kuitenkin mahdollisesti tyy-

pillistä hopperin alaosassa, mutta koska yksiköstä ei ole riittävää referenssitilaa, tulosten arviointi on haasteellista. Laskuputkessa paine kasvaa lineaarisesti, mutta mittausdataa on vain kahdesta mittauspisteestä riittävällä korkeusaseman erolla. Tiheys regeneroidun katalyytin laskuputkessa on kirjallisuusarvojen suositusten ylärajoilla.



Kuva 23. Hopperin ja regeneroidun katalyytin laskuputken tiheysprofiili. Mittauspiste 1 on hopperin keskiosan tiheys. Mittauspisteiden 4:n arvo on tiheys laskuputkessa.

Paine-ero riserissa on tulosten perusteella 66 kPa. Tämä on kirjallisuusarvojen ylärajoilla. Riserin painehäviön arvioinnissa olisi myös tärkeätä tietää mikä, on Porvoon jalostamon FCC-yksikön normaali vaihteluväli painehäviössä. Tämä saadaan suorittamalla paineprofiilin mittauskierros säännöllisesti yksikön käydessä.

Vaikka paine- ja tiheysprofiilin mittaaminen olisi suositeltavaa suorittaa aina yhdellä kalibroidulla painemittarilla, voidaan kuitenkin automaatiojärjestelmä datan perusteella arvioida yksikön painetasot ja tiheysprofiili. Automaatiojärjestelmän mittausdatan ongelmana voidaan pitää epävarmuustekijöitä mittaustarkkuudessa, kun käytetään useampia erillisiä painemittareita.

Yksikössä on useita paine- ja paine-eromittauksia, joilla saadaan kuva paineprofiilista. Yksikön automaatiojärjestelmässä ainoastaan hopperissa on laskennallinen tiheys. Tiheydet voidaan myös laskea reaktorissa, regeneraattorissa ja laskuputkissa käyttämällä hyväksi pinnamittauksia ja eri korkeusasemalla olevia painemittauksia.

Reaktorin strippausosan katalyytin tiheyden laskemiseksi on tiedettävä pinnanmittauksen (paine-eroon perustuva) mittauksen sisäputken korkeusasema ja mittauksen paine-eron mitoitusalue. Reaktorin pinnanmittauksen LIC2431 paine-eron mittausalue on 0-53,15 kPa, 0 kPa:n vastatessa 0 %:n pinnankorkeutta ja 53,15 kPa:n vastaten 100 %. Mittausyhteet ovat korkeudella 30,512 metriä ja 21,266 metriä. Tiheys voidaan nyt laskea alla olevalla tavalla:

$$\rho = \frac{(53,15 \text{ kPa} * \text{pinnankorkeus } \%) * 1000}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (30,512 \text{ m} - 21,266 \text{ m})} \quad (14)$$

Regeneraattorin katalyytin tiheys lasketaan käytännössä samalla tavalla kuin reaktorin tiheydet.

Hopperin ja katalyytin laskuputkien tiheydet lasketaan samalla periaatteella, kuin reaktorin ja regeneraattorin tiheydet, mutta mittauspisteinä käytetään prosessissa olevia painemittauksia ja mittauspisteiden korkeuseroja.

Voidaan havaita, että automaatiojärjestelmästä saatu mittausdata on melko lähellä digitaalisella painemittarilla tehtyä mittauskierroksen tuloksia. Suurin ero on käytetyn katalyytin laskuputksen tiheydessä. Ero johtunee pinnamittauksen LI2431 aiheuttamasta muutoksesta. Korkeammalla pinnalla paine käytetyn katalyytin laskuputken yläosassa on korkeampi, jolloin laskennallinen katalyytin aiheuttama hydrostaattinen paine on alhaisempi. Tämä viittaisi alhaisempaan katalyytin tiheyteen.

