



Energia- ja ympäristötekniikan osasto
Prosessi- ja voimatekniikan laitos
En2010200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari
Kevät 2007

VAKIOSYKLONIEROTTIMEN TOIMINTAPERIAATTEET, MITOITUSMENETELMÄT JA MITOITUS

Lappeenranta 30.4.2007

0270075 Tanja Hämäläinen Ente 4

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Yleistä syklonierottimesta.....	6
2	SYKLONIEN LUOKITTELU.....	8
3	TOIMINTAPERIAATTEET.....	11
3.1	Vastavirtasykloni.....	11
3.1.1	Tangentiaalinen virtauksen sisääntulo.....	11
3.1.2	Aksiaalinen virtauksen sisääntulo.....	11
3.2	Läpivirtasykloni.....	12
4	VAKIOSYKLONI.....	13
5	MITOITUSMENETELMÄT VAKIOSYKLONILLE.....	15
5.1	Lapplen menetelmä.....	15
5.1.1	Erotusaste.....	15
5.1.2	Stokesin lain vaikutus erotusasteeseen.....	18
5.1.3	Painehäviö.....	19
5.2	Stairmandin menetelmä.....	20
5.2.1	Erotusaste.....	20
5.2.2	Painehäviö.....	22
6	SYKLONIN MITOITUS 1,5MW PUUHAKEKATTILALLE.....	23
6.1	Polttoaineen koostumus.....	23
6.2	Palamistaulukko.....	25
6.2.1	Polttoaineen massavirta.....	26
6.2.2	Palamisilman massavirta.....	26
6.2.3	Savukaasun massavirta ja tilavuusvirta.....	27
6.3	Mitoitus Lapplen menetelmällä.....	29
6.4	Mitoitus Stairmandin menetelmällä.....	30
7	TULOKSET.....	32
8	SOVELTUMINEN BIOPOLTTOAINEKATTILOIHIN.....	34
8.1	Leijupetikattilat.....	34
8.2	Arinakattilat.....	35
9	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	36

LÄHTEET

KUVALUETTELO

Kuva 1 Syklonierotin savukaasun puhdistajana.....	7
Kuva 2 Sisääntulorakenteet.....	9
Kuva 3 Tangentiaalinen sisääntulo.....	9
Kuva 4 Kaasunvirran poistuminen syklonista.....	10
Kuva 5 Vastavirtasyklonin toimintaperiaate, tangentiaalinen sisääntulo.....	12
Kuva 6 Vakiosyklonin mitat.....	14
Kuva 7 Erotusaste partikkelihalkaisijan d_p funktiona vakiosykloneille.....	14
Kuva 8 Erotusaste partikkelikoon suhdeluvun funktiona tavalliselle vakiosyklonityypille...	17
Kuva 9 Kitkahäviökerroin sisääntulosäteen funktiona vakiosykloneille.....	21
Kuva 10 Erotusaste partikkelikoon funktiona (a) korkeatehosyklonille ja (b) suurläpivirtausyklonille.....	21
Kuva 11 Stairmandin standardi syklonin mittasuhteet (a) korkeatehotyypille ja (b) suurläpivirtaustyypille.....	22
Kuva 12 Savukaasun saapumislämpötila sykloniin.....	28
Kuva 13 Vakiosykloni mitoitettuna Lapplen menetelmällä.....	33
Kuva 14 Vakiosykloni mitoitettuna Stairmandin menetelmällä (korkeateho).....	33

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1 Vakiosyklonin suhdemitat.....	13
Taulukko 2 Puuhakkeen koostumus.....	23
Taulukko 3 Puuhakkeen massakoostumus.....	24
Taulukko 4 Puuhakkeen palamistaulukko ilmakertoimella $\lambda = 1,15$	25
Taulukko 5 Polttoprosessiin tulevan ilman määrä.....	26
Taulukko 6 Osasavukaasujen ainemäärät ja massavirrat.....	27
Taulukko 7 Syklonin mitat Lapplen vakiosyklonille kun $D = 0,5\text{m}$	29
Taulukko 8 Syklonin mitat Stairmandin korkeatehotyypin syklonille, kun $D = 0,6\text{m}$	31

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala [m^2]
D	rungon halkaisija [m]
D_d	pölynpoiston halkaisija [m]
D_e	ulostulon halkaisija [m]
H_v	vastuskerroin [-]
K	rakenteesta ja käyttöolosuhteista johtuva kerroin [-]
L_d	sylinterin pituus [m]
L_s	kartion pituus [m]
M	moolimassa [g/mol]
N	kierrosten lukumäärä [-]
P	teho [W]
R	säde [m]
S	sisäputken pituus [m]
V	nopeus [m/s]
W	sisääntulon leveys [m]

d	halkaisija [μm]
g	putoamiskiihtyvyyys [m/s^2]
m	massa [g]
n	ainemäärä [mol]
p	paine [Pa]
q_i	alempi lämpöarvo [MJ/kg]
q_m	massavirta [kg/s]
q_v	tilavuusvirta [m^3/s]

Kreikkalaiset

Δ	muutos [-]
Γ	kitkavakio [-]
Σ	summa [-]

ϕ	kitkahäviökerroin [-]
η	erotusaste [%]
μ	viskositeetti [kg/ms]
ρ	tiheys [kg/m ³]

Alaindeksit

<i>a</i>	tuhka
<i>c</i>	leikkaus
<i>d</i>	kuiva
<i>e</i>	ulostulo
<i>el</i>	sähkö
<i>g</i>	kaasu
<i>i</i>	sisään
<i>j</i>	jakauma
<i>kok</i>	kokonais
<i>mp</i>	moottori ja puhallin
<i>p</i>	partikkeli
<i>pa</i>	polttoaine
<i>pi</i>	palamisilma
<i>sk</i>	savukaasu
<i>st</i>	stökiömetrinen
<i>sykl</i>	sykloni
<i>t</i>	terminaali
<i>tot</i>	kokonais
<i>tulp</i>	tulppavirtaus

1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö on osa kurssia Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari. Työ pohjautuu kirjallisuusselvitykseen, jonka tavoitteina on selvittää syklonierottimen yleiset toimintaperiaatteet ja esitellä kaksi vakiosyklonin mitoitusmenetelmää, nk. Lapplen ja Stairmandin menetelmät, joita käyttäen mitoitetaan sykloni olemassa olevalle lämpölaitoksen 1,5 MW puuhakekattilalle savukaasunpuhdistajaksi. Tuloksena saadaan kahta eri syklonityyppiä edustavat ratkaisut. Lisäksi työssä selvitetään syklonin soveltumista biopolttoainekattiloihin rajoittuen leijupeti- ja arinakattiloihin.

1.1 Yleistä syklonierottimesta

Syklonierotin (lyhennettynä sykloni) on yleisesti käytetty dynaaminen erotin, jonka toiminta perustuu massavaikutukseen. Sykloni voidaan valmistaa useista eri materiaaleista, kuten esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä. Se sopii hyvin korkeapainesovelluksiin ja useille kiinteille sekä nestemäisille kuormituksille, missä suodatus altistuu kulumiselle. Lisäksi se sopii sovelluksiin, missä erottimen tulee toimia keskeytymättömässä prosessissa useita vuosia.

Syklonia käytetään savukaasun puhdistukseen, kiertoaineen erottamiseen (leijukerroskattila) ja suojaamaan laitteita, kuten puhaltimia, eroosiolta. Syklonia voidaan käyttää myös lukuisissa muissa erottelua vaativissa prosesseissa kuten esimerkiksi sahateollisuudessa.

Syklonin hyviksi ominaisuuksiksi voidaan mainita matala pääomasijoitus sekä matalat ylläpito- ja huoltokustannukset. Lisäksi se toimii useissa sovelluksissa ja on rakenteeltaan tukeva. Huonoja ominaisuuksia puolestaan ovat matala tehokkuus hyvin pienillä partikkeleilla ja suurempi painehäviö kuin muilla erotintyypeillä. (Hoffmann & Stein, 2002. s. 5)

Kuvassa 1 on esitetty savukaasun puhdistajana toimiva sykloni.



Kuva 1 Syklonierotin savukaasun puhdistajana

2 SYKLONIEN LUOKITTELU

Massavaikutukseen (keskipakovoimaan) perustuvat erottimet voidaan luokitella niiden tuloaukon rakenteen, laitteen muodon ja kaasun sisään ja ulos virtaussuunnan mukaan.

