



# Voimalaitosten savukaasujen jälkikäsittelymenetelmät

Samuel Mukari

OPINNÄYTETYÖ  
Kesäkuu 2025

Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

MUKARI, SAMUEL:

Voimalaitosten savukaasujen jälkikäsittelymenetelmät

Opinnäytetyö 44 sivua  
Kesäkuu 2025

---

Opinnäytetyö tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun toimeksiannosta. Työn aiheena oli tarkastella fossiilisia polttoaineita käyttävien voimalaitosten savukaasupäästöjen jälkikäsittelymenetelmiä. Työ rajattiin käsittelemään savukaasun sisältämistä päästöistä  $SO_x$ -,  $NO_x$ - ja pienhiukkasia. Työ toteutettiin kirjallisuustyönä, jota on tarkoitus käyttää kurssimateriaalina tulevaisuudessa alkavalla uudella opintojaksolla.

Työn tuloksena syntyi yleiskatsaus menetelmistä, jotka ovat käytössä kyseisten kaasujen jälkikäsittelyssä. Katsauksessa käsiteltiin yleisellä tasolla savukaasujen koostumusta ja niitä koskevaa lainsäädäntöä EU:ssa. Tämän jälkeen tarkasteltiin yleisimpiä käytössä olevia menetelmiä  $SO_x$ -,  $NO_x$ - ja pienhiukkasten päästöjen poistoon savukaasusta, kuten märkä- ja kuivapesureita, SCR- ja SNCR-järjestelmiä ja sähköstaattisia erottimia ja syklonierottimia. Lisäksi työn lopussa tarkasteltiin kehitteillä olevia menetelmiä, kuten fotokatalyyttisistä  $NO_x$ -absorptiomenetelmää ja pienhiukkasten agglomeraatiota.

Johtopäätöksenä voidaan todeta savukaasujen jälkikäsittelyn olevan olennainen osa kestävästä energiantuotantoa. Menetelmävaihtoehtoja tiettyä päästöä varten on useita. Sopivan menetelmän valinta ei perustu tehokkuuteen, vaan siihen vaikuttavat merkittävästi taloudelliset ja rakenteelliset tekijät. Työstä rajautui kokonaan pois esikäsittelymenetelmät, mikä voisi avata hyvän mahdollisuuden jatko-tutkimukselle.

---

Asiasanat: savukaasu, voimalaitos, jälkikäsittelymenetelmä

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Bioproduct Engineering

MUKARI, SAMUEL:  
Flue Gas After-Treatment Methods in Power Plants

Bachelor's thesis 44 pages  
June 2025

---

The purpose of this thesis was to examine after-treatment methods used for flue gases in fossil fuel-based power plants. The study focused specifically on sulphur oxides (SO<sub>x</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), and particulate matter, which are among the most harmful components of flue gas. The work was carried out as a literature review and is intended to be used as course material in a future course.

As a result, a general overview of the technologies currently used in the after treatment of these gases was produced. The review introduced the basic composition of flue gases and presented relevant legislation within the European Union. Subsequently, the most common methods used for the removal of the particulate emissions addressed in the study were examined, including wet and dry scrubbers, selective catalytic reduction (SCR), selective non-catalytic reduction (SNCR), electrostatic precipitators and cyclone separators. Emerging methods, such as photocatalytic NO<sub>x</sub> absorption and particle agglomeration, were also discussed briefly at the end of thesis.

It was concluded that flue gas after-treatment is a vital component of sustainable energy production and various methods are available for each emission type. Pre-treatment methods were excluded from the scope of this thesis, which could present an opportunity for future study.

---

Key words: flue gas, power plant, after-treatment method

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	SAVUKAASUT .....	7
	2.1 Savukaasun koostumus .....	7
	2.2 Lainsäädäntö EU:ssa .....	8
3	RIKKIOKSIDIEN PUHDISTUSMENETELMÄT .....	10
	3.1 SO <sub>x</sub> -päästönä .....	10
	3.2 Märkäpesurit .....	10
	3.3 Kuivapesurit .....	14
	3.3.1 Rotaatiosumuttimet.....	15
	3.3.2 Kaksoisneste-suutinsumutin .....	16
4	TYPPIOKSIDIEN PUHDISTUSMENETELMÄT .....	18
	4.1 NO <sub>x</sub> -päästönä .....	18
	4.2 SCR .....	18
	4.3 SNCR.....	21
5	PIENHIUKKASTEN PUHDISTUSMENETELMÄT .....	24
	5.1 Pienhiukkaset päästönä .....	24
	5.2 Syklonierottimet.....	24
	5.3 Sähköstaattiset pölynerottimet .....	26
	5.4 Kangassuodattimet .....	30
	5.5 Märkäkeräimet .....	34
6	UUDET JA KEHITTEILLÄ OLEVAT MENETELMÄT .....	38
	6.1 Fotokatalyyttinen NO <sub>x</sub> -absorptiotekniikka .....	38
	6.2 Pienhiukkasten agglomeraatio .....	39
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	43
	LÄHTEET.....	44

**LYHENTEET JA TERMIT**

Absorptio	Aineen imeytyminen toiseen aineeseen
ESP	Sähköstaattinen pölynerotin
FGD	Savukaasun rikinpoistoprosessi
IED	Teollisuuspäästädirektiivi
IEPR	Teollisuuden päästöjen suorituskykyraportti
PM	Pienhiukkanen
SCR	Selektiivinen katalyyttinen pelkistys
SNCR	Selektiivinen ei-katalyyttinen pelkistys

## 1 JOHDANTO

Palamisprosesseissa syntyvää kaasua kutsutaan savukaasuksi. Etenkin teollisuuden palamisprosesseissa syntyvän savukaasun sisältämistä yhdisteistä monet ovat ilmansaasteita, mitkä aiheuttavat merkittäviä haittoja ihmisille ja luonnolle. Teollisuusaloista energiateollisuus tuottaa maailmanlaajuisesti merkittävimmän määrän ilmansaasteista, mikä johtuu pääasiallisesti fossiilisiin polttoaineisiin perustuvasta energiantuotannosta. Tämän takia opinnäytetyön aihe keskittyy fossiilisia polttoaineita käyttävien voimalaitosten tuottamien savukaasujen käsittelymenetelmiin.

Työn tavoitteena on perehtyä voimalaitosten käyttämiin savukaasujen jälkikäsittelymenetelmiin vastaten kysymykseen siitä, millä menetelmillä savukaasuja puhdistetaan teollisuudessa. Työstä on rajattu pois hiilidioksidi keskittyen pääosin SO<sub>x</sub>-, NO<sub>x</sub>- ja pienhiukkaspäästöihin. Työssä ei myöskään käsitellä ollenkaan päästöjen muodostumisen estämistä palamisprosessin aikana eli esikäsittelymenetelmiä. Työn muotona toimii kirjallisuustyö, jota käytetään kurssimateriaalina tulevana syksynä alkavalla uudella voimalaitostekniikka-opintojaksolla.

## 2 SAVUKAASUT

### 2.1 Savukaasun koostumus

Savukaasu on palamisprosessissa syntyvä kaasu, joka sisältää polttoaineen ja ilman reaktiotuotteita sekä epäpuhtauksia, kuten pienhiukkasia ja rikkidioksiedeja ja typpioksiedeja (Speight 2019, 78–79). Nämä savukaasujen pääkomponentit esitellään taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Savukaasujen pääkomponentit ja niiden kuvaukset (Speight 2019, 79, mukailen)

Komponentti	Kuvaus
Typpi (N <sub>2</sub> )	Pääkomponentti palamisilmassa. Muodostaa typen oksideja, vaikka ei osallistu suoraan palamiseen.
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	Muodostuu kaikissa palamisprosesseissa. Hajuton ja väritön kaasu.
Vesihöyry (H <sub>2</sub> O)	Muodostuu polttoprosessissa polttoaineen vedyn reagoimalla hapen kanssa. Ilmentyy savukaasussa kosteutena tai kondensaationa riippuen lämpötilasta.
Happi (O <sub>2</sub> )	Palamisprosessissa reagoimatta jäänyt happi. Käytetään palamisen tehokkuuden havainnollistamisessa.
Hiilimonoksidi (CO)	Muodostuu hiilipohjaisten polttoaineiden epätäydellisessä palamisessa. Hajuton, väritön ja myrkyllinen kaasu.
Typen oksidit (NO <sub>x</sub> )	Syntyvät, joko polttoaineen tai palamisilman typen reagoimalla hapen kanssa.
Rikkidioksidi (SO <sub>2</sub> )	Syntyy polttoaineen rikin hapettuessa. Reagoi veden kanssa muodostaen rikkihappoa ja – hapoketta. Pistävän hajuinen, väritön ja myrkyllinen kaasu.
Rikkivety (H <sub>2</sub> S)	Syntyy joissain teollisuusprosesseissa, mutta esiintyy pääasiassa fossiilisissa polttoaineissa. Pahanhajuinen ja myrkyllinen kaasu.
Hiilivedyt	Ryhmä yhdisteitä, mitkä koostuvat hiilestä ja vedystä. Esiintyvät pääasiassa fossiilisissa polttoaineissa, mutta niitä syntyy myös epätäydellisen palamisen seurauksena.
Vetyyanidi (HCN)	Esiintyy jättepolttolaitoksen savukaasuissa. Todella myrkyllinen neste, millä on alhainen kiehumispiste.
Ammoniakki (NH <sub>3</sub> )	Voi esiintyä savukaasussa ylijäämänä typpioksidien puhdistusjärjestelmän jälkeen.
Vetyhalidit (HCl, HF)	Syntyvät jätteenpolton yhteydessä. Pystyvät muodostamaan kostean ilman kanssa voimakkaita happoja.
Kiinteät hiukkaset (pöly, noki)	Muodostuvat kiinteiden tai nestemäisten polttoaineiden palamattomista komponenteista. Näitä voivat olla esim. kivihiilen palamisessa alumiinin ja kalsiumin oksidit.

Savukaasun koostumukseen vaikuttavat käytetty polttoaine ja palamisolosuhteet. Esimerkiksi hiilipohjaisten polttoaineiden palamisessa syntyy merkittäviä määriä rikkijohdannaisia, sillä yli 90 % polttoaineen sisältämästä rikistä hapettuu rikkidioksidiksi. Jätteitä poltettaessa yhdessä muiden polttoaineiden tai yksin voi savukaasussa esiintyä suolahappoa, vetyfluoridia ja raskasmetalliyhdisteitä. (Speight 2019, 78–79.)