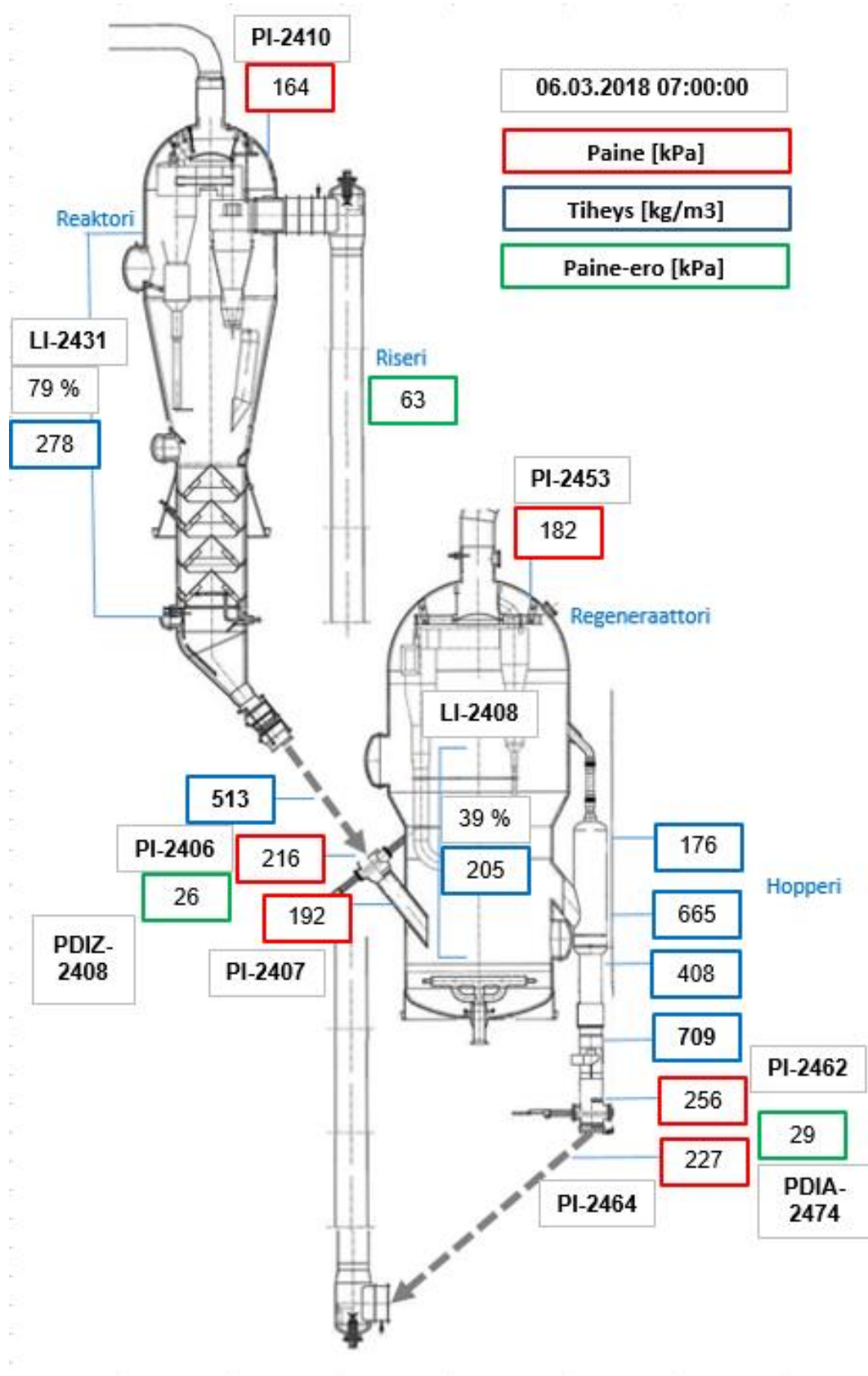
Alhainen laskuputken tiheys saattaa johtua liiallisesta tai liian vähäisestä ilmastushöyryn ajosta strippausosaan. Korkeammalla katalyytin tiheydellä saataisiin luotua suurempi paine laskuputkeen ja katalyytinkiertoa nostettua tai vastavuoroisesti voitaisiin laskea regeneraattorin painetta. Tällä tavalla voitaisiin ajaa enemmän ilmaa regeneraattoriin ja tehostaa koksen polttoa.



Paine- ja tiheysprofiilin määrittäminen automaatiojärjestelmästä saadun datan perusteella voidaan käyttää lähinnä karkeaan arvioon, mutta se ei poista tarvetta suorittaa mittauskierrosta yhdellä kalibroidulla painemittarilla.