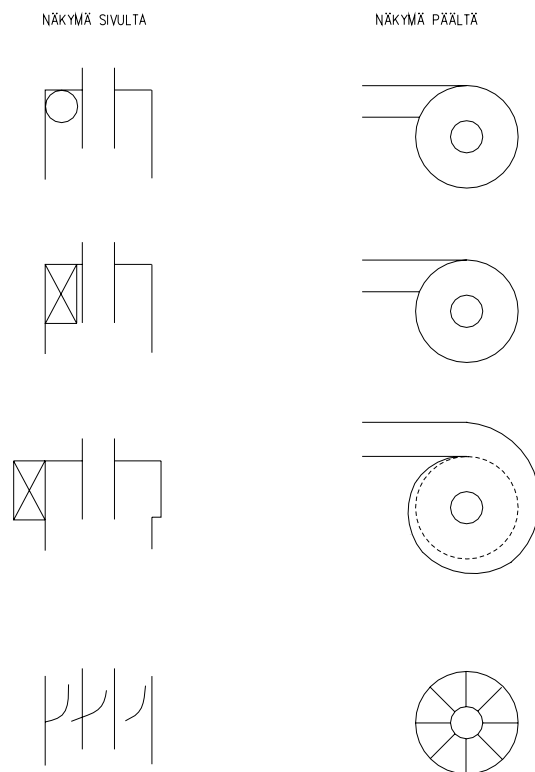
Päätyypit perustuen tuloaukon rakenteeseen ovat:

1. pyöreä, putkirakenteinen sisääntulo, joka on yksinkertaisin sovellus. Rakenne on tyypillinen halvemmissä sykloneissa, joita käytetään mm. puuteollisuudessa.
2. Tangentiaalinen sisääntulo. Käytetään laajalti kemianteollisuudessa.
3. Kierteinen sisääntulo. Tämän tyyppisen rakenteen toiminta perustuu kaasuvirtauksen puristumiseen. Tuloaukon halkaisija on suurin verrattuna muuntyyppisiin tuloaukon rakenteisiin. Kierteistä tuloaukkoa käytetään yleisesti käsiteltäessä nestemäisiä virtauksia.
4. Aksiaalinen sisääntulo, jossa virtaus saatetaan pyörivään liikkeeseen johdesiipien avulla. Tätä rakennetta kutsutaan myös ”pyörreputkeksi”.

Kuvassa 2 on havainnollistettu eri sisääntulorakenteita esittämällä sekä rakenteen sivu-että yläpuolinen näkymä. Kuvien järjestys noudattaa yllä esiteltyjen päätyyppien numerojärjestystä. Kuvassa 3 on puolestaan esitetty tangentiaalisella sisääntulolla oleva sykloni, joka on sama kuin kuvassa 1 esitetty sykloni.

Syklonien luokittelu laitteen muotoon perustuen:

1. Kartiomainen ja
2. sylinterimäinen rakenne.



Kuva 2 Sisäntulorakenteet
(Hoffmann & Stein, 2002. s. 11)

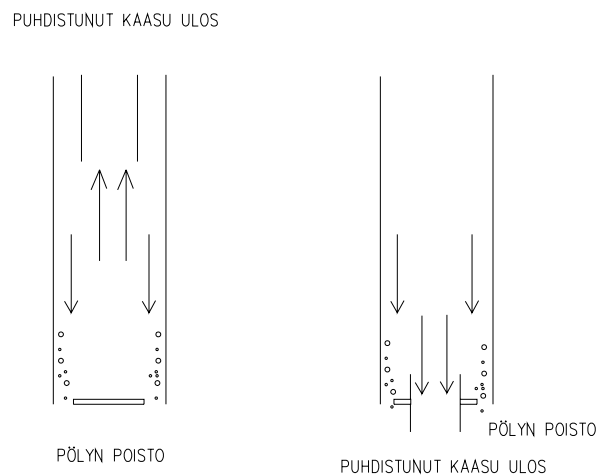


Kuva 3 Tangentiaalinen sisäntulo

Luokittelu kaasuvirtaukseen perustuen:

1. Vastavirtasykloni. Kaasu poistuu syklonista yläpään kautta. Vastavirtasyklonin tuloaukko on rakenteeltaan joko tangentiaalinen tai aksiaalinen.
2. Läpivirtausykloni. Kaasu poistuu syklonista pohjan kautta samansuuntaisesti kuin erotellut partikkelit. Läpivirtaukseen perustuvat syklonit ovat yleensä rakenteeltaan sylinterimäisiä. (Hoffmann & Stein, 2002. s. 11-13)

Kuvassa 4 on esitetty vastavirta- ja läpivirtasyklonin kaasuvirran poistuminen syklonista sekä pölyn poisto. Vastavirta- ja läpivirtasyklonin toimintaperiaatteet esitetään kappaleessa 3. Vasemmalta lukien ensimmäinen on vastavirtasykloni ja toinen läpivirtasykloni.



Kuva 4 Kaasuvirran poistuminen syklonista
(Hofmann & Stein, 2002. s.13)

3 TOIMINTAPERIAATTEET

Kaasuvirtauksen poistumissuunta syklonista määrittää sen toimintaperiaatteen. Oleellista on myös millainen sisääntulorakenne syklonissa on. Luvussa 2 esiteltiin alustavasti vastavirta- ja läpivirtasykloni sekä mallinnettiin sisääntulorakenteita. Tässä kappaleessa käsitellään niiden toimintaa tarkemmin.

3.1 Vastavirtasykloni

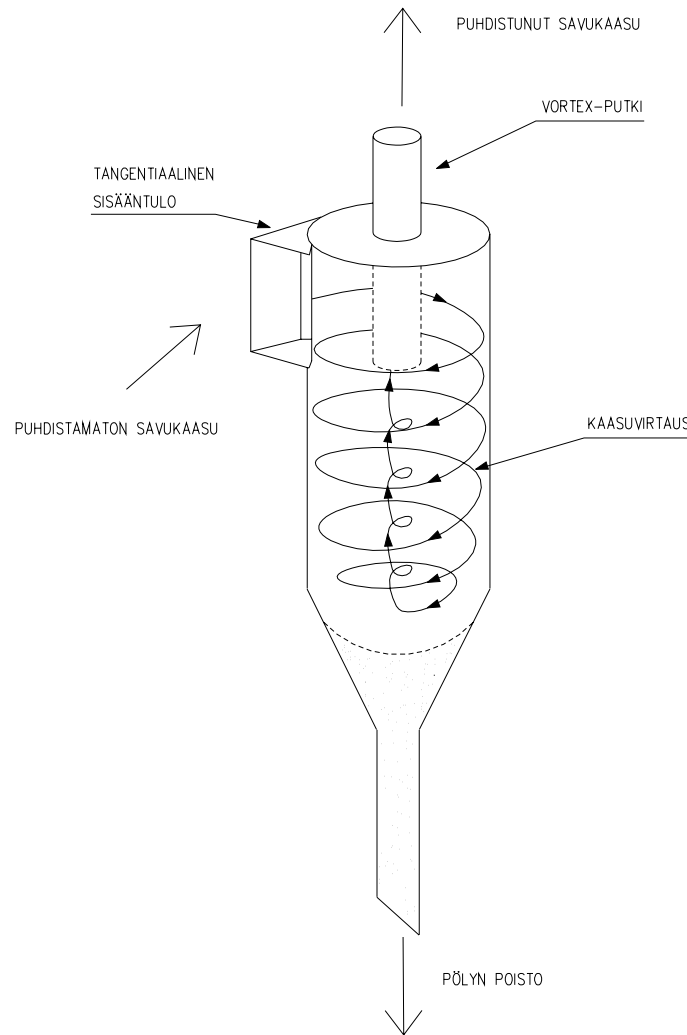
3.1.1 Tangentiaalinen virtauksen sisääntulo

Kaasu, joka sisältää eroteltavat partikkelit, johdetaan tangentiaalisesti sykloniin. Kaasuvirtaus muodostaa spiraalinmuotoisen liikeradan kohti syklonin pohjaa (johtuen syklonin geometrisestä rakenteesta), jolloin eroteltavat partikkelit sinkoutuvat syklonin seinärakenteeseen ja valuvat syklonin pohjalla olevaan poistoaukkoon. Puhdistunut kaasuvirtaus muodostaa pohjalla uuden pyörteen syklonin keskelle nousten ylöspäin ja poistuen syklonista yläpään aukon kautta. (Ohlström, 1998. s. 37-38)

Kuvassa 5 on esitetty tangentiaalisella virtauksen sisääntulolla olevan vakiosyklonin toimintaperiaate. Vakiosyklonia käsitellään kappaleessa 4.