Savukaasujen komponenteista monet, ovat ilmansaasteita. Tämän takia savukaasujen päästöjä säädellään eri maissa ympäristölainsäädännön mukaisesti. Erityisesti pienhiukkasille, rikkidioksidille ja typpioksidoille on asetettu raja-arvoja. Säännösten mukaisten raja-arvojen saavuttamiseksi palamisjärjestelmiin asennetaan savukaasujen puhdistusjärjestelmiä. (Speight 2019, 78–79.)

## **2.2 Lainsäädäntö EU:ssa**

Saasteet, ovat haitallisia terveydelle ja ympäristölle. Ne aiheuttavat merkittävän määrän ympäristöperäisiä sairauksia ja ennenaikaisia kuolemia. Ne myös vaikuttavat merkittävästi luonnon monimuotoisuuden katoamiseen. Teollisuus tuottaa merkittävän osan näistä saasteista. Teollisuuden tuottamia saasteita ovat muun muassa pienhiukkaset, typen oksidit, rikkidioksidit, ja kasvihuonekaasut. (European Commission n.d. a.)

Teollinen toiminta on tärkeää koko Euroopan taloudelle. Teollinen toiminta myös aiheuttaa noin 50 % Euroopan kokonaispäästöistä, minkä takia teollisuuden päästöjä säännellään koko Euroopan laajuisella lainsäädännöllä, mikä on yksi osa nollapäästötoimintasuunnitelmaa. Lainsäädännön alaisuuteen kuuluu Euroopassa yli 50 000 teollisuuslaitosta. Tämän lainsäädännön osa-alueisiin kuuluvat muun muassa IED, IEPR ja MCPD. (European Commission n.d. b.)

Keskeisimpänä direktiivinä lainsäädännössä on IED. Se on EU:n päästädirektiivi liittyen teollisuus- ja kotieläintuotantoon. Vuonna 2024 julkaistiin paranneltu versio IED 2.0. Direktiivi tulee voimaan vaiheittain vuoteen 2030 mennessä. Direktiivin päätavoitteena on vähentää saasteiden vaikutusta ihmisten terveyteen

ja luontoon EU:n alueella. Tämän direktiivin alaisuuteen kuuluu 37 000 teollisuuslaitosta ja 38 500 sika- ja siipikarjalaitosta, mutta uuden IED 2.0 myötä direktiivin alaisuuteen kuuluvat myös metallilouhokset, akkujen gigatehtaat ja kaatopaikat. Suurille polttolaitoksille (LCP) on direktiivissä asetettu erityisiä säännöksiä, sillä ne tuottavat merkittävän osan ilmansaasteista. Direktiivissä asetetaan vähimmäisvaatimuksia suurille polttolaitoksille liittyen päästöjen raja-arvoihin, yhdistämissääntöihin ja päästöjen seurantaan. (European Commission n.d. c.)

Teollisuuspäästöportaali asetusta (IEPR) määrittää teollisuuslaitosten lakisääteiset raportointi vaatimukset. Tämä asetusta tuli voimaan vuoden 2024 aikana korvaten vanhan asetuksen (E-PRTR). Asetuksella pyritään lisäämään avoimuutta teollisuuslaitosten päästöistä ja resurssien käytöstä. Portaalista voidaan seurata tärkeitä ympäristötietoja EU jäsenmaiden lisäksi myös Liechtensteinista, Norjasta, Islannista, Sveitsistä, Serbiasta ja Isosta-Britanniasta. Ympäristötietojen lisäksi portaalista löytyy muun muassa saasteaineiden lakisääteiset raja-arvot päästettyinä veteen, ilmaan tai maaperään. (European Commission n.d. d.)

MCDP on direktiivi liittyen keskikokoisiin polttolaitoksiin (< 50 MW). EU:ssa toimii noin 143 000 keskikokoista polttolaitosta. Laitoksia käytetään sähkön tuotannossa, kiinteistöjen lämmityksessä tai viilennyksessä ja teollisuuden prosesseissa. Nämä laitokset kuten suuret polttolaitokset tuottavat merkittävän määrän ilmaaasteita, kuten typen oksideja ja rikkidioksideja. Direktiivin tarkoituksena on rajoittaa näiden laitosten tuottamia ilmansaasteita ja antaa mahdollisuus jäsenvaltioille tehdä tiukempia päästörajoituksia alueilla, missä rajoituksilla voidaan parantaa ilmanlaatua kustannustehokkaasti. Direktiivin tarkoituksena on myös antaa tietoa jäsenvaltioille parhaimmista teknologioista päästöjen vähentämiseen sidosryhmien välityksellä. (European Commission n.d. e.)

### 3 RIKKIOKSIDIEN PUHDISTUSMENETELMÄT

#### 3.1 SO<sub>x</sub> -päästönä

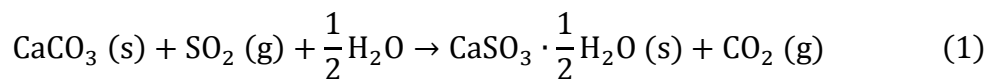
SO<sub>x</sub> -päästöt koostuvat pääasiassa rikkidioksidista (SO<sub>2</sub>) ja pienestä määrästä rikkitrioksidia (SO<sub>3</sub>). Rikkidioksidi on väritön, syttymätön kaasu, mutta ihmisen makuaisti pystyy havaitsemaan sen jo 0,1–1,0 ppmv (miljoonasosaa tilavuuskoh- taisesti) pitoisuuksilla ilmasta. Suuremmilla yli 3,0 ppm pitoisuuksilla kaasusta tu- lee pistävän hajuista. Rikki esiintyy pääasiassa kolmessa muodossa kivihiilessä, pyriittinä, orgaanisesti sitoutuneena ja sulfaatteina. Palamisen aikana pyriitin si- sältämä rikki ja hiileen orgaanisesti sitoutunut rikki hapettuvat muodostaen SO<sub>x</sub> - yhdisteitä. (Miller 2015, 198–199.)

Ilmakehään päästyään osa rikkidioksidista muuntuu rikkitrioksidiksi tai rikkiha- poksi fotokemiallisissa tai katalyyttisissä reaktioissa. Rikkiyhdisteiden aiheuttama haitta ympäristölle on merkittävää. Ne aiheuttavat näkyvyyden heikkenemistä, vaurioita kasvillisuudelle ja happosateita. (Miller 2015, 198.)

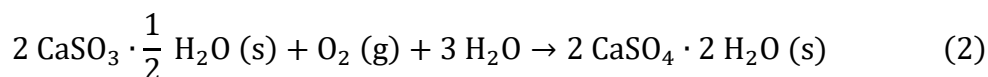
Tämän takia SO<sub>x</sub> -päästöjen hallintaan on kehitetty monia tekniikoita. Päästöjä pyritään hallitsemaan ennen palamista vähärikkisillä polttoaineilla tai puhdistam- malla kivihiiltä rikkipitoisista yhdisteistä. Savukaasusta puhdistetaan rikkiä FGD- järjestelmillä, mitkä jaetaan yleisesti kahteen järjestelmään märkäpesureihin ja kuivapesureihin. (Miller 2015, 198–200.)

#### 3.2 Märkäpesurit

Märkäpesurijärjestelmä saa nimensä siitä, että se tuottaa märkää jätettä rikin- poiston seurauksena (Woodruff, Lammers & Lammers 2017, 628). Yleinen va- linta menetelmäksi on kalkkikivipohjainen FGD -järjestelmä. Järjestelmässä on suljettu jätekierto, missä syntyneet kiinteät aineet poistetaan lietteenä. Tästä jäl- jelle jäänyt vesi kierrätetään uudelleen järjestelmässä. Märkäpesuprosessin toi- minta perustuu absorptiotornissa savukaasun joukkoon suihkutettuun kalkkikivi- lietteeseen, minkä emäksinen kiinteä kalsiumkarbonaatti reagoi kaasun rikkidiok- sidin kanssa absorptioreaktiossa seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



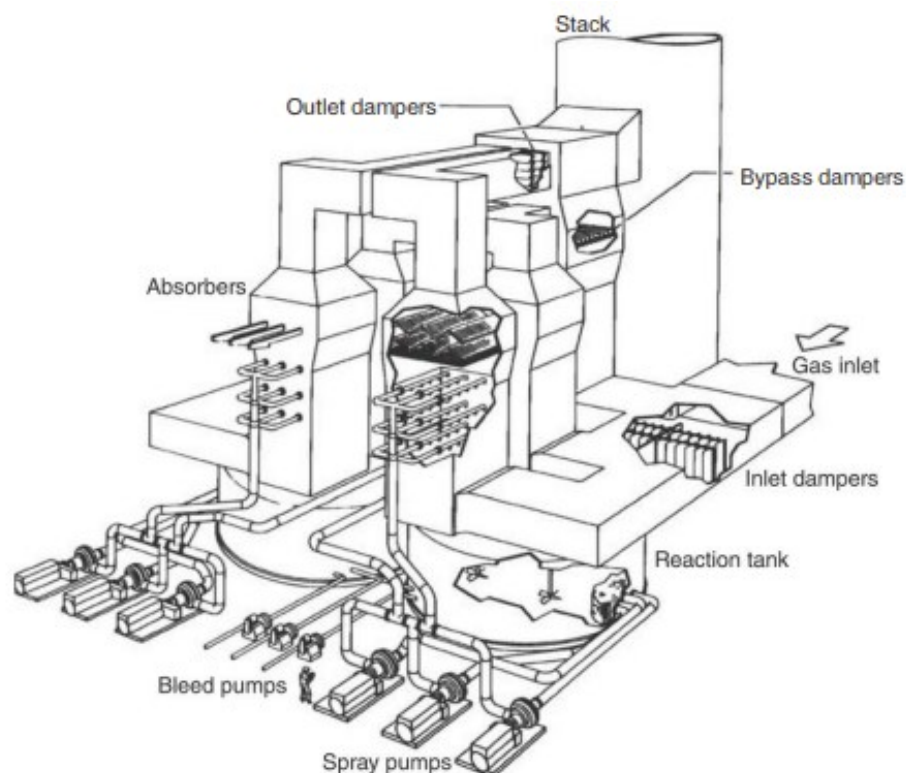
Reaktiossa 1 muodostuu reaktiotuotteena kidevedellistä kalsiumsulfittiä hiilidioksidin lisäksi. (Rackley 2017, 60.) Toisena vaihtoehtona on järjestelmä, missä saadaan syntynyt kalsiumsulfitti pakotettua hapettumaan reaktioyhtälön



mukaisesti, jolloin reaktiotuotteena muodostuu kidevedellistä kalsiumsulfaattia eli kipsiä. Tämän avulla muunnetaan hyödytön jäte hyödylliseksi sivutuotteeksi esimerkiksi rakennusteollisuuteen tai ympäristöystävällisemmäksi jätteeksi kaatopaikoille. (Rackley 2017, 60.)