Tag	Reaktori	Arvo	Yksikkö
PI-2410	Reaktorin paine	164	kPa
LI-2431	Katalyyttipedin pinta LI-2431	79 %	[%]
	Katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine reaktorissa	39	kPa
	Paine käytetynkatalyytin laskuputken yläosassa	203	kPa
	Katalyytin luoma hydrostaattinen paine laskuputkessa	14	kPa
PI-2406	Paine käytetyn katalyytin luistiventtiin yläpuolella	216	kPa
PI-2407	Paine käytetyn katalyytin luistiventtiin alapuolella	192	kPa
PDIZ-2408	Paine-ero käytetynkatalyytin luistiventtiin yli	26	kPa
	Katalyyttipedin keskimääräinen tiheys reaktorissa	278	kg/m <sup>3</sup>
	<b>Regeneraattori</b>	<b>Arvo</b>	
PI-2453	Paine regeneraattorissa	182	kPa
LI-2408	Katalyyttipedin pinta LI-2408, laskennallinen	39 %	[%]
	Katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine regeneraattorissa	11	kPa
	Katalyyttipedin keskimääräinen tiheys reaktorissa	205	kg/m <sup>3</sup>
	<b>Hopperi</b>	<b>Arvo</b>	
	Katalyytin tiheys hopperin yläosassa	176	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys hopperin keskiosassa	665	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys hopperin alaosassa	408	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys regeneroidunkatalyytin luistiventtiilillä	709	kg/m <sup>3</sup>
	Keskimääräinen katalyytin tiheys hopperissa	537	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine hopperissa	24	kPa
	Paine regeneroidunkatalyytin laskuputken yläosassa	205	kPa
	Katalyytin luoma hydrostaattinen paine laskuputkessa	49	kPa
PI-2462	Paine regeneroidunkatalyytin luistiventtiin yläpuolella	256	kPa
PI-2464	Paine regeneroidunkatalyytin luistiventtiin alapuolella	227	kPa
PDIA-2474	Paine-ero regeneroidunkatalyytin luistiventtiin yli	29	kPa
	<b>Riseri</b>	<b>Arvo</b>	
	Painehäviö riserissa	63	kPa
	<b>Laskuputket</b>	<b>Arvo</b>	
	Katalyytin tiheys käytetynkatalyytin laskuputkessa	513	kg/m <sup>3</sup>
	Katalyytin tiheys regeneroidunkatalyytin laskuputkessa	709	kg/m <sup>3</sup>

Kuva 24. Kuvassa on esitetty 6.3.2018 klo 7.00–8.00 automaatiojärjestelmän prosessimittauksista laskettu FCC-yksikön paine- ja tiheysprofiili.



Kuva 25. Kuvassa on esitetty automaatiojärjestelmästä otetun datan perusteella laskettu FCC:n paine- ja tiheysprofiili. Tulokset sijoitettuna yksinkertaistettuun reaktori-osan kuvaan.

## 6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Työn kirjallisuusosassa perehdyttiin leijutukseen sekä FCC-yksikön toimintaan katalyyttikiertoon ja leijutukseen liittyvistä näkökulmista.

FCC-yksikössä on tunnistettavissa lähes kaikki tyypilliset leijutusalueet ja yksikön katalyytti kierron ongelmien tunnistaminen vaatii hyvää ymmärrystä reaktori- ja regeneraattoriosan paineprofiilista sekä muuttujista, jotka vaikuttavat katalyytin leijutukseen. FCC-yksikköön liittyvässä kirjallisuudessa kehoitetaan seuraamaan ja määrittämään tiheys- ja paineprofiilia normaalioperoinnissa sekä ongelmatilanteissa. Porvoon jalostamon FCC-yksikössä ei ole suoritettu säännöllisesti paineprofiilin mittausta.

Insinööriyössä selvitettiin kohteet, mistä painemittaukset tulisi suorittaa. Tämän pohjalta tehtiin laskentapohjat, joita voidaan käyttää jatkossa paine- ja tiheysprofiilin määrittämistä varten.

Paineprofiilin mittauskierron olisi suositeltavaa suorittaa esimerkiksi kuukausitasolla, jotta saadaan määritettyä referenssitaso yksikön paine- ja tiheysprofiilia varten. Paine- ja tiheysprofiilin monitoroinnin kautta voidaan nopeuttaa yksikössä ilmenevien leijutukseen liittyvien ongelmien ratkaisua. Lisäksi katalyyttikierron optimoimisella voidaan saada lisättyä katalyyttikiertoa ja samalla vuositasolla saavuttaa taloudellisia hyötyjä.

Kirjallisuudesta löydetyistä laskuputkien paine- ja tiheysprofiiliesimerkeissä mittauspisteitä on yleisesti noin kuusi kappaletta, kun Porvoon jalostamon FCC-yksikön katalyytin laskuputkissa on kolme painemittaukseen soveltuvaa kohdetta. Mikäli mittauspisteitä olisi useampi, saataisiin parempi kuva leijutuksesta laskuputkissa. Porvoon jalostamon FCC-yksikköön on suositeltavaa lisätä painemittauksia laskuputkiin.