3.1.2 Aksiaalinen virtauksen sisääntulo

Aksiaalisessa sisääntulossa puhdistettava kaasu saatetaan pyörivään liikkeeseen johdesiipien avulla. Muutoin toimintaperiaate on sama kuin tangentiaalisessa virtauksen sisääntulossa. (Ohlström, 1998. s. 37-38)



Kuva 5 Vastavirtasyklonin toimintaperiaate, tangentialinen sisääntulo
(Cooper & Alley, 1986. s.106)

3.2 Läpivirtausykloni

Läpivirtausyklonin toimintaperiaate on pääpiirteissään sama kuin aksiaalisen vastavirtasyklonin poiketen kuitenkin puhdistuneen kaasuvirtauksen poistossa. Läpivirtausyklonissa puhdistuneen savukaasun muodostama sisempi pyörre poistuu pohja-aukon kautta. Läpivirtausyklonia käytetään tästä johtuen vaakatasossa, ja se sopii paremmin esierottimeksi suuremmille partikkeleille. (Ohlström, 1998. s. 39)

4 VAKIOSYKLONI

Vakiosyklonin optimoidut mitat jaotellaan syklonityypeittäin seuraavan taulukon mukaisesti (Taulukko 1):

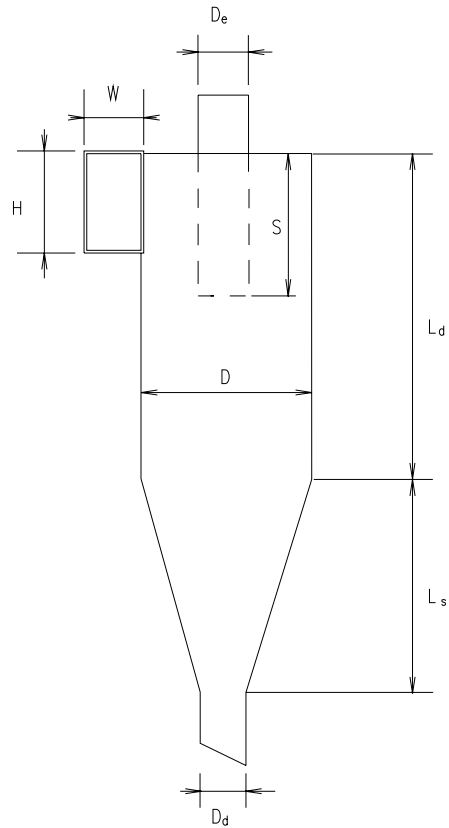
Taulukko 1 Vakiosyklonin suhdemitat

		Syklonityyppi					
		korkeateho		tavallinen		suurläpivirtaus	
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
rungon halkaisija	D/D	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
sisääntulon korkeus	H/D	0,5	0,44	0,5	0,5	0,75	0,8
sisääntulon leveys	W/D	0,2	0,21	0,25	0,25	0,375	0,35
ulostulon halkaisija	De/D	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
sisäputken pituus	S/D	0,5	0,5	0,625	0,6	0,875	0,85
synterinin pituus	Ld/D	1,5	1,4	2,0	1,75	1,5	1,7
kartion pituus	Ls/D	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5	2,0
pölypoiston halkaisija	Dd/D	0,375	0,4	0,25	0,4	0,375	0,4

(1) ja (5) Stairmand, 1951; (2), (4) ja (6) Swift, 1969; (3) Lapple, 1951. (Cooper & Alley, 1986. s. 108)

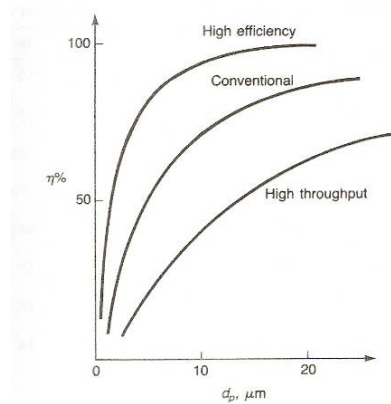
Kuvassa 6 on havainnollistettu Taulukossa 1 esitettyjä vakiosyklonin mittoja.

Kuten taulukosta 1 havaitaan, vakiosyklonin kaikki mitat perustuvat rungon halkaisijaan. Numeroarvot ovat suhdelukuja, jotka tulee kertoa rungon halkaisijalla muiden mittojen selvittämiseksi. Lappelen kehittämä malli tavalliselle syklonityypille (3) on ensimmäinen vakiosykloni, johon muut myöhemmin kehitetyt syklonityypit perustuvat. Kuvassa 6 esitetty sykloni on Lappelen vakiosykloni.



Kuva 6 Vakiosyklonin mitat
(Cooper & Alley, 1986. s. 109)

Kuvassa 7 on esitetty yleiset suhteet erotusasteelle partikkelihalkaisijan funktiona vakiosyklonityypeille.



Kuva 7 Erotusaste partikkelihalkaisijan d_p funktiona vakiosykloneille
(Cooper & Alley, 1986. s. 107)

5 MITOITUSMENETELMÄT VAKIOSYKLONILLE

Tässä luvussa esitellään kaksi vakiosyklonin mitoitusmenetelmää, Lapplen ja Stairmandin menetelmät, joista Lapplen menetelmä on ensimmäinen vakiosyklonille laadittu menetelmä ja yhä edelleen käyttökelpoinen useille sykloneille. Stairmandin menetelmä esitellään hieman suppeammin, sillä se pohjautuu pitkälti Lapplen menetelmään.

5.1 Lapplen menetelmä

5.1.1 Erotusaste

Erotusasteen määrittämiseksi tulee ensin määrittää savukaasun virtaustyyppi, joita ovat tulppavirtaus ja sekoittunut virtaus.

Tulppavirtaukselle erotusaste saadaan yhtälöllä

$$\eta_{tulpp} = \frac{N\pi DV_t}{WV_i}, \quad (1)$$

missä N = kaasuvirran syklonin ulkohalkaisijalla tekemien kierrosten lukumäärä [-]

D = syklonin rungon halkaisija [m]

V_t = partikkelin terminaalinopeus [m/s]

W = sisääntuloaukon leveys [m]

V_i = kaasun virtausnopeus sisääntulossa [m/s].

Kaasuvirran syklonin ulkohalkaisijalla tekemien kierrosten lukumäärä määritetään yhtälöllä

$$N = \frac{1}{H} \left(L_d + \frac{L_s}{2} \right), \quad (2)$$

missä H = sisääntuloaukon korkeus [m]
 L_d = sylinterin pituus [m]
 L_s = kartion pituus [m].

Kaikille standardi sykloneille $N = 6$.

Kaasuvirran nopeus sisääntulossa saadaan yhtälöllä

$$V_i = q_{v,g} \frac{1}{HW}, \quad (3)$$

missä $q_{v,g}$ = kaasun tilavuusvirta [m^3/s].

Partikkelin terminaalinopeus määritetään yhtälöstä

$$V_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) V_i^2}{18\mu R}, \quad (4)$$

missä d_p = partikkelin halkaisija [μm]
 ρ_p = partikkelin tiheys [kg/m^3]
 ρ_g = kaasun tiheys [kg/m^3]
 μ = kaasun viskositeetti [kg/ms]
 R = rungon säde [m].