Kalkkikiven lisäksi märkäpesuprosessin sorbenttina voidaan käyttää muita emäksisiä sorbentteja, kuten magnesiumhydroksidia. Käyttäessä tätä sorbenttina reaktiossa syntyy magnesiumsulfaattia, mikä voidaan regeneroida kuumentamalla hyödylliseksi sivutuotteeksi rikkihapoksi. (Rackley 2017, 60.)

Tyypillinen märkäpesuri järjestelmä koostuu tornista, reaktio- tai pidätystankista, sekoittimista, pumpuista ja putkistoista. Järjestelmässä savukaasu syötetään absorptiotorniin pohjan kautta (kuvio 1). Tornissa savukaasu kulkee ylöspäin suihkuttimien läpi, missä tapahtuu kontakti kalkin tai kalkkikivilietteen kanssa. Ennen piippuun kulkeutumista puhdistettu savukaasu menee vielä usvanerotin läpi. Menetelmän puhdistusprosentti on yli 90 %, mutta tämä riippuu järjestelmän rakenteesta. (Woodruff ym. 2017, 629.)

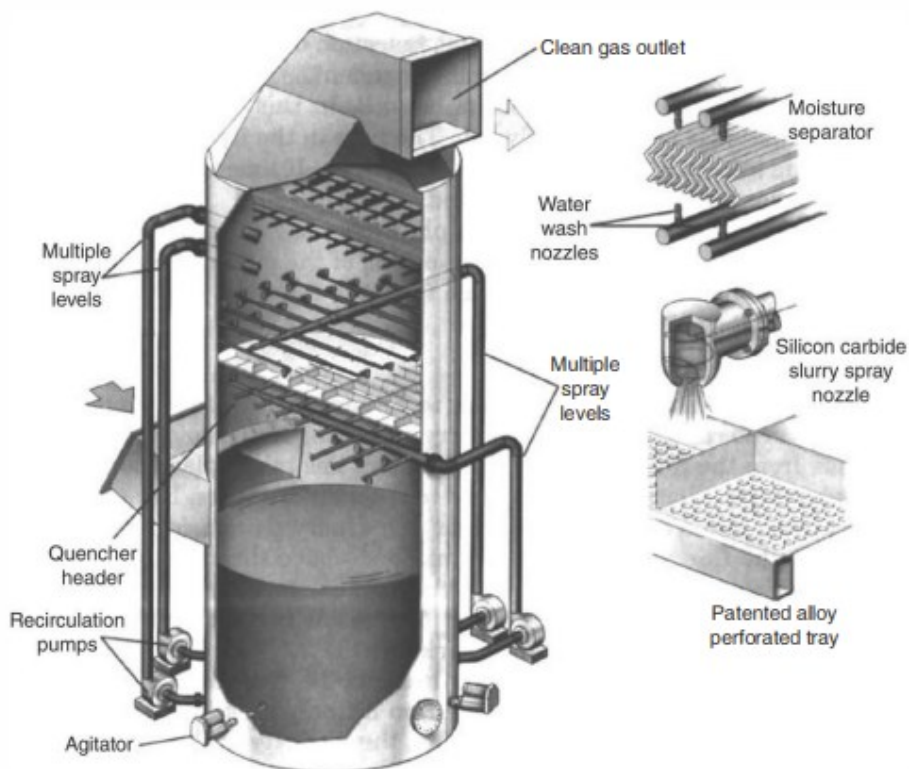


KUVIO 1. Rikkidioksidin märkäpesurijärjestelmä (Woodruff ym. 2017, 629).

Järjestelmän tornin rakenne riippuu valmistajasta, mutta siihen kuuluvat pääasiassa esijähdyt-in, absorptiokammio ja kosteuserotin. Esijähdyttimessä savukaasu saa kontaktin ensimmäisiin suihkuttimiin. Tämä vaihe voi olla erillinen tai integroitu torniin. Absorptiokammiossa savukaasun sisältämä rikkidioksidi poistetaan savukaasusta pakottamalla se kontaktiin kalkin tai kalkkikivilietteen kanssa. Kammiona voidaan käyttää monenlaisia malleja, kuten avomallista suihkutornia tai sisäisiä komponentteja sisältäviä kammioita. Kosteuserottimella poistetaan nestepisarot pois savukaasusta ja se valmistetaan yleensä lasikuidusta tai muovista. (Woodruff ym. 2017, 629–630.)

Tornin tyyppin valinta yksi- tai kaksikiertoisen järjestelmän välillä perustuu haluttuun rikkidioksidin poistotehokkuuteen. Ysikiertoisessa järjestelmässä savukaasu kulkeutuu esijähdyttimen kalkkikivilietesuihkuttimien läpi, missä tapahtuu ensimmäinen rikkidioksidin absorptiovaihe. Kaasun kulkiessa tornia ylöspäin se kulkeutuu rei'itetyn levyn läpi. Levyssä tapahtuu voimakas vaahdotuminen, millä saadaan edistettyä reaktiota kaasun ja lietteen välillä. Tämän jälkeen savukaasu

kulkeutuu kosteuserottimen läpi, millä estetään savukaasun sisältämien nestepi-saroiden kulkeutuminen ulos järjestelmästä. (Woodruff ym. 2017, 630–631.) Tä-män kaltainen järjestelmä esitellään kuviossa 2.



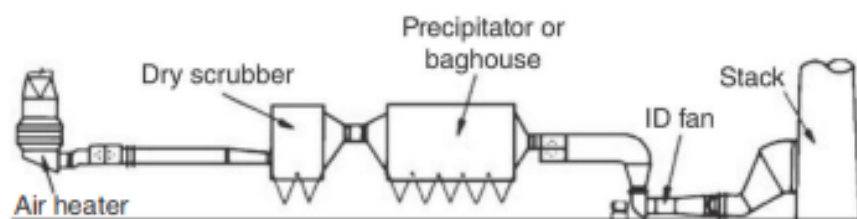
KUVIO 2. Märkäpesurijärjestelmän yksikiertoinen absorptiotorni (Woodruff ym. 2017, 631).

Kaksikiertoinen järjestelmä on tehokkaampi järjestelmä rikkioksidin poistamiseen verrattuna yksikiertoiseen järjestelmään. Sitä käytetään yleensä siinä tapauk-sessa, kun halutaan poistaa vähintään 95 % rikkidioksidista. (Woodruff ym. 2017, 628.) Järjestelmän alemmassa kierrossa savukaasu jäähdyytetään kiertävällä kalkkikivilietteellä esipesurissa ja esijäähdyttimessä. Kaasun ja lietteen välinen reaktio tapahtuu tässä vaiheessa noin 4,0 pH:ssa, mikä on optimaalinen olo-suhde hapettumiselle ja kalkin syntymiselle. Ylemmässä kierrossa kaasu kulkeu-tuu uuden kiertävän kalkkikivilietteen läpi, minkä pH on 5,8–6,0. Ennen poistu-mista tornista kaasu kulkeutuu vielä lisäsuihkuttimien läpi, mistä se jatkaa kulku-ansa märkäkalvokontaktoriin. Järjestelmän esijäähdyttimeen syntyvä liete sisäl-tää noin 15 % kiintoainetta. Tämä ohjataan vedenerotusjärjestelmään, missä käy-tetään hydrosykloneita pääasialliseen vedenerotukseen lietteestä. (Woodruff ym. 2017, 630.)

Märkäpesujärjestelmissä syntyvän lietteen hävitykseen on olemassa monia vaihtoehtoja, kuten kaatopaikat ja kaivokset tai lietteen hyötykäyttö. Yleisinä loppusijoitus paikkoina lietteelle toimivat kaatopaikat. Kaatopaikoilla liete sekoitetaan lentotuhkan kanssa, minkä sisältämä kalkki aiheuttaa seoksessa sementtimäisen reaktion. (Woodruff ym. 2017, 632.)

### 3.3 Kuivapesurit

Kuivapesurijärjestelmä saa nimensä siitä syntyvän kuivan jätteen takia. Järjestelmällä saadaan puhdistettua rikkidioksidin lisäksi myös muita happamia kaasuja, kuten vetykloridia savukaasusta. Märkäpesurijärjestelmät ovat tehokkaampia savukaasun rikin puhdistuksessa, mutta kuivapesureiden etuna verrattuna märkäpesureihin on niiden yksinkertaisuus. (Woodruff ym. 2017, 632–633.) Kuivapesurijärjestelmän sisältämien laitteiden yleinen asettelutapa esitellään kuviossa 3.



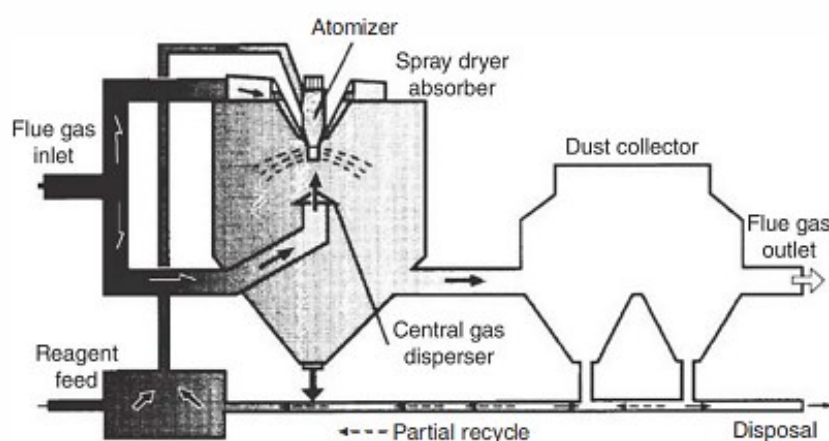
KUVIO 3. Kuivapesurijärjestelmän laitteiden yleisasettelu (Woodruff ym. 2017, 633).