Soveltavassa osuudessa suoritettua paineprofiilin mittauksessa koettiin haasteita katalyyttilaskuputkien luona. Painemittausta ei pystytty suorittamaan kahdesta mittauspisteestä tukkeentuneiden yhteiden takia ja yksi mittauspisteiden lukemista todettiin tulosten arvioinnissa virheelliseksi. Mittauspisteet on syytä tarkastaa ja mahdolliset tukkeumat avata seuraavassa yksikön huoltoseisokissa.

Paine- ja tiheysprofiili määritettiin insinööriyön aikana kerran, FCC-yksikössä ilmenneiden haasteiden johdosta. Paine- ja tiheysprofiilin tulosten tarkastelussa voidaan todeta,

että käytetyn katalyytin laskuputkessa katalyytti ei välttämättä pysy koko ajan fluidisoidussa tilassa. Yksikön käynninaikana havaittu kuuma piste laskuputkessa tukee tuloksien havaintoja.

Aikana, jolloin painemittaukset suoritettiin, yksikön todettiin käyvän tasaisesti ja toivotulla tavalla. Tuloksien tarkastelussa kuitenkin ilmeni mahdollisia ongelmia laskuputkien toiminnassa. Tästä syystä jatkossa olisi suositeltavaa jatkaa säännöllisesti paineprofiilin mittaamista kalibroidulla mittarilla, koska ennen merkittävien muutoksien tekemistä esimerkiksi leijutuskaasujen virtauksiin on erittäin tärkeää tunnistaa yksikön lähtötilanne ja referenssitaso.

Insinööriyötä varten Porvoon jalostamolle hankittiin digitaalinen tarkkuuspainemittaria. Tarkkuuspainemittarissa on lukuisia toimintoja joita ei työssä hyödynnetty. Mittarin saa näyttämään paineen minuuttikeskiarvoa ja mittausdata on mahdollista kerätä bluetooth-toiminnon kautta suoraan esimerkiksi älypuhelimeen. Toimintojen hyödyntäminen voi tulevaisuudessa helpottaa mittauskierroksen suorittamista.

## Lähteet

- 1 Neste. 2017. Konserni sivut. Verkkodokumentti. Saatavissa: <<https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meist%C3%A4/tuotanto>>. Luettu 8.1.2017.
- 2 Kilpilahti.fi. 2017. Yritykset Kilpilahdessa. Verkkodokumentti. <<http://www.kilpilahti.fi/yritykset-kilpilahdessa/neste/>>. Luettu 8.1.2017.
- 3 Neste Oyj. FCC-pätevyys, Perusteet. 2017. Nesteen sisäinen dokumentti
- 4 Tikka, Johanna. Kurssimateriaali. Prosessitekniikan laboratoriotyöt 1. 04\_Leijutus. Metropolia Ammattikorkeakoulu
- 5 Subramanian, R. Shankar. Flow through Packed and Fluidized Beds, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Clarkson University. Verkkodokumentti. <<http://www.researchgate.net>>. Luettu 5.3.2017.
- 6 Basu, Prabir. 2006. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Taylor & Francis Group
- 7 Geankoplis, Christie J. 1993. Transport Processes and Unit Operations. Third editon. Prentice-Hall International, Inc
- 8 Jakobsen, H. A. 2014. Chemical Reactor Modeling Fluidized Bed Reactors. Itävalta, Springer International Publishing.
- 9 Chan, Chian. Seville, Jonathan P.K. Baeyens, Jan. 2010. THE TRANSPORT DISENGAGEMENT HEIGHT (TDH) IN A BUBBLING FLUIDIZED BED (BFB). Seminaari materiaali.
- 10 Hiidenkari, Heimo. 2016. Hiukkasten leijutusominaisuuksien määrittäminen. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- 11 Suvanto, Kari. 2012. Tekniikan Fysiikka 1. Edita Publishing Oy
- 12 Grace Catalyst Technologies. Sähköposti keskustelu. 2015. Nesteen sisäinen dokumentti
- 13 Kuuluvainen, Venla. FCC yleistä. 2016. Nesteen sisäinen dokumentti
- 14 Hästbacka, Kaj. 1992. Neste, Öljystä muoveihin. Espoo: Neste Oy.
- 15 Sadeghbeigi, Reza. 1995. Fluid Catalytic Cracking Handbook. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.