Partikkelin halkaisija saadaan yhtälöllä

$$d_p = \left(\frac{9\mu W}{\pi N V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

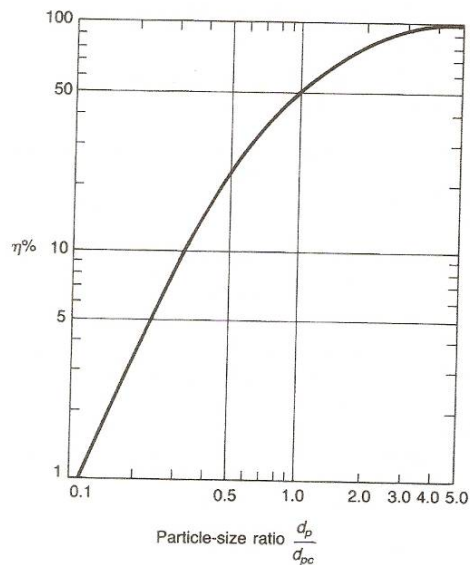
Yhtälön (5) mukaisesti määritetty partikkelin halkaisija on pienin, jonka sykloni erottelee. Teorian mukaan kaikki partikkelit, joiden halkaisija on d_p ja sitä suurempi, tulevat erotelluksi 100 % erotusasteella. Käytännössä tämä ei kuitenkaan toteudu. Lappelen mukaan partikkelin halkaisijan lisäksi tulee ottaa huomioon niin sanottu

leikkausrajahalkaisija, joka määrittää sen hiukkaskoon halkaisijan, jolla erotusasteeksi saadaan arvo 50 %. Leikkausrajahalkaisijalle on määritetty yhtälö

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu W}{2\pi N V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

missä d_{pc} = partikkelin halkaisija 50 % erotusasteella [μm].

Ratkaisemalla sekä partikkelin halkaisijan d_p että leikkausrajahalkaisijan d_{pc} voidaan erotusaste lukea Lapplen kehittämästä hyötysuhdekäyrästä vakiosykloneille (tavallinen syklonityyppi). Hyötysuhdekäyrä on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8 Erotusaste partikkelikoon suhdeluvun funktiona tavalliselle vakiosyklonityypille
(Cooper & Alley, 1986. s. 112)

Erotusaste voidaan myös määrittää Lapplen yhtälöstä

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_p} \right)^2}. \quad (7)$$

Kokonaiserotusaste hiukkasaineen kokojakaumalle saadaan yhtälöllä

$$\eta = \sum \eta_j m_j, \quad (8)$$

missä η_j = erotusaste partikkelijakaumalle [%]

m_j = partikkelijakauman massaprosenttiosuus [%].

Erotusaste partikkelijakaumalle saadaan Lapplen yhtälön mukaisesti.

Sekoittuneelle virtaukselle erotusasteen yhtälö on

$$\eta = 1 - e^{-\eta_{tulpp}}. \quad (9)$$

5.1.2 Stokesin lain vaikutus erotusasteeseen

Oletetaan Stokesin lain voimassaolo

$$V = gD^2 \frac{(\rho_p - \rho_g)}{18\mu}, \quad (10)$$

jolloin erotusasteeksi tulppavirtaukselle saadaan

$$\eta = \frac{\pi N V_i D^2 \rho_p}{9W\mu}. \quad (11)$$

Vastaavasti sekoittuneelle virtaukselle

$$\eta = 1 - e^{-\eta_{\text{tuip}}} . \quad (12)$$

(De Nevers, 2000. s. 218, 258)

5.1.3 Painehäviö

Korkean erotusasteen saamiseksi kaasu pakotetaan kulkemaan syklonissa suurella nopeudella. Tämä johtaa kuitenkin suureen painehäviöön. Syklonin taloudellisen optimoinnin ja toimivuuden kannalta on tärkeää, ettei painehäviö kasva liian suureksi. Syklonien painehäviö vaihtelee yleensä välillä 250 – 4000 Pa (Ohlström, 1998. s. 39).

Painehäviö määritetään yhtälöllä

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_g V_i^2 H_v , \quad (13)$$

missä ΔP = painehäviö [Pa]
 H_v = vastuskerroin [-].

Vastuskerroin saadaan yhtälöllä

$$H_v = K \frac{HW}{D_e^2} , \quad (14)$$

missä K = syklonin rakenteesta ja käyttöolosuhteista johtuva kerroin [-]
 D_e = ulostulon halkaisija [m].

Tangentiaaliselle sisääntulolle, missä virtaava aine on kaasu, K vaihtelee välillä 12 – 18. Yleisesti ottaen K :n arvo asettuu vakiosykloneilla arvoon 16. Tästä seuraa, että vastuskertoimen H_v arvoksi muodostuu yleensä 8, joka on hyvin tyypillinen arvo sykloneille. (Cooper & Alley, 1986. s. 117)

5.2 Stairmandin menetelmä

5.2.1 Erotusaste

Stairmandin menetelmässä oletetaan leikkausrajahalkaisijan d_{pc} omaavien partikkeleiden, jotka pyörivät syklonissa maksimi tangentiaalisella nopeudella v_{Tmax} , olevan 50 % todennäköisyys tulla erotelluksi kaasusta. Stairmandin mukaan leikkausrajahalkaisijalle saadaan

$$d_{pc} = \frac{3}{V_i \Phi} \sqrt{\frac{\mu q_{v,g} D_e}{2\pi \rho_p (H_{kok} - S) D}}, \quad (15)$$

missä Φ = kitkahäviökerroin [-].

Kitkahäviökerroin voidaan määrittää yhtälöllä

$$\Phi = \frac{-\sqrt{\frac{D_e}{2(D-W)}} + \sqrt{\left[\frac{D_e}{2(D-W)}\right] + \left(\frac{4\Gamma A}{HW}\right)}}{\frac{2\Gamma A}{HW}}, \quad (16)$$

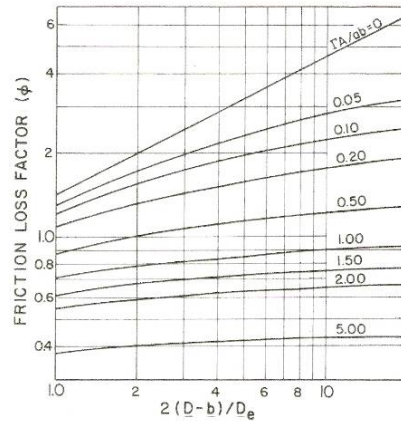
missä A = pinta-ala, joka altistuu savukaasulle [m²]

Γ = kitkavakio, kaasusykloneille $\Gamma=0,005$.

Savukaasulle altistuva pinta-ala saadaan määritettyä yhtälöllä

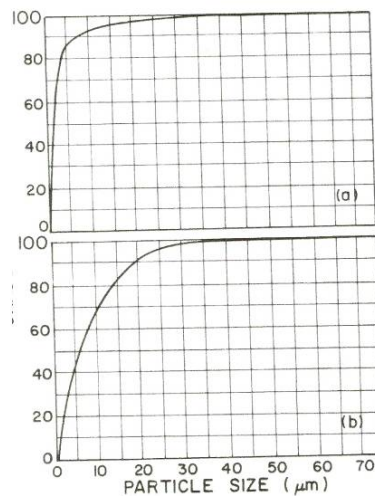
$$A = \frac{\pi(D^2 - D_e^2)}{4} + \pi D L_d + \pi D_e S + \frac{\pi(D + D_d)}{2} \sqrt{\left(L_s^2 + \left(\frac{D - D_d}{2}\right)^2\right)}. \quad (17)$$

Vaihtoehtoisesti kitkahäviökerroin Φ voidaan lukea Stairmandin kehittämästä kuvaajasta, joka on esitetty kuvassa 9.



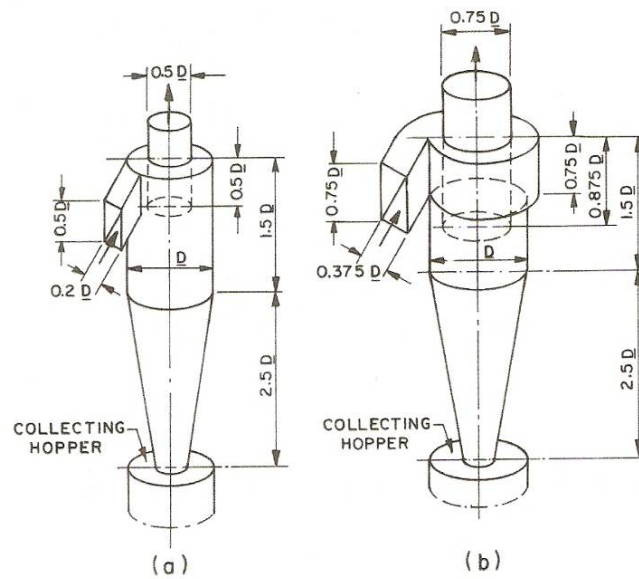
Kuva 9 Kitkahäviökerroin sisääntulosäteen funktiona vakiosykloneille
(Dullien, 1989. s. 61)

Erotusaste voidaan lukea eri partikkelihalkaisijoille riippuen syklonityypistä Stairmandin ja Kelseyn yhteistyönä suunnittelemissa korkeateho- tai suurläpivirtauscyclonin kuvaajista, jotka on esitetty kuvassa 10. Kuvaajia voidaan käyttää erotusasteen lukemiseksi, mikäli sykloniin tulevan virtauksen nopeus on likimain 15 m/s.