Kuivapesuriprosessissa savukaasun lämpö hyödynnetään kuivapesurissa savukaasuun suihkutettavan emäksisen lietteen käsittelyyn ja kuivaamiseen. Kuivumisen aikana tapahtuu pääasiallinen savukaasun happaman aineksen poisto savukaasusta. Tämän jälkeen savukaasu kulkeutuu sähkösuodattimeen tai kangas-suodattimeen, joissa kerätään talteen puhdistuksesta syntyvä jäte ja lentotuhka. (Woodruff ym. 2017, 632–633.)

Vaikka kuivapesuri on rakenteeltaan yksinkertaisempi ja alkuinvestointi on alhaisempi kuin märkäpesurilla, sen käyttökustannukset ovat korkeammat, koska kuivapesureissa reagenssina käytettävä kalkki on merkittävästi kalliimpaa kuin märkäpesureissa käytettävä kalkkikivi. Tämän takia kuivapesureiden käyttö on keskittynyt suurimmaksi osaksi polttolaitoksiin, missä käytetään polttoaineena rikkipitoisuudeltaan matalaa kivihiiltä. (Woodruff ym. 2017, 633–634.)

### 3.3.1 Rotaatiosumuttimet

Kuivapesurijärjestelmän absorptiojärjestelmän rakenne rotaatiosumutinta käyttäessä esitellään kuviossa 4. Kuuma savukaasu kulkeutuu keskellä ja yläpuolella olevien kaasun levittäjien kautta absorptiokammioon. Kammiossa keskelle sijoitettu rotaatiosumutin muuntaa käytetyn reagenssin hienojakoisiksi pisaroiksi, jotka sekoittuvat savukaasun kanssa. Sekoittuminen aiheuttaa reaktion rikkidioksidin ja reagenssin välillä, minä aikana kuuma kaasu kuivattaa pisarat jauheeksi. Reaktiossa muodostunut kuiva jauhe laskeutuu ruiskukuivaimen pohjalle tai kulkeutuu savukaasun mukana pölynkeräysjärjestelmään, missä tapahtuu viimeinen reaktio kuivan reagenssin ja savukaasun välillä. Pölynkeräysjärjestelmästä puhdistettu savukaasu kulkeutuu imupuhaltimen kautta piippuun. (Woodruff ym. 2017, 634–636.)



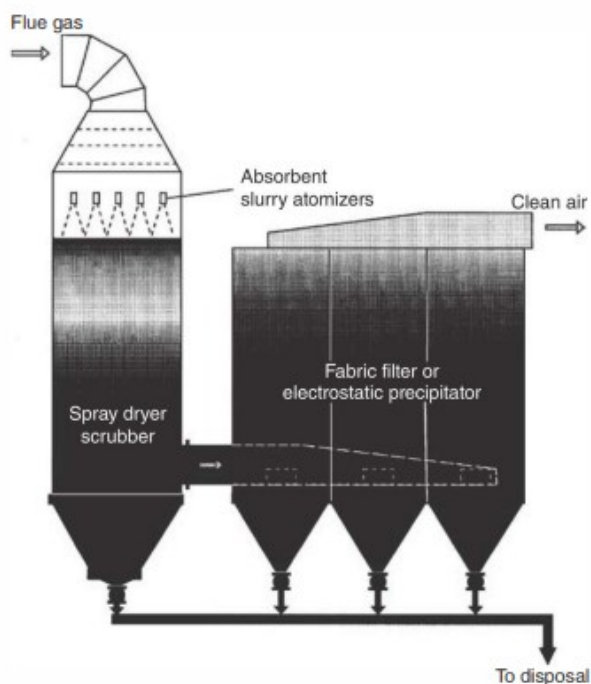
KUVIO 4. Kuivapesurijärjestelmän absorptiojärjestelmä rotaatiosumuttimella (Woodruff ym. 2017, 634).

Rotaatiosumuttimen toiminta perustuu keskipakovoiman vaikutukseen. Liete syötetään pyörivälle kiekolle, missä se muuttuu pisaroiden sumuksi. Sumu poistuu kiekolta vaakasuunnassa sen sisältämistä suuttimista vaakasuuntaisesti 180°:n kulmassa. Rotaatiosumuttimessa käytetty moottori riippuu järjestelmän koosta ja sen kierrokset minuutissa voivat ylittää 12 000 kierrokseen. (Woodruff ym. 2017, 634–636.)

Savukaasu saapuu kammioon suhteellisen alhaisessa lämpötilassa, minkä takia savukaasun käsittelyyn täytyy käyttää pieni määrä reagenssia verrattuna savukaasuun määrään. Tämän avulla varmistetaan reagenssin täydellinen kuivaus. Tämän takia voimalaitoksen koon kasvaessa absorptiokammion koko kasvaa rotaatiosumutinta nopeammin. Tämän takia kaasun ja reagenssin välinen reaktio tapahtuu liian kaukana sumuttimen kiekosta aiheuttaen saostumien muodostumista kammion seinämille ja märän reaktiotuotteen päätymistä kammion pohjalle. Tämä estetään jakamalla kammioon tuleva savukaasu kahteen virtaukseen, minkä avulla pisarasumu tasapainottuu ja muotoutuu halutulla tavalla. (Woodruff ym. 2017, 634–636.)

### **3.3.2 Kaksoisneste-suutinsumutin**

Kaksoisneste-suutinsumutin on toinen perinteisistä kuivapesurijärjestelmien tyypeistä. Järjestelmässä savukaasu tulee kuivapesurin absorptiokammioon yläkautta, missä se kohtaa useita sisääntuloon sijoitettuja suuttimia (kuvio 5). Rotaatiosumuttimesta eroten pisarasumun muodostamiseen tarvittavan energian tuottaa fluidi, kuten esimerkiksi ilma. Samaa tekniikkaa käytetään nestepolttolaitosten poltinsuuttimissa. (Woodruff ym. 2017, 637–638.)



KUVIO 5. Kuivapesurijärjestelmän absorptiojärjestelmä kaksoisneste-suutinsumuttimella (Woodruff ym. 2017, 639).

Järjestelmässä käytetään muiden kuivapesurijärjestelmien tapaisesti reagenssina kalkkiliettä. Sumuttimet sumuttuvat kalkkilietteen tasaisesti savukaasun joukkoon, missä liete reagoi savukaasun rikkidioksidin kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia ja kalsiumsulfiaattia. Savukaasun lämmön kuivaamat reaktiotuotteet päätyvät savukaasun mukana absorptiokammion viereen sijoitetun pölynkeräyslaitteen kerättäväksi tai putoavat kammion pohjalla olevaan säiliöön. Savukaasun lämpötilan pitää pysyä kastepisteen alapuolella sen kulkiessa järjestelmän läpi. Savukaasun lämpötilaan vaikutetaan säätelämällä kalkkikivilietteeseen syötetyn veden määrää. (Woodruff ym. 2017, 637–638.)

## 4 TYPPIOKSIDIEN PUHDISTUSMENETELMÄT

### 4.1 NO<sub>x</sub> -päästöinä

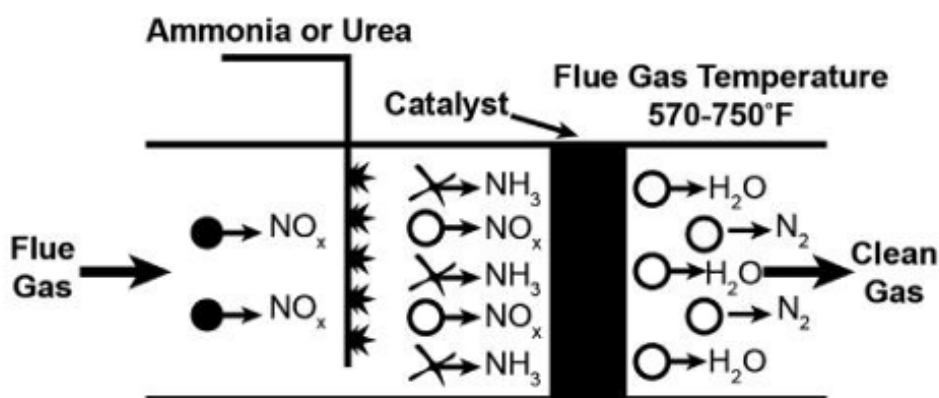
Typen oksidit muodostavat suurimman osan palamisen seurauksena syntyneistä päästöistä. Typen oksideja (NO<sub>x</sub>) ovat typpimonoksidit (NO) ja typpidioksidit (NO<sub>2</sub>). Palamisprosessissa syntyvistä NO<sub>x</sub> -päästöistä noin 90 % on typpimonoksideja ja loput typpidioksideja, mutta savupiipusta poistuessaan suuri osa typpimonoksidista hapettuu ilmakehässä typpidioksidiksi. Palamisprosessissa typen oksideja syntyy pääasiassa kahden mekanismin seurauksena — polttoaineperäisenä ja lämpöperäisenä. Polttoaineperäinen syntyy polttoaineen typen hapettumisen seurauksena ja lämpöperäinen ilman sisältämän typen sitoutuessa korkeassa lämpötilassa. (Woodruff ym. 2017, 641.)

NO<sub>x</sub> -päästöt aiheuttavat ilmakehään päästyään näkyvyyden heikkenemistä, happosateita ja ihmisten terveyteen liittyviä ongelmia. Typpidioksidi on typen oksideista haitallisempi. Ilmakehään päästyään se reagoi auringonvalon kanssa synnyttäen toissijaisia saasteita. Nämä toissijaiset saasteet voivat aiheuttaa muun muassa happosateita ja savusumua. Tämän takia typpioksidipäästöjen hallintaan on kehitetty monia tekniikoita. Typen oksidien muodostumista pyritään vähentämään jo palamisprosessin aikana, mutta niiden lisäksi yleensä käytetään jälkikäsittelymenetelmiä. Jälkikäsittelymenetelminä käytetään SCR ja SNRC tai niiden yhdistelmää. (Woodruff ym. 2017, 641.)