- 16 Grace unit operating report - Neste. 2015. Nesteen sisäinen dokumentti
- 17 Wilson, Joseph W. 1997. Fluid Catalytic Cracking Technology and Operations. Tulsa, Oklahoma: Pennwell Publishing Company
- 18 Fletcher, Ray. 1996. Three-step procedure optimizes FCC slide-valve differential pressure. Houston, Akzo-Nobel Chemicals Inc.
- 19 Mott, Raymond W. 2009. Trouble Shooting FCC Standpipe Flow Problems. Catalagram 106.
- 20 Laitinen, Esa. 2017. Leijukatalyyttisen krakkauksen kevytkaasun käsittelyn rajoitteet. Diplomityö. Aalto yliopisto.
- 21 Catalyst fluidization curve. Saatu Esa Tammiselta 27.3.2018. Nesteen sisäinen dokumentti

## FCC:n paineprofiilimittauspöytäkirja

Päivämäärä:					
Mittauskohde nro.	Tagi (jos on)	Korko [m]	Paine [kPa]	Mittaus aika	Huomiot
1	PG-2417	46,027			Norm. PG yhde
2	PI-2410	44,293			Norm. PG yhde
3	LI-2431 YLÄYHDE	37,708			Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta mittauksen ajaksi <b>Vaatii telineet</b>
4	LI-2431 ALAYHDE	21,266			Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta
5	PG-2422	17,927			
6	PG-2423	16,849			
7	PI-2406	17,599			Huom. PDIZ-2408 ohitus
8	PI-2407	15,730			Huom. PDIZ-2408 ohitus
9	PI-2498	32,373			Norm. PG yhde
10	PI-2453	28,743			Norm. PG yhde
11	LI-2408 YLÄYHDE	24,630			Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta mittauksen ajaksi <b>Vaatii telineet</b>
12	LI-2408 ALAYHDE	10,830			Norm. PG yhde. Säädin MAN-ohjaamosta
13	PI-2459	18,600			Norm. PG yhde
14	PI-2467	14,801			Norm. PG yhde
15	PI-2460	12,886			Norm. PG yhde
16	PI-2461	10,317			Norm. PG yhde
17	PG-24180	10,000			Norm. PG yhde
18	PG-24181	4,536			Norm. PG yhde
19	PI-2462	4,554			Huom. PDIZ-2473 ohitus
20	PI-2464	2,117			Huom. PDIZ-2473 ohitus
<b>Pinnanmittauksen kalibrointialue, dP [kPa]</b>					
<b>Tagi</b>	<b>0 %</b>	<b>100 %</b>			
<b>LI-2431</b>	0	53,15			
<b>LI-2408</b>	0	71,69			

## Laskentakaavat paine- ja tiheysprofiilia varten

Reaktorin katalyyttipedin pinta laskettiin LI-2431:n mittausyhteiden paine-eron perusteella kun tiedetään mittausyhteiden korot ja pinnanmittauksen kalibrointialue. Kalibrointialue on luettu pinnanmittauksen kojeluettelosta.

$$LI2431 \text{ pinta} = \frac{p_{LI2431 \text{ alayhde}} - p_{LI2431 \text{ alayhde}}}{\text{pinnanmittauksen kalibrointialue } dP [53,15 \text{ kPa}]} \quad (1)$$

Katalyyttipedin keskimääräinen tiheys pinnanmittauksen LI-2431 alueella laskettiin seuraavasti:

$$\rho_{reaktori} = \frac{(p_{LI2431 \text{ alayhde}} - p_{LI2431 \text{ alayhde}}) * 1000}{9,81 \frac{m}{s^2} * (LI2431 \text{ yläyhde korko [m]} - LI2431 \text{ alayhde korko [m]})} \quad (2)$$

Reaktorin katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine reaktorissa on

$$p_{kat.peti} = \frac{(LI2431 \text{ pinta [\%]} * (PI2407 \text{ korko [m]} - \text{laskuputken sisäänmeno korko [19,854 m]})}{1000} \quad (3)$$

Paine käytetyn katalyytin laskuputken yläosassa on

$$p_{käyt.kat.laskuputki.ylä} = p_{kat.peti} + p_{PI2410} \quad (4)$$

Katalyytin luoma hydrostaattinen paine käytetyn katalyytin laskuputkessa

$$p_{käyt.kat.laskuputki} = p_{käyt.kat.laskuputki.ylä} + p_{PI2406} \quad (5)$$

Paine-ero käytetyn katalyytin luistiventtiilin yli

$$\Delta p_{POV2403} = p_{PI2406} - p_{PI2407} \quad (6)$$

Katalyytin tiheys käytetyn katalyytinlaskuputkessa

$$\rho_{käyt.kat.laskuputki} = \frac{p_{käyt.kat.laskuputki} * 1000}{9,81 \frac{m}{s^2} * (\text{Käytetyn katalyytin laskuputken korkeusero [m]})} \quad (7)$$