Kuva 10 Erotusaste partikkelikoon funktiona (a) korkeatehosyklonille ja (b) suurläpivirtauscyclonille
(Dullien, 1989. s. 63)

Kuvassa 11 on esitetty Stairmandin vakiosyklonin mittasuhteet korkeateho- ja suurläpivirtaustyyppin syklonille. Mitat on esitetty myös taulukossa 1.



Kuva 11 Stairmandin vakiosyklonin mittasuhteet (a) korkeatehotypille ja (b) suurläpivirtaustypille
(Dullien, 1989. s. 62)

5.2.2 Painehäviö

Stairmandin mukaan syklonin kokonaispainehäviö voidaan esittää yhtälöllä

$$\Delta p = \frac{\rho_g}{2} \left(V_i^2 \left\{ 1 + 2\Phi^2 \left[\frac{2(D-W)}{D_e} - 1 \right] \right\} + 2V_e^2 \right), \quad (18)$$

missä V_e = kaasun nopeus ulostulossa [m/s].

Kaasun nopeus ulostulossa saadaan yhtälöllä

$$V_e = \frac{4q_{v,g}}{\pi D_e^2}. \quad (19)$$

6 SYKLONIN MITOITUS 1,5 MW PUUHAKEKATTILALLE

Arinapolttoinen puuhakekattila on toimitettu vuonna 1987 ja sen tehoksi on mitattu 1,5 MW vuonna 2002. Hakkeen palakoko vaihtelee 20 – 50 mm välillä ja sen kosteuspitoisuudeksi on mitattu 25 – 36 %. Kaikkiaan haketta kuluu 3200 m³ vuodessa. Varalla on 1,2 MW kevytöljykattila.

Syklonin mitoituksen kannalta on oleellista tietää, paljonko polttoprosessi tuottaa savukaasua, eli mikä on savukaasun tilavuusvirta. Tämän selvittämiseksi määritetään ensin saatujen lähtötietojen ja kirjallisuusarvojen pohjalta polttoaineen koostumus, jonka jälkeen voidaan laatia palamistaulukko. Tuloksena saadaan savukaasun massavirta, josta tilavuusvirta saadaan määritettyä.

6.1 Polttoaineen koostumus

Taulukossa 2 on esitetty puuhakkeen pitoisuudet ja niiden keskiarvot pohjautuen alkuarvoina annettuihin tietoihin sekä alkuainekoostumus kuiva-aineesta (Raiko et.al.2002. s.137).

Taulukko 2 Puuhakkeen koostumus

Puuhake					
		ka	alkuainekoostumus	[m- %]d	valittu [m- %]d
palakoko [mm]	25 – 50	37,5	C	48 – 50	50
kosteus [m- %]	25 – 36	30,5	H	6 – 6,5	6,5
tuhka [m- %]d	0,4 – 0,5	0,45	N	0,5 – 2,3	2
			O	38 – 42	41,5
			S	0,05	0,05

Polttoaineen koostumus saadaan selville määrittämällä ensin kostean polttoaineen osuus,

$$m_{H_2O} = m_{tot} \cdot m - \%_{H_2O}, \quad (20)$$

missä m_{H_2O} = kostean polttoaineen massa [g]

m_{tot} = polttoaineen kokonaismassa [g]

m - %_{H₂O} = polttoaineen kosteuspitoisuus [%].

Näin ollen kuivan polttoaineen osuus saadaan yhtälöllä

$$m_d = m_{\text{tot}} - m_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (21)$$

missä m_d = kuivan polttoaineen massa [g].

Tuhkan osuus kuivasta polttoaineesta,

$$m_a = m_d \cdot m - \%_a, \quad (22)$$

missä m_a = tuhkan massa kuivassa polttoaineessa [g].

Palavan aineen osuudeksi saadaan näin ollen

$$m_{\text{pa}} = m_d - m_a, \quad (23)$$

missä m_{pa} = palavan polttoaineen massa [g].

Valitaan polttoainetta 1000 g. Polttoaineen massakoostumus yllä olevan laskennan mukaisesti on esitetty taulukossa 3. Laskennassa käytetyt puuhakkeen pitoisuudet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 3 Puuhakkeen massakoostumus

$m_{\text{tot}} = 1000\text{g}$ massaosuus	sijoitus yhtälöön	tulos [g]
$m_{\text{H}_2\text{O}}$	(20) $1000\text{g} \cdot 0,305$	305
m_d	(21) $1000\text{g} - 305$	695
m_a	(22) $695\text{g} \cdot 0,0045$	3,128
m_{pa}	(23) $695\text{g} - 3,128$	691,873

6.2 Palamistaulukko

Puun palamiseen liittyvät reaktioyhtälöt ovat:



Taulukossa 4 on esitetty puuhakkeen palamistaulukko ilmakertoimella $\lambda = 1,15$ (Huhtinen et.al.1997. s.77).

Taulukko 4 Puuhakkeen palamistaulukko ilmakertoimella $\lambda = 1,15$

	Lähtöaineet / kg					Savukaasut / kg				
	m- %	m[g]	M[g/mol]	n[mol]	$n_{O_2,st}$	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂
C	50	345,93	12,011	28,801	28,801	28,801				
	6,5	44,97	2,016	22,307	11,154		22,307			
H ₂	2	13,84	28,013	0,494					0,494	
N ₂	41,5	287,13	31,999	8,973	-8,973					
O ₂	0,05	0,346	32,066	0,011	0,011			0,011		
S	30,5	305	18,015	16,930			16,930			
	0,45	3,128								
H ₂ O										
tuhka										
Σ		1000			30,993	28,801	39,237	0,011	0,494	
typeä ilmassa: $n_{N_2} = \lambda \cdot 3,77 \cdot n_{O_2,st}$									134,370	
ylimääräinen happi: $n_{O_2,ylim} = (\lambda - 1) \cdot n_{O_2,st}$										4,649
						28,801	39,237	0,011	134,864	4,649
kosteaa savukaasua 207,562 mol/kg,pa										
kuivaa savukaasua 168,325 mol/kg,pa										

6.2.1 Polttoaineen massavirta

Kattilan mitattu teho on 1,5 MW. Puuhakkeen kuiva-aineen alempi lämpöarvo on 19,5 MJ/kg (Raiko et.al.2002. s.137). Polttoaineen massavirta saadaan kattilan tehon avulla yhtälöstä

$$P = q_i \cdot q_{m,pa} \quad (25)$$

missä P = kattilan teho [kW]
 q_i = polttoaineen alempi lämpöarvo [kJ/kg]
 $q_{m,pa}$ = polttoaineen massavirta [kg/s].

Polttoaineen massavirraksi saadaan näin ollen

$$q_{m,pa} = \frac{1500 \text{ kW}}{19,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,0769 \frac{\text{kg}}{\text{s}}.$$

6.2.2 Palamisilman massavirta

Tulevan ilman määrä on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5 Polttoprosessiin tulevan ilman määrä

	$n[\text{mol}]$	$M[\text{g/mol}]$	$m[\text{g}]$
O_2	$n_{O_2,ylim} + n_{O_2,st} = 35,642$	31,999	1140,508
N_2	$n_{N_2} = 134,370$	28,013	3764,107
			$\Sigma 4904,615$

Palamisilman massavirta saadaan, kun tiedetään polttoaineen massavirta:

$$q_{m,pi} = q_{m,pa} \cdot \Sigma m_i \quad (26)$$

missä $q_{m,pi}$ = palamisilman massavirta [kg/s]
 Σm_i = tulevan ilman määrä [kg].