### 4.2 SCR

SCR on käytetyin tekniikka NO<sub>x</sub> -päästöjen jälkikäsittelyssä. Tekniikalla saadaan poistettua yli 90 % savukaasun NO<sub>x</sub> -päästöistä. Prosessissa savukaasun joukkoon ruiskutettu reagenssi reagoi heterogeenisesti savukaasun NO<sub>x</sub> -yhdisteiden kanssa katalyytin avustuksella. Reagenssi adsorboituu eli kiinnittyy katalyytin aktiivisiin kohtiin, missä se reagoi noin 300–400 °C lämpötilassa savukaasun typen oksidien kanssa muodostaen typpeä ja vesihöyryä kuvion 6 mukaisesti. (Miller 2015, 265.)

Pääreaktion lisäksi prosessissa voi tapahtua sivureaktioita, joissa muodostuu ammoniumsulfaattia ja ammoniumvetybisulfaattia. Nämä yhdisteet aiheuttavat tukoksia ja korroosiota prosessin myöhemmissä vaiheissa. Tämän lisäksi pieni osa savukaasun sisältämästä rikkidioksidista hapettuu katalyytin pinnalla rikkitrioksidiksi. (Miller 2017, 265–266.)



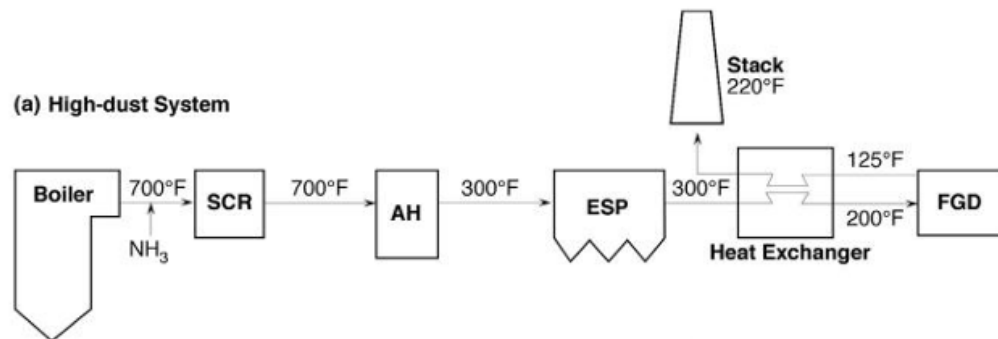
KUVIO 6. Kaaviokuva SCR-Järjestelmästä (Miller 2015, 265).

SCR -järjestelmän reagenssina käytetään yleisimmin vedetöntä ammoniakkaa, jonka ongelmana on sen vaarallisuus ja myrkyllisyys. Tämän takia on kehitetty ureapohjaisia järjestelmiä. Ureaa käyttäessä siitä muodostuu reaktioiden seurauksena ammoniakkaa, joka toimii järjestelmässä pelkistävänä reagenssina. (Miller 2015, 269.)

Katalyyttityypit lajitellaan kolmeen pääluokkaan, jotka ovat perusmetalli-, zeoliitti- ja jalometallikatalyytit. Näistä perusmetallikatalyytit ovat käytetyin luokka lämpö- ja energiateollisuudessa. Yleisin perusmetalliluokan katalyyttimalli koostuu titaanioksidipohjasta, jonka päälle on levitetty vanadiinipentoksidia toimimaan aktivoivana materiaalina. (Miller 2015, 267.)

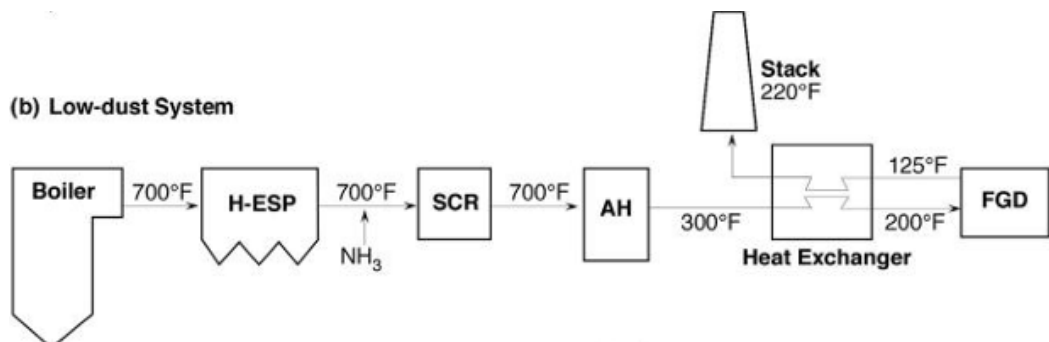
Perusmetalliluokan katalyyttiä voidaan valmistaa kolmessa muodossa, jotka ovat levy-, kenno- ja aaltomuoto. Levymuodossa pohjamateriaali päällystetään kokonaisuudessaan katalyyttitahnalla, jonka jälkeen tahna painetaan kiinni pohjaan. Kennomuotoinen rakenne muodostuu keraamisesta pohjasta, jossa katalyytti on upotettu rakenteeseen tai pinnoitettu pintaan. Aaltomuoto muodostuu aallotetusta lasikuitualustasta, joka on päällystetty titaanidioksidilla, johon on imeytetty aktiiviset komponentit. (Miller 2015, 267.)

Polttoaineena kivihiiltä käyttävien kattiloiden SCR -järjestelmille on olemassa kolme eri rakennetta. Rakenteita kutsutaan nimillä suuren pölypitoisuuden-, pienen pölypitoisuuden- ja loppupään järjestelmä. Suuren pölypitoisuuden rakenteessa SCR -reaktori sijoitetaan ekonomaisemmin ja esilämmittimen väliin ennen hiukkasten poistajaa (kuvio 7). Kyseisessä rakenteessa SCR -reaktorin katalyytti altistuu lentotuhkalle ja kemiallisille yhdisteille, mikä heikentää katalyytin toimintaa eroosion ja kemiallisten reaktioiden takia. Näitä haittavaikutuksia pystytään hallitsemaan hyvän suunnittelun avulla, minkä takia tämä rakenne on yleisin näistä kolmesta rakenteesta. (Miller 2015, 266–267.)



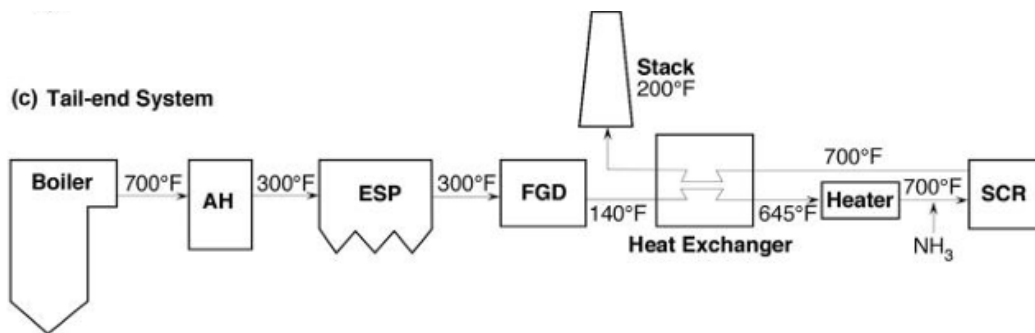
KUVIO 7. Suuren pölynpitoisuuden järjestelmän rakenne (Miller 2015, 266).

Pienen pölypitoisuuden järjestelmässä SCR -reaktori sijoitetaan hiukkasten poistajan jälkeen (kuvio 8). Sijoituksen avulla vähennetään reaktorin katalyytin lentotuhkasta johtuvaa eroosiota. Haittapuolena on hiukkasten poistajan sijoitus järjestelmän kuumalle puolelle, mikä vaatii kalliin kuumapuolen sähkösuodattimen. Vaihtoehtoisesti järjestelmään voidaan asentaa savukaasun uudelleen lämmitysjärjestelmä, millä saadaan katalyytti toimimaan optimaalisessa lämpötilassa. (Miller 2015, 267.)



KUVIO 8. Pienen pölynpitoisuuden järjestelmän rakenne (Miller 2015, 266).

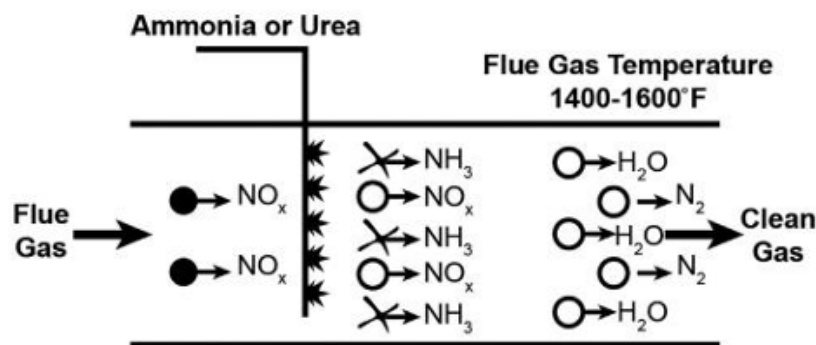
Loppupään järjestelmän SCR -reaktori sijoitetaan FGD -laitteen jälkeen järjestelmän loppupäähän (kuvio 9). Järjestelmä on kalliimpi kuin suuren pölypitoisuuden järjestelmä, sillä savukaasu joudutaan lämmittämään uudelleen reaktoria varten. Rakennetta käytetään pääasiassa märkähajaisissa kattiloissa ja jälkiasennuksissa. Järjestelmän etuna on katalyytin pidempi käyttöikä ja aktiivisempien katalyyttikoostumusten käyttö, mikä alentaa kokonaiskustannuksia. (Miller 2015, 267.)



KUVIO 9. Loppupään järjestelmän rakenne (Miller 2015, 266).

### 4.3 SNCR

SNCR on toinen maailmalla yleisesti käytetty vaihtoehto savukaasun sisältämien  $\text{NO}_x$ -yhdisteiden jälkikäsitteilyyn. Järjestelmä ei käytä SRC-järjestelmän kaltaista kallista katalyyttia  $\text{NO}_x$ -yhdisteiden poistamiseen. SNCR-prosessissa ammoniakkia tai ureaa ruiskutetaan kattilan yläosaan tai konvektioalueelle tietyssä lämpötilaikkunassa. Lämpötilaikkuna vaihtelee käytetyn reagenssin mukaan. Esimerkiksi ammoniakkia käytettäessä se on noin 845–1050 °C tai ureaa käyttäessä noin 1000–1150 °C. Reagenssi ja savukaasun  $\text{NO}_x$ -yhdisteet reagoivat muodostaen molekyylistä typpeä ja vettä (kuvio 10). (Miller 2015, 269–270.)