Regeneraattorin katalyyttipedin pinta lasketaan samalla tavalla kuin reaktorissa

$$LI2408 \text{ pinta} = \frac{p_{LI2408 \text{ alayhde}} - p_{LI2408 \text{ alayhde}}}{\text{pinnanmittauksen kalibrointialue } dP [71,69 \text{ kPa}]} \quad (8)$$

Katalyyttipedin keskimääräinen tiheys regeneraattorissa pinnanmittauksen LI2408 alueella laskettiin seuraavasti:

$$\rho_{\text{regeneraattori}} = \frac{(p_{LI2408 \text{ alayhde}} - p_{LI2408 \text{ alayhde}}) * 1000}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (LI2408 \text{ yläyhde korko [m]} - LI2408 \text{ alayhde korko [m]})} \quad (9)$$

Regeneraattorin katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine reaktorissa on

$$p_{\text{reg.peti}} = \frac{(LI2408 \text{ pinta [\%]} * (LI2408 \text{ yläyhde korko [m]} - LI2408 \text{ alayhde korko [m]}))}{1000} \quad (10)$$

Katalyyttihopperissa on useita painemittauksia, joten katalyyttitiheys voidaan laskea useasta kohtaa hopperissa. Tiheydet lasketaan eri korkeuksilla samalla tavalla

$$\rho_{\text{hopperi,ylä}} = \frac{(p_{PI2467} - p_{PI2459}) * 1000}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (PI2467 \text{ korko [m]} - PI2459 \text{ korko [m]})} \quad (11)$$

$$\rho_{\text{hopperi,keski}} = \frac{(p_{PI2460} - p_{PI2467}) * 1000}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (PI2460 \text{ korko [m]} - PI2467 \text{ korko [m]})} \quad (12)$$

$$\rho_{\text{hopperi,alaosa}} = \frac{(p_{PI2461} - p_{PI2460}) * 1000}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (PI2460 \text{ korko [m]} - PI2461 \text{ korko [m]})} \quad (13)$$

Koska hopperissa katalyyttitiheys pedissä ei ole tasainen myöhempiä laskentoja varten, on tarve myös laskea hopperin katalyyttipedin keski- ja alaosan keskimääräinen tiheys.

$$\rho_{\text{hopperi,keskiarvo}} = \frac{\rho_{\text{hopperi,keski}} + \rho_{\text{hopperi,alaosa}}}{2} \quad (14)$$

Hopperissa katalyyttipedin luoma hydrostaattinen paine on

$$p_{\text{hopperi.peti}} = \frac{(\rho_{\text{hopperi,keskiarvo}} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (PI2467 \text{ korko [m]} - PI2461 \text{ korko [m]}))}{1000} \quad (15)$$

Regeneroidun katalyytin luoma hydrostaattinen paine hopperissa

$$p_{\text{hopperi.peti}} = \frac{(\rho_{\text{hopperi,keskiarvo}} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (PI2467 \text{ korko [m]} - PI2461 \text{ korko [m]}))}{1000} \quad (16)$$

Paine regeneroidun katalyytin laskuputken yläosassa

$$p_{\text{reg.kat.laskuputki.yläosa}} = p_{PI2453} + p_{\text{hopperi.peti}} \quad (17)$$

Katalyytin tiheys regeneroidun katalyytin laskuputkessa

$$\rho_{\text{reg.kat.laskuput}} = \frac{(p_{PI2462} - p_{PI2461}) * 1000}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (PI2461 \text{ korko [m]} - PI2462 \text{ korko [m]})} \quad (18)$$

Regeneroidun katalyytin luoma hydrostaattinen paine laskuputkessa

$$p_{\text{reg.kat.laskuputki}} = \frac{(\rho_{\text{reg.kat.laskuput}} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \text{Regeneroidunkatalyytin laskuputken korkeusero [m]})}{1000} \quad (19)$$

Paine-ero riserissa on regeneroidun katalyytin luistiventtiin jälkeisen paineen ja reaktorin yläosan paineen erotus

$$\Delta p_{\text{riseri}} = p_{PI2410} + p_{PI2464} \quad (20)$$