Palamisilman massavirraksi saadaan

$$q_{m,pi} = 0,0769 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,904615 \text{kg} = 0,377 \frac{\text{kg}}{\text{s}}.$$

6.2.3 Savukaasun massavirta ja tilavuusvirta

Palamistaulukossa (taulukko 4) on selvitetty osasavukaasujen moolivirrat yhtä polttoainekiloa kohti. Taulukossa 6 on esitetty osasavukaasujen ainemäärät ja massavirrat todellista polttoaineen massavirtaa kohti. Tuloksena saadaan kostean savukaasun massavirta.

Taulukko 6 Osasavukaasujen ainemäärät ja massavirrat

Osasavukaasu	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂
n [mol/kg,pa]	28,801	39,237	0,011	134,864	4,649
M [g/mol]	44,010	18,015	64,065	28,013	31,999
m [kg/kg,pa]	1,268	0,707	0,0007	3,778	0,149
q_m	0,098	0,054	0,00005	0,291	0,011
$\Sigma q_{m,sk} = 0,45405 \text{ kg/s}$					

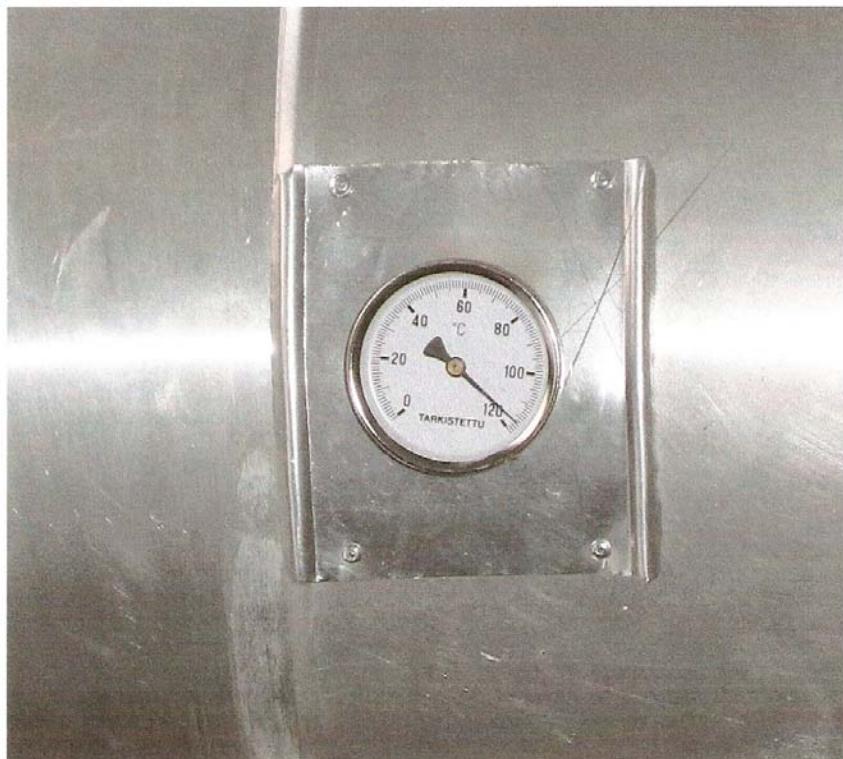
Savukaasu saapuu sykloniin lämpötilassa 118 °C (kuva 12). Tilavuusvirta saadaan yhtälöllä

$$q_{v,sk} = \frac{\Sigma q_{m,sk}}{\rho_{sk}}, \quad (27)$$

missä $q_{v,sk}$ = savukaasun tilavuusvirta [m³/s]
 ρ_{sk} = savukaasun tiheys [kg/m³].

Savukaasun tiheys voidaan lukea ilman aineominaisuustaulukosta normaalissa ilmakehän paineessa (Incropera et.al.2006. s. 941). Savukaasun tilavuusvirraksi saadaan

$$q_{v,sk} = \frac{0,45405 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,893402 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,508 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}.$$



Kuva 12 Savukaasun saapumislämpötila sykloniin

6.3 Mitoitus Lappelen menetelmällä

Valitaan mitoitusmenetelmäksi Lappelen perustyyppin sykloni (syklonityyppi tavallinen) ja oletetaan virtauksen olevan tulppamainen. Syklonin rakenne on esitetty kuvassa 6 ja mittasuhteet taulukossa 1. Oletetaan syklonin rungon halkaisijan olevan 0,5m ja sisääntulon tangentiaalinen, jolloin muut mitat ovat (taulukko 7):

Taulukko 7 Syklonin mitat Lappelen vakiosyklonille kun $D = 0,5\text{m}$

rungon halkaisija	D	0,5m
sisääntulon korkeus	H	0,25m
sisääntulon leveys	W	0,125m
ulostulon halkaisija	D_e	0,25m
sisäputken pituus	S	0,3125m
synterinin pituus	L_d	1m
kartion pituus	L_s	1m
pölypoiston halkaisija	D_d	0,125m

Savukaasun virtausnopeus sisääntulossa saadaan yhtälöllä (3),

$$V_i = 0,508 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1}{(0,25 \cdot 0,125)\text{m}} = 16,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Lentotuhkan tiheys on noin 1000 kg/m^3 (Lohja Rudus Oy). Partikkelikoko vaihtelee 10 – 70 μm välillä riippuen kattilan teholuokasta, palamisen täydellisyydestä ja ilmakertoimen suuruudesta. Pienhiukkaset ovat tyypillisesti koko luokkaa 0,1 – 0,3 μm . Arinapoltossa lentotuhkan osuus vaihtelee 5 – 40 % välillä kokonaistuhkan määrästä. (Ohlström, 1998. s. 28)

Partikkelin halkaisijaksi saadaan yhtälöllä (5)

$$d_p = \left(\frac{9 \cdot 226,158 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \cdot 0,125\text{m}}{\pi \cdot 6 \cdot 16,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (1000 - 0,893402) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{\frac{1}{2}} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 9,1 \mu\text{m}.$$

Leikkausrajahalkaisijaksi saadaan yhtälöllä (6)

$$d_{pc} = \left(\frac{9 \cdot 226,158 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \cdot 0,125\text{m}}{2\pi \cdot 6 \cdot 16,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (1000 - 0,893402) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{\frac{1}{2}} = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 6,4 \mu\text{m}.$$

Partikkelin halkaisijan ja leikkausrajahalkaisijan suhdeluksi saadaan näin ollen 1,42 ja erotusaste voidaan lukea Lappelen hyötysuhdekäyrästä (kuva 8). Erotusasteeksi saadaan 70 %.

Oletetaan vastuskertoimen H_v arvon olevan 8, jolloin syklonin painehäviöksi saadaan yhtälöllä (13)

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot 0,893402 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (16,3 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 8 = 949 \text{ Pa}.$$

Painehäviön arvo on hyväksyttävä (alle 4000 Pa) ja erotusaste riittävä.

6.4 Mitoitus Stairmandin menetelmällä

Valitaan mitoitusmenetelmäksi Stairmandin korkeatehotyyppin sykloni. Syklonin rakenne ja mittasuhteet ovat esitetty kuvassa 11(a). Oletetaan rungon halkaisijan olevan 0,6m ja sisääntulon tangentiaalinen. Tällöin muut mitat ovat (taulukko 8):

Taulukko 8 Syklonin mitat Stairmandin korkeatehotyyppin syklonille, kun $D = 0,6\text{m}$

rungon halkaisija	D	0,6m
sisääntulon korkeus	H	0,3m
sisääntulon leveys	W	0,12m
ulostulon halkaisija	D_e	0,3m
sisäputken pituus	S	0,3m
synterinin pituus	L_d	0,9m
kartion pituus	L_s	1,5m
pölypoiston halkaisija	D_d	0,225m

Savukaasun virtausnopeus sisääntulossa saadaan yhtälöllä (3),

$$V_i = 0,508 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1}{(0,3 \cdot 0,12)\text{m}} = 14,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Savukaasulle altistuva pinta-ala saadaan yhtälöllä (17),

$$A = \frac{\pi \cdot (0,6^2 - 0,3^2)\text{m}}{4} + \pi \cdot 0,6\text{m} \cdot 0,9\text{m} + \pi \cdot 0,3\text{m} \cdot 0,3\text{m} + \frac{\pi \cdot (0,6 - 0,225)\text{m}}{2} \cdot \sqrt{1,5^2 + \left(\frac{(0,6 - 0,225)\text{m}}{2}\right)^2} = 4,15\text{m}^2.$$

Luetaan kitkahäviökerroin kuvasta 7:

$$\frac{\Gamma A}{HW} = \frac{0,005 \cdot 4,15\text{m}^2}{(0,3 \cdot 0,12)\text{m}} = 0,576,$$

$$\frac{2(D - W)}{D_e} = \frac{2 \cdot (0,6 - 0,12)\text{m}}{0,3\text{m}} = 3,2,$$

jolloin kitkahäviökerroin Φ on likimain 1,1.