KUVIO 10. Kaaviokuva SNCR -järjestelmästä (Miller 2015, 270).

Ammoniikki ja urea ovat käytetyimpiä reagensseja SNRC -järjestelmässä. Tutkimuskäytössä on myös testattu muita vaihtoehtoja, kuten amideja, amiineja, amiinisuoloja ja syanuurihappoa. Ureapohjaiset reagenssit ovat yleistyneet vedettömän ammoniakkin korvaajana, sillä ammoniakki on erittäin myrkyllistä vaarallisten tiukkojen menettelytapojen esimerkiksi kuljetuksessa ja varastoinnissa. (Miller 2015, 269–270.)

SNRC -järjestelmän suurimpana haasteena on reagenssin ruiskutuksen sijoitus paikkaan kattilassa, missä lämpötilaikkuna on oikea kaikilla kattilan käyttökuorilla. Jos reagensseja käytetään lämpötilaikkunan ulkopuolella savukaasuun voi muodostua ei-toivottuja yhdisteitä. Liian korkeassa lämpötilassa reagenssi voi muodostaa lisää  $\text{NO}_x$  -yhdisteitä ja liian matalassa lämpötilassa savukaasuun joukkoon voi muodostua ammoniakkaa. Tärkeää on myös reagenssin riittävä sekoittuminen savukaasun kanssa, millä varmistetaan mahdollisimman suuri  $\text{NO}_x$  -yhdisteiden poisto ja vähennetään ammoniakkin läpäisyä. Ammoniakin läpäisy voi muodostaa ammoniumsulfaattia, mikä aiheuttaa ongelmia järjestelmän jälkivaiheen laitteistoon. (Miller 2015, 270.)

SNRC -järjestelmässä reagenssin hyödyntämistehokkuus on selvästi alhaisempi kuin SCR -järjestelmissä. Tämän takia saman puhdistustehokkuuden saavuttamiseksi tarvitaan noin 3–4 kertaa enemmän reagenssia, jotta saadaan poistettua sama määrä  $\text{NO}_x$  -savukaasusta kuin SCR -järjestelmissä. Tyypillinen SNCR -järjestelmä saavuttaa 20–50 %:n  $\text{NO}_x$  -poistotehokkuuden, kun reagenssia käytetään kaksi kertaa enemmän suhteessa savukaasun  $\text{NO}_x$  -yhdisteiden määrään. (Miller 2015, 270.)

SNRC -järjestelmä asennetaan kivihieillä toimivissa voimalaitoksissa yleensä arina- ja leijupetipolttokattiloihin. Suuremmissa voimalaitoskattiloissa sopiva lämpötilaikkuna sijaitsee yleensä konvektioalueella, mikä aiheuttaa ongelmia järjestelmän toiminnassa. Tämän takia SNRC-järjestelmän NO<sub>x</sub> -poistotehokkuus on suuremmissa kattiloissa vain 20–30 %. (Miller 2015, 270.)

## 5 PIENHIUKKASTEN PUHDISTUSMENETELMÄT

### 5.1 Pienhiukkaset päästönä

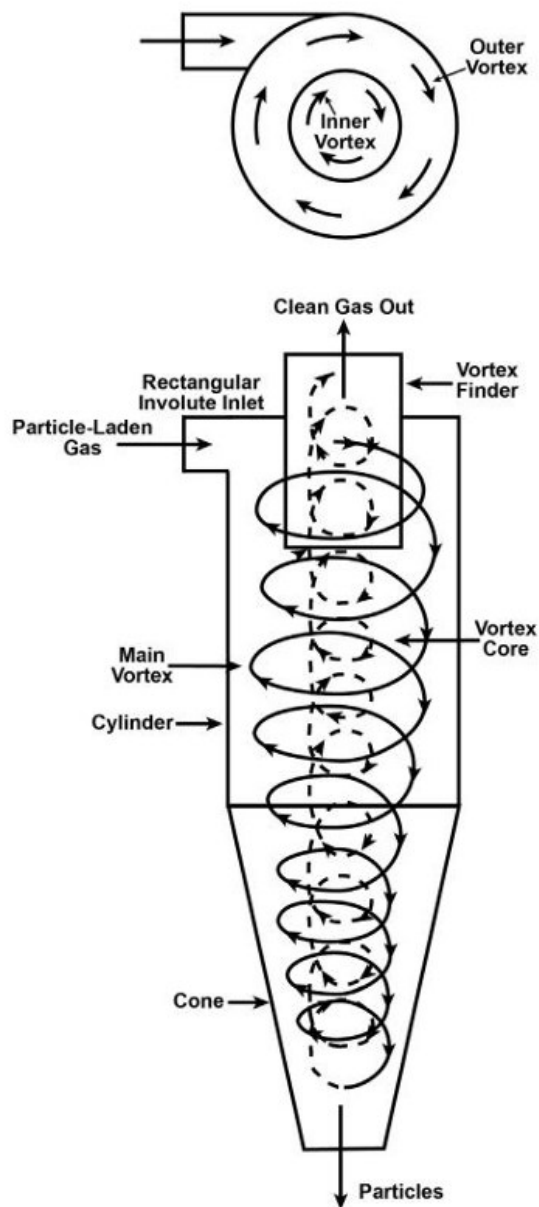
Pienhiukkasia (PM) käytetään yleisterminä ilmassa esiintyville kiinteiden hiukkasten ja nestepisaroiden seokselle. Hiukkaset voivat olla niin suuria, että näkyvät ihmiselle esim. savuna. Ne voivat olla myös niin pieniä, että niitä ei voi nähdä silmällä. Ilmakehän pienhiukkaset koostuvat pääasiassa hienoista hiukkasista ( $PM_{2,5}$ ) ja karkeista hiukkasista ( $PM_{10}$ ). Polttolaitokset tuottavat ilmakehään edellä mainituista erityisesti hienoja hiukkasia. Polttolaitosten muut päästöt voivat myös ilmakehässä muodostaa reaktioiden kautta pienhiukkasia. (Miller 2015, 145–146.)

Ilmakehässä erityisesti hienot hiukkaset heikentävät näkyvyyttä ja ne voivat aiheuttaa myös vahinkoa materiaaleille riippuen niiden kemiallisesta koostumuksesta. Hiukkaspäästöt voivat kulkeutua hengitysteiden kautta hengityselimiin aiheuttaen terveyshaittoja. Karkeat hiukkaset on yhdistetty etenkin hengitystiesairauksien pahenemiseen ja hienot hiukkaset sydän- ja hengitystiesairauksien pahenemiseen ja ennenaikaisiin kuolemiin. Pienhiukkasten käsittelyyn on monia menetelmiä, mutta niistä käytetyimpiä ovat syklonierottimet, sähkösuodattimet, pussisuodattimet ja märkäerottimet. (Miller 2015, 145–146.)

### 5.2 Syklonierottimet

Syklonierottimet käyttävät savukaasun puhdistukseen keskipakovoimaa yhdessä painovoiman kanssa. Syklonin rakenne vaihtelee suunnittelun mukaan ja sen erotusyksikkö voi sisältää yhden kammion, useita pieniä kammioita rinnakkain tai sarjassa tai dynaamisen yksikön. Ne soveltuvat parhaiten 10  $\mu\text{m}$  tai suurempien hiukkasten poistamiseen, sillä niiden tehokkuus heikkenee merkittävästi pienempien hiukkasten kohdalla. Syklonit luokitellaan yleisesti kolmeen tyyppiin, mitä ovat käänteisen virtauksen syklonit (tangentin suuntainen- tai aksiaalinen kaasun sisääntulo), suoravirtausyklonit ja siipipyöräerottimet. (Miller 2015, 157–159.)

Käänteisen virtauksen sykloneista tangentin suuntaisen sisääntulon sykloni esitellään kuviossa 11. Laitteeseen syötetty kaasuvirta alkaa seuraamaan sen kaa-revaa rakennetta kohti pohjaa, mikä aiheuttaa hiukkasten inertian vaikutuksesta niiden törmäämisen ulkoseinämään. Törmätessään hiukkaset alkavat painovoiman vaikutuksesta liukua seinämää pitkin laitteen pohjalla sijaitsevaan säi-lösuppiloon. Laitteen pohjalle päädyttyään puhdistettu kaasuvirta vaihtaa virtaus-suunnan ylöspäin muodostaen sisemmän pyörteen. Puhdas kaasuvirta poistuu syklonin yläosasta pyörreputken avustuksella. (Miller 2015, 159.)



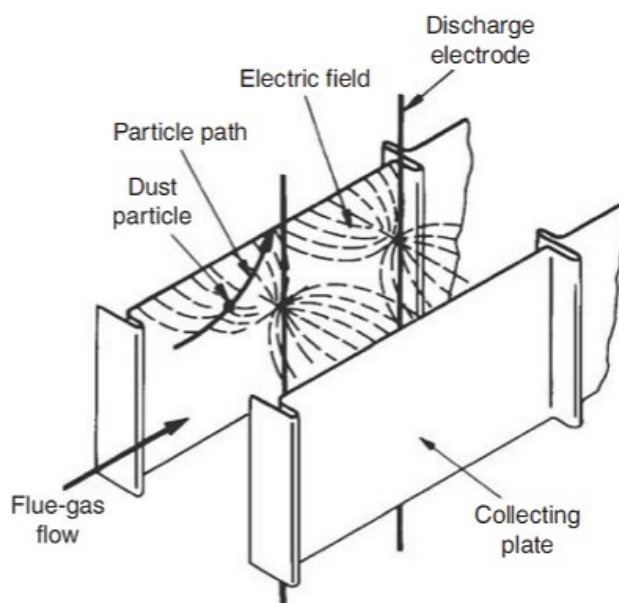
KUVIO 11. Käänteisen virtauksen sykloni tangentin suuntaisella savukaasun si-sääntulolla (Miller 2015, 160).

Suoravirtaussyklonissa kaasuvirran sisääntulo laitteeseen sijaitsee laitteen yläosassa ja ulostulo sijaitsee laitteen pohjassa. Yläosassa sijaitsee pyörresiipiä, mitkä aiheuttavat kaasuvirtaukselle keskipakovoiman muodostamiseksi tarvittavan pyörivän liikkeen. Tämän kaltaista syktonia käytetään yleensä esipuhdistuksessa poistamaan suuria hiukkasia. Siipipyöräerottimessa kaasu tulee kohtisuoraisesti moniteräiseen siipipyörään. Siipipyörä heittää kaasun sisältämät hiukkaset laitteen ulkokehällä sijaitsevaan renkaan muotoiseen aukkoon. Erotin on hyvin kompakti, mutta helposti tukkeutuva. (Miller 2015, 159.)

Syklonierottimen yksinkertaisen rakenteen ja liikkuvien osien puuttumisen vuoksi niiden hankinta- ja ylläpitokustannukset ovat alhaisemmat verrattuna muihin hiukkasten puhdistajiin, mutta niiden puhdistustehokkuus ei ole riittävä täyttämään päästörajoja yksinään. Tämän takia niitä käytetään esipuhdistimina ennen kalliimpia puhdistimia, kuten sähkösuodattimia ja kangassuodattimia (Miller 2015, 157–158.)

### **5.3 Sähköstaattiset pölynerottimet**

Sähköstaattinen pölynerotin (ESP) kerää savukaasusta hiukkaset hyödyntämällä sähköisesti varautuneiden hiukkasten ja vastakkaispolaarisen keräilyelektrodin välistä sähköstaattista vetovoimaa (Miller 2017, 165). Savukaasu ohjataan ESP:een tasaisesti purkauselektrodien ja maadoitettujen keräyslevyjen rivien väliin (kuvio 12). Korkeajännitteinen tasavirta johdetaan elektrodeihin, mikä aiheuttaa hiukkasten ionisoitumisen. Ionisoituneet hiukkaset kerääntyvät maadoitetun keräyslevyn pinnalle niiden välisen sähköstaattisen vetovoiman vaikutuksesta. Levy sisältää ravistusjärjestelmän, joka ajoittaisen värähtelyn avulla pudottaa kerääntyneet hiukkaset pois levyiltä suppiloihin. (Woodruff ym. 2017, 616.)

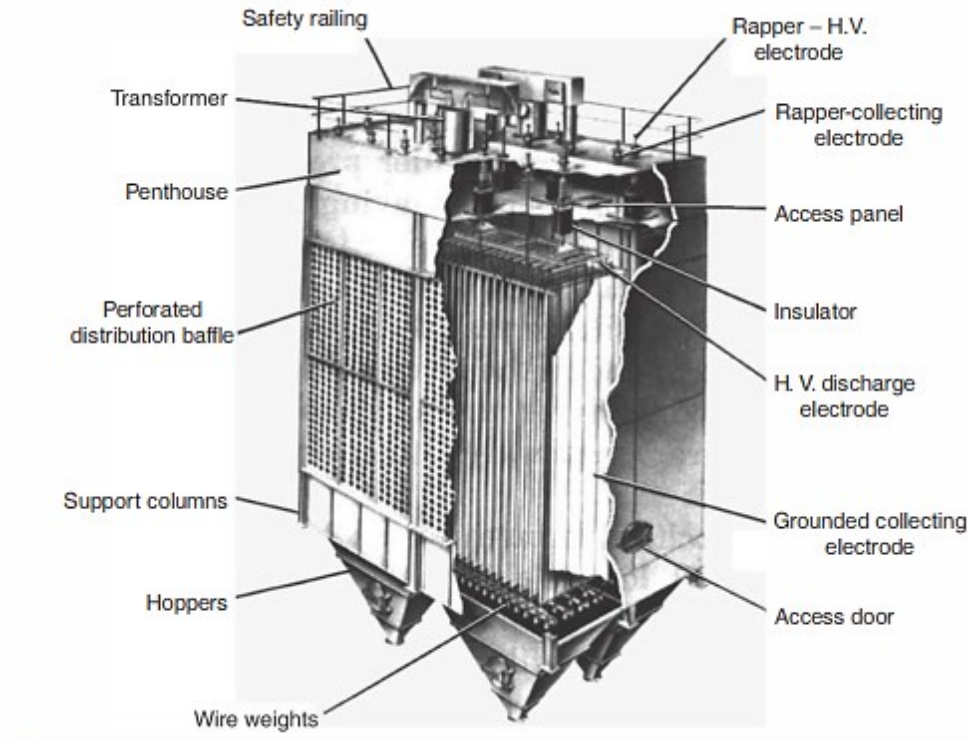


KUVIO 12. Savukaasun jakautuminen purkauselektrodien ja keräyslevyjen välissä (Woodruff ym. 2017, 617).

Sähköstaattisen pölynerottimen mitoitukseen vaikuttaa lentotuhkan resistiivisyys, mikä vaikuttaa hiukkasten reagointiin sähköstaattisessa kentässä. Matalan resistiivisyyden hiukkasia on helpompi kerätä kuin korkeamman resistiivisyyden hiukkasia. Tämän takia lentotuhkan resistiivisyyden kasvaessa myös erottimen koko kasvaa. Polttoaineena käytetyn hiilen rikkipitoisuus vaikuttaa syntyvän lentotuhkan resistiivisyyteen. Korkean rikkipitoisuuden hiilen polttaminen tuottaa matalan resistiivisyyden hiukkasia ja matalan rikkipitoisuuden hiili tuottaa korkean resistiivisyyden hiukkasia. Hiilen lisäksi myös muiden polttoaineiden, kuten yhdyskunta jätteen polttaminen vaikuttaa hiukkasten resistiivisyyteen, minkä takia käytetty polttoaine on tärkeä osa suodattimen mitoitusta. Oikein mitoitetut ja käytetyt suodattimet pystyvät poistamaan jopa yli 99,9 % savukaasun lentotuhkasta. (Woodruff ym. 2017, 617.)

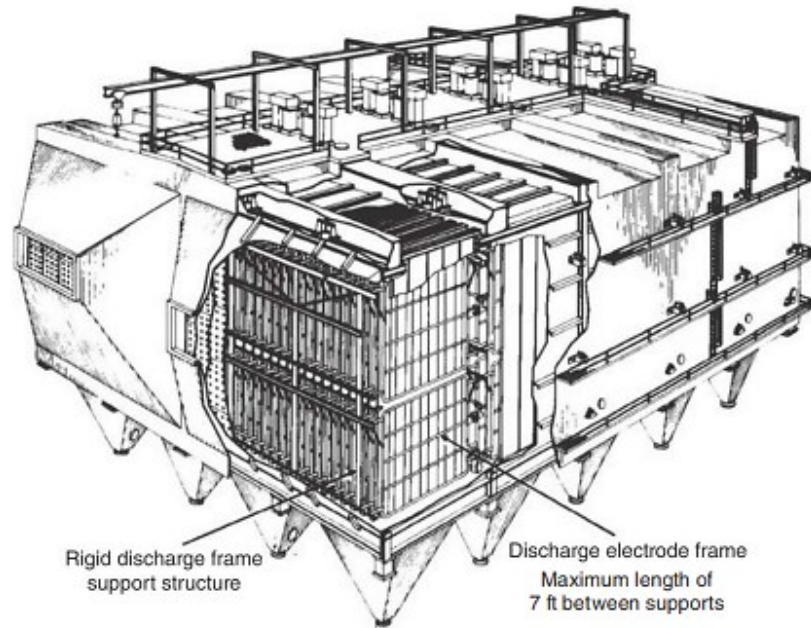
Sähköstaattiset pölynerottimet jaetaan yleisesti kahteen päätyyppiin — painotettuun lankarakenteeseen ja jäykkärunkoiseen rakenteeseen. Näiden tyyppien suurimpana erona on purkauselektrodien kannatustapa. Painotetussa lankarakenteessa elektrodilanka kiinnitetään kaksoispistekiinnityksellä ja pidetään paikallaan levyjen välissä lankojen alapäihin asetetuilla painoilla (kuvio 13). Tämän kaltaisen rakenteen suurimpana ongelmana on elektrodilankojen katkeaminen

varsinkin suuremmissa voimalaitoksissa, joissa vaaditaan suurempia sähköstaattisia suodattimia. Tämän takia suuremmissa voimalaitoksissa käytetään yleisesti jäykkärunkoista rakennetta. (Woodruff ym. 2017, 617–618.)



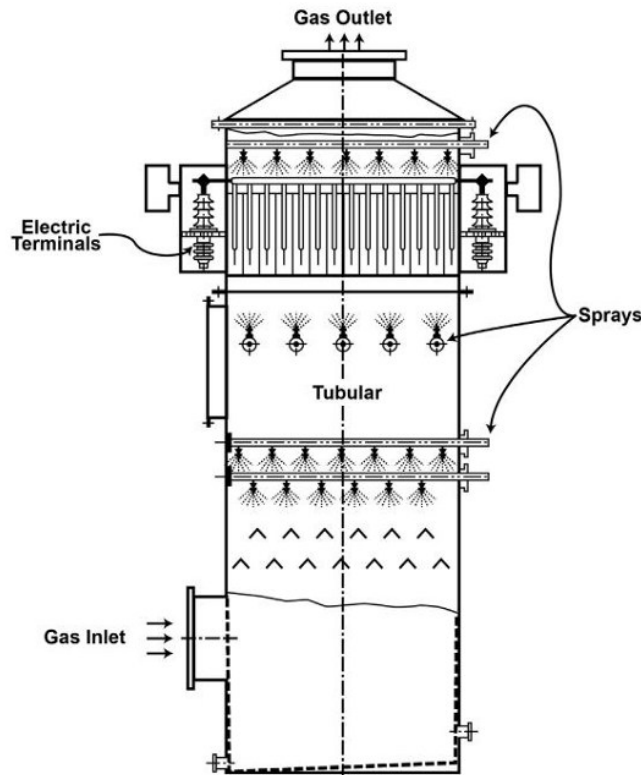
KUVIO 13. Sähköstaattinen suodatin painotetulla lankarakenteella (Woodruff ym. 2017, 618).

Jäykkärunkoisessa rakenteessa elektrodit on kiinnitetty jäykästi kiinni rakenteeseen, mikä parantaa elektrodien luotettavuutta ja puhdistamista. Sähköstaattinen pölynerotin jäykkärunkoisella rakenteella esitellään kuviossa 14. Jäykkärunkoinen rakenne tukee ylhäältä, alhaalta ja monista välikohdista. Rakenteessa elektrodit on myös kiinnitetty nelipistekiinnityksellä. Monipuolinen tukirakenne poistaa lähes kokonaan mahdollisuuden lankojen katkeamiselle ja siitä aiheutuville ongelmille. (Woodruff ym. 2017, 620–621.)