Leikkausrajahalkaisijaksi saadaan yhtälöllä (15)

$$d_{pc} = \frac{3}{14,1 \frac{m}{s} \cdot 1,1} \cdot \sqrt{\frac{226,158 \cdot 10^{-7} \frac{kg}{ms} \cdot 0,508 \frac{m^3}{s} \cdot 0,3m}{2\pi \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot (2,4 - 0,3)m \cdot 0,6m}} = 4,0 \cdot 10^{-6} m = 4,0 \mu m.$$

Puuhakkeen polton savukaasun partikkelihalkaisijan tiedetään vaihtelevan välillä 10 – 70 μm . Kuvasta 10(a) voidaan nähdä, että lähes 100 % erotusaste saavutetaan partikkelihalkaisijan ylittäessä arvon 35 μm . Mikäli partikkelihalkaisija on 10 μm , on erotusaste likimain 92 %. Tämän perusteella voidaan päätellä kokonaiserotusasteen olevan riittävä. Tarkempaan määrittämiseen tulisi tietää hiukkasaineen kokojakauma.

Painehäviön määrittämiseksi selvitetään ensin kaasun nopeus ulostulossa yhtälöllä (19),

$$V_e = \frac{4 \cdot 0,508 \frac{kg}{m^3}}{\pi \cdot (0,3m)^2} = 7,2 \frac{m}{s}.$$

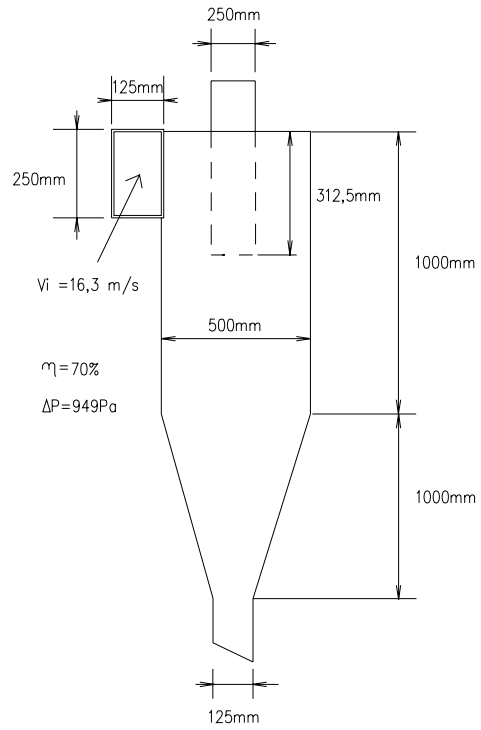
Painehäviöksi saadaan näin ollen yhtälöllä (18)

$$\Delta p = \frac{0,8934 \frac{kg}{m^3}}{2} \left((14,1 \frac{m}{s})^2 \left\{ 1 + 2 \cdot 1,1^2 \left[\frac{2 \cdot (0,6 - 0,12)m}{0,3m} - 1 \right] \right\} + 2 \cdot (7,2 \frac{m}{s})^2 \right) = 608 Pa.$$

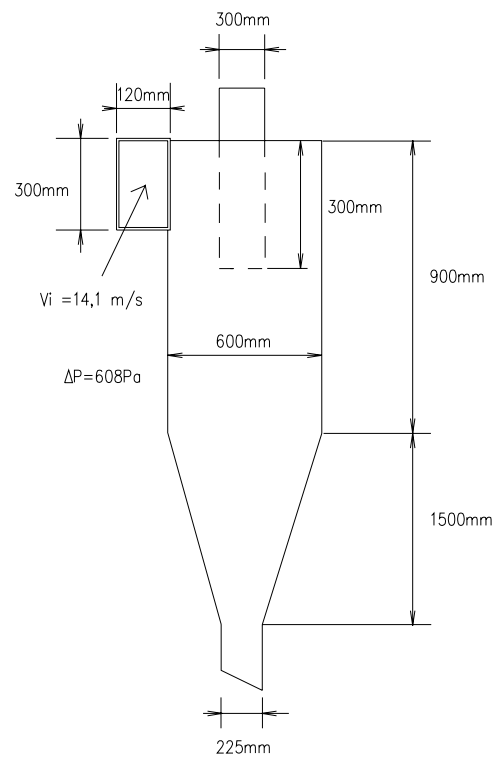
Saatu painehäviön arvo on alle sallitun ylärajan (4000 Pa), joten arvo on hyväksyttävä.

7 TULOKSET

Syklonin mitoituksen tulokset kahdella eri mitoitusmenetelmällä on esitetty kuvissa 13 ja 14. Lapplen menetelmällä saatiin painehäviöksi 949 Pa ja vastaavasti Stairmandin menetelmällä 608 Pa. Erotusasteeksi saatiin Lapplen menetelmällä noin 70 %, Stairmandin menetelmällä tarkkaa arvoa ei voida sanoa.



Kuva 13 Vakiosykloni mitoitettuna Lapplén menetelmällä



Kuva 14 Vakiosykloni mitoitettuna Stairmandin menetelmällä (korkeateho)

8 SOVELTUMINEN BIOPOLTTOAINEKATTILOIHIN

Syklonierottimen soveltumisen eri kattilatyypeille määrää palamisprosessissa syntyvien partikkeleiden koko. Syklonierotin sopii ensisijaiseksi erottimeksi prosesseihin, joissa syntyvien partikkeleiden keskikoko on melko suuri, alkaen 5 µm ylöspäin. Partikkelikoon laskiessa alle 5 µm syklonin erotusaste huononee selvästi. Mikäli sykklonia käytetään prosesseissa, joissa partikkelikoko vaihtelee voimakkaasti, tulee syklonierottimen jälkeen ensisijaisena erottimena olla jokin muu erotin, kuten sähkösuodatin. (Hoffmann & Stein. 2002. s. 4)

8.1 Leijupetikattilat

Kiertopetikattiloissa (CFB) ja kupliva peti - kattiloissa (BFB) palamislämpötila on melko alhainen ja syötettävän polttoaineen partikkelikoko melko suuri (ilmanpaineinen poltto). Biopolttoaineita poltettaessa alle 1 µm partikkeleita esiintyy vain, kun polttoaineen sisältämä tuhka sisältää runsaasti haihtuvia aineita.

Puupolttoaine sisältää mm. klooria (Cl) ja rikkiä (S), jotka kaasuuntuvat helposti leijupoltossa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että ne poistuvat kattilasta kaasumaisessa olomuodossa, mutta alkavat tiivistyä ja muodostaa pienhiukkasia savukaasun jäähtyessä.

Leijupoltossa kattilan jälkeinen hiukkaspitoisuus on korkea, tuhkasta 80 – 100 % lähtee lentoon muodostaen niin kutsuttua lentotuhkaa. Palamattoman polttoaineen osuus partikkeleista on kuitenkin biopolttoaineilla alle 10 %. Puunpolton hiukkaspitoisuus on noin 2 – 6 g/m³n.

Kiertopetikattiloissa sykklonia käytetään erottelemaan poltossa kiertävä petiaines, joka on yleensä hiekkaa, ja palauttamaan sen kattilaan. Erotusprosessissa kattilaan palautuu kiertoaineen lisäksi palamatonta polttoainetta ja lentotuhkaa. Varsinaisena savukaasun puhdistajana käytetään yleensä sähkösuodatinta. (Ohlström, 1998. s. 26 - 28)

8.2 Arinakattilat

Alle 5 MW yksiköissä arinapoltto on yleinen kiinteiden polttoaineiden polttomenetelmä. Palamislämpötila on melko alhainen kuten leijupoltossa eikä kaasuuntumista juurikaan tapahdu. Tämän seurauksena partikkelikoko on melko suuri, noin 60 – 70 µm.