KUVIO 14. Sähköstaattinen pölynerotin jäykkärunkoisella rakenteella (Woodruff ym. 2017, 620).

Kuivien sähköstaattisten pölynerottimien lisäksi käytetään myös märkiä sähköstaattisia pölynerottimia (WESP). Näitä käytetään rikkihapposumun ja muiden hienompien hiukkasten hallintaan yhdessä märkärikinpoistojärjestelmän kanssa. Erotin sijoitetaan rikinpoistojärjestelmän jälkeen keräämään hienojen hiukkasten lisäksi siitä läpi mahdollisesti päässeen rikkihapposumun ja muut kondensoituneet yhdisteet. Rakenteella saadaan alhaiset hiukkaspäästöt ja sillä voidaan myös hallita elohopea päästöjä. (Woodruff ym. 2017, 622.) Märän erottimen toiminta perustuu samaan periaatteeseen kuin kuivan erottimen eli hiukkasten sähköiseen varaamiseen, keräämiseen ja keräyslevyjen ja elektrodien puhdistaminen hiukkasista (Miller 2017, 174). Erona on täristysjärjestelmän sijaan vesipeusjärjestelmän käyttäminen keräyslevyjen ja elektrodien puhdistamiseen hiukkasista. Märkä sähköstaattinen pölynerotin esitellään kuviossa 15. (Woodruff ym. 2017, 622.)

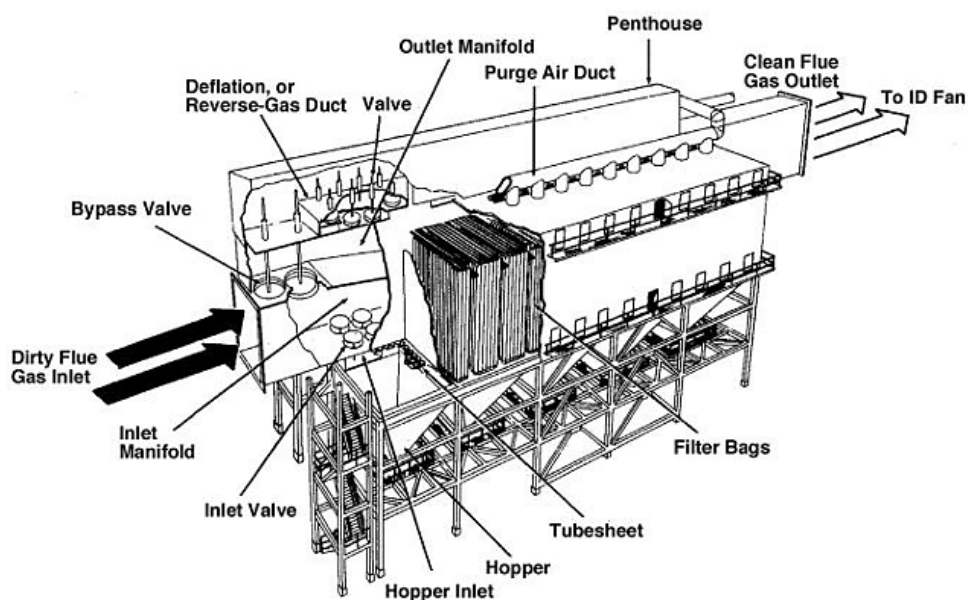


KUVIO 15. Märkä sähköstaattinen pölynerotin (Miller 2015, 173).

#### 5.4 Kangassuodattimet

Tiukentuneet päästösäännöstelyt ja vähärikkisen hiilen lisääntyvät käyttö on tehnyt sähkösuodattimien käytöstä kallista. Tämän takia kangassuodattimien käyttö on lisääntynyt voimalaitoksissa, sillä niiden toimintaan ja kokoon ei vaikuta merkittävästi palamiseen käytetty polttoaine. Kangassuodatin pystyy myös käsittelemään suuria savukaasu määriä erittäin korkealla erotustehokkuudella (99,9–99,99 %), mutta suodatin tarvitsee myös suuren tilan käyttöä varten. Kangassuodatin muistuttaa suurta pölynimuria, missä suuri määrä putkimaisia suodatinpussuja toimivat hiukkasten poistajana. Suodatus tapahtuu savukaasun kulkiessa pakotettuna huokoisen materiaalin läpi eli suodatinpussin ja sen pinnalle muodostuneen pölykakan läpi. Pölykaku toimii toissijaisena suodattimena ja se muodostuu useiden suodatus- ja puhdistuskertojen jälkeen. Tämän takia uusissa suodattimissa, joihin ei ole ehtinyt muodostua pölykakkua, erotustehokkuus jää alhaiseksi (75–90 %). (Miller 2015, 174–175.)

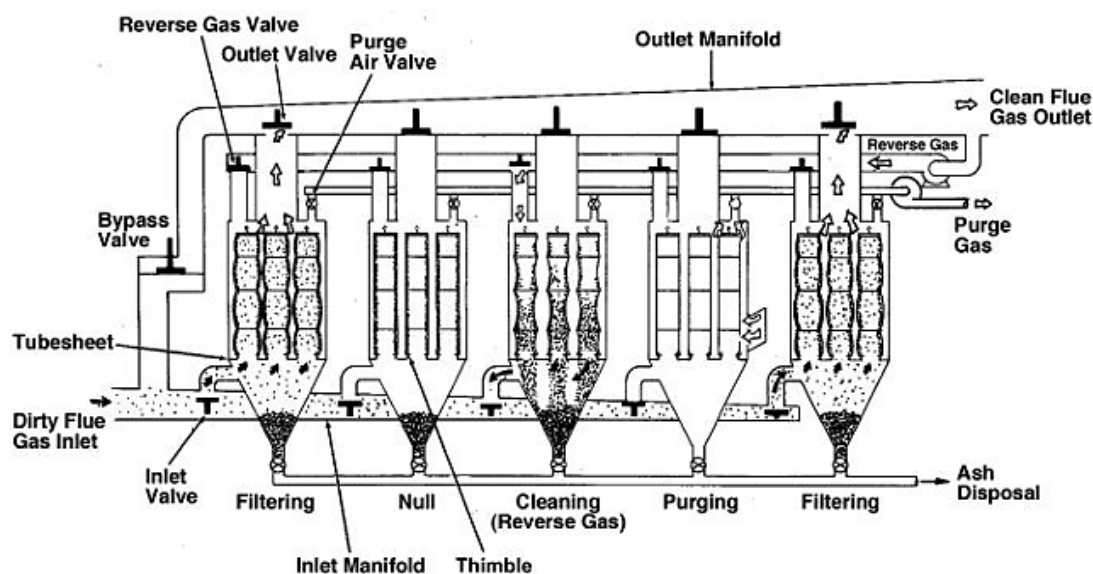
Suodatusjärjestelmän rakenne koostuu useista erillisistä rinnakkain asetetuista osastoista, joiden läpi kaasu kulkee samanaikaisesti. Jokainen osasto sisältää satoja putkimaisia suodatinpusseja. Perinteisen 10-osastoisien kangassuodattimien leikkauksena esitellään kuviossa 16. Prosessissa savukaasu kulkeutuu sisään tulokanavan kautta osastokohtaisiin suppiloihin. Suppiloissa savukaasu nousee ylöspäin suodatinpussien läpi, jolloin kaasun sisältämä lentotuhka tarttuu pusseihin kiinni. Puhdistettu kaasu jatkaa matkaansa ulostulokanavan kautta ulos järjestelmästä. Suodatinpusseihin kerääntynyt pöly puhdistetaan käytön aikana säännöllisesti. Puhdistamisen ajaksi osasto suljetaan pois järjestelmästä suppiloveniilien avulla. Puhdistuskeinona voidaan käyttää ravistelua, mekaanista tärinästä, paineilmasuihkuja tai vastavirtailmaa. (Miller 2015, 176–177.)



KUVIO 16. Poikkileikkaus 10-osastoisesta kangassuodattimesta (Miller 2015, 177).

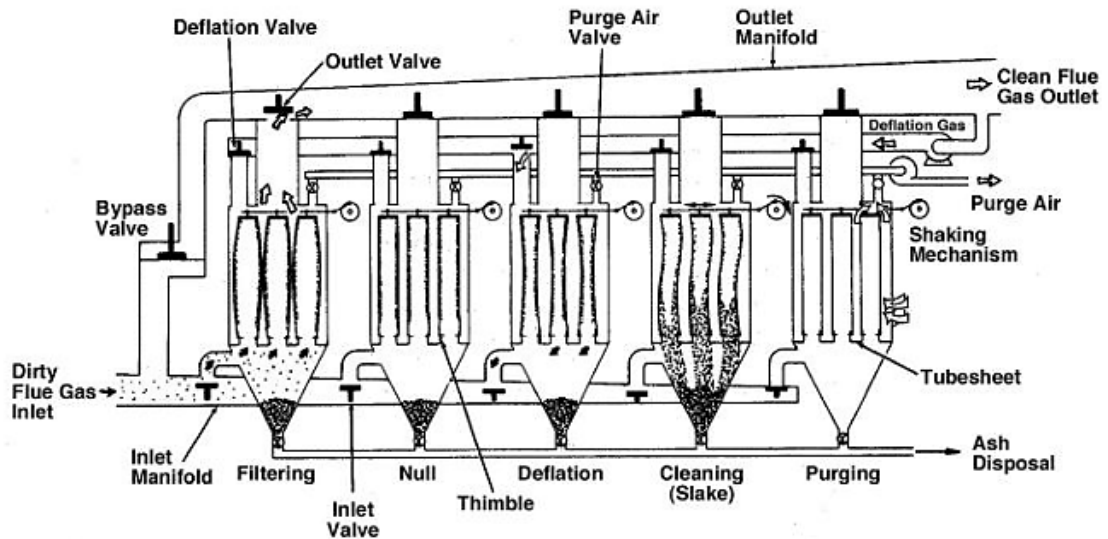
Kangassuodattimet voidaan jakaa kolmeen perustyyppiin — vastavirta, ravistus-tyhjennys ja painepuhallussuodattimet. Niiden suurimpana erona on suodatinpussien puhdistusmenetelmä ja ilma-kangas-