Palamattoman aineksen osuus saattaa vaihdella polton aikana suurestikin ollen biopolttoaineilla yleensä 40 – 60 % kiintoaineesta. Polttoaineen tuhkasta 5 – 40 % poistuu lentotuhkana. Lentoon lähtevien tuhka- ja polttoainepartikkeleiden määrä riippuu polttoaineen partikkelikoosta ja kaasun virtausnopeudesta polttoainekerroksen pinnassa. Arinakattiloiden savukaasujen hiukkaspitoisuudet vaihtelevatkin runsaasti, mitatut arvot puunpoltolle ovat välillä 0,5 - 10 g/m³n.

Vaihtelevista palamisolosuhteista johtuen arinakattiloissa voi muodostua runsaasti nokihiukkasia, jotka ovat pääosin partikkelikooltaan alle 1 µm pienhiukkasia. Arinapoltossa pyritäänkin suhteellisen korkeaan polton ilmakertoimeen, jolloin savukaasun hiukkasmateriaali koostuu pääosin tuhkasta. Tämä mahdollistaa syklonierottimen käytön savukaasun puhdistajana, ja se on myös yleisin savukaasun puhdistaja arinapoltossa. (Ohlström, 1998. s. 28 – 30)

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Syklonierotin on melko vanha keksintö, mutta sen monikäyttöisyys ja edulliset ylläpitokustannukset ovat pitäneet sen pinnalla. Varsinaisena savukaasun puhdistajana sykloni on toimiva vanhemmilla kattilamalleilla, kuten arinakattiloilla, joissa polton seurauksena syntyy riittävän suuren partikkelihalkaisijan omaavia hiukkasia ja näin ollen saavutetaan hyvä erotusaste. Useissa polttoprosesseissa palamisessa syntyvien partikkeleiden koko on liian pieni, jotta syklonilla saavutettaisiin riittävä tehokkuus. Luonnollisesti syklonin käyttöä rajoittaa myös nykyiset tiukentuneet päästömääräykset, jolloin savukaasunpuhdistajilta vaaditaan tehokasta erotuskykyä myös pienpartikkeleiden suhteen. Syklonin käyttömahdollisuudet tulevaisuudessa ovatkin enemmissä määrin muualla kuin savukaasunpuhdistajana. Esierottimena sykloni on savukaasunpuhdistajana käyttökelpoinen, mutta vaatii toiseksi erottimeksi paremmin pienhiukkasia poistavan erottimen, kuten esimerkiksi sähkösuodattimen.

Biopolttoainekattiloiden suhteen sykloni sopii savukaasun puhdistajaksi lähinnä puuta polttoaineena käytävälle arinakattilalle, jossa saavutetaan riittävä partikkelikoko. Biopolttoaineiden kulutus on vahvassa kasvussa ja myös uusia tapoja tuottaa biopolttoaineita etsitään koko ajan. Syklonin käyttömahdollisuudet tällä sektorilla ovat avoimina, ja varmasti monipuolisuutensa vuoksi varsin hyvät.

Syklonin tehokkuutta pystytään lisäämään kytkemällä useampi sykloni peräkkäin. Näin syntyvää kokonaisuutta kutsutaan multisykloniksi. Tällä tavoin saavutetaan oleellisesti suurempi kokonaiserotusaste, mutta samalla painehäviö kasvaa merkittävästi. Painehäviön merkitys on lähinnä taloudellinen; suuri painehäviö tarkoittaa suurempaa puhaltimen sähkötehontarvetta ja sitä kautta nostaa syklonin ylläpitokustannuksia. Rakenteellisia vaikutuksia syklonille painehäviöstä ei ole.

Sähkötehontarve voidaan laskea yksinkertaisella yhtälöllä

$$P_{el} = \frac{P_{sykl}}{\eta_{mp}} = \frac{HWV_i \Delta p}{\eta_{mp}}, \quad (28)$$

missä η_{mp} = puhaltimen ja moottorin yhteinen hyötysuhde,

ja jonka tiedetään olevan noin 60 %.

Määritetään sähkötehotarve mitoitetuille sykloneille. Sijoittamalla Lapplen menetelmällä mitoitettujen syklonin arvot saadaan

$$P_{el} = \frac{0,25m \cdot 0,125m \cdot 16,3 \frac{m}{s} \cdot 949Pa}{0,6} = 806W .$$

Vastaavasti Stairmandin menetelmän syklonille saadaan

$$P_{el} = \frac{0,3m \cdot 0,12m \cdot 14,1 \frac{m}{s} \cdot 608Pa}{0,6} = 514W .$$

Tuloksesta nähdään, että Stairmandin menetelmällä mitoitettu korkeatehotyyppin sykloni on sähkönkulutukseltaan pienempi ja siten edullisempi vaihtoehto. Tämä voidaan nähdä suoraan vertaamalla painehäviöitä: Stairmandin menetelmällä mitoitettujen syklonin painehäviön arvo on noin 340 Pa pienempi kuin Lapplen menetelmällä mitoitettujen syklonin.

Stairmandin menetelmä antaa erotusasteen vain tietyille partikkelin halkaisijoille. Kokonaiserotusasteen määrittämiseksi tulisi tietää hiukkasaineen kokojakauma. Myös Lapplen antama erotusaste saataisiin tällöin määritettyä tarkemmin. Valitettavasti tietoa ei ollut saatavilla. Laskennan puitteissa todettiin Stairmandin erotusasteen olevan riittävä vertaamalla yksittäisiä partikkelihalkaisijoita ja niiden antamaa erotusastetta. Tämän perusteella voitaisiin sanoa kokonaiserotusasteen olevan lähes 95 %, olettaen massaosuuksien olevan likimain samat. Todellisuudessa tämä ei kuitenkaan toteudu, eikä kokonaiserotusastetta voida näin ollen tarkasti määrittää.

Mitoitusmenetelmän valinnassa lähtökohtana on palamisprosessissa syntyvien partikkeleiden kokojakauma ja savukaasun tilavuusvirta. Optimaalisimman rakenteen saavuttamiseksi tulisi tutkia rungon halkaisijan vaikutusta erotusasteeseen ja painehäviöön muuttamalla sen arvoa, jolloin myös muut mitat muuttuvat. Painehäviö määrittää osaltaan erotusasteen, kuten jo todettiin, kasvamalla samalla kun erotusaste paranee. Optimaalisin rakenne saavutetaan, kun painehäviö on vielä sallituissa rajoissa ja erotusaste on riittävän korkea. Syklonien mitoitus tehtiin havainnollistamaan kahta mitoitusmenetelmää ja saadut tulokset hyväksyttiin niiden saavuttaessa kohtuulliset arvot. Saadut tulokset vaikuttavat realistisilta.

LÄHDELUETTELO

Alley, F.C & Cooper, David C. 1986. Air pollution control a design approach. Yhdysvallat. 629 s. ISBN 0-88133-521-5

De Nevers, Noel. 2000. Air pollution control engineering. Singapore: McGraw-Hill Higher Education. 586 s. ISBN 0-07-116207-0

Dullien, F.A.L. 1989. Introduction to industrial gas cleaning. Yhdysvallat. 285 s. ISBN 0-12-223652-1

Hoffmann, A.C & Stein, L.E. 2002. Gas cyclones and swirl tubes. Saksa: Springer – Verlag Berlin Heidelberg. 334 s. ISBN 3-540-43326-0

Huhtinen, Markku, Kettunen, Arto, Nurminen, Pasi & Pakkanen, Heikki. 1997. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab. 316 s. ISBN 951-37-1327-X

Incropera, Frank P. Dewitt, David P. Bergman, Theodore L. & Lavine, Adrienne S. 2006. Fundamentals of heat and mass transfer. Yhdysvallat. 997s. ISBN –10: 0-471-45728-0

Lohja Rudus Oy. Lentotuhkan ominaisuudet ja koostumus.

Saatavissa: <http://www.lohjarudus.fi/kierratys/default.asp?cat=5&va=15&vb=93>

Ohlström, Mikael. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 147 s. ISBN 951-38-5403-5

Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1934.pdf>

Raiko, Risto, Saastamoinen, Jaakko, Hupa, Mikko & Kurki-Suonio, Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 750s. ISBN 951-666-604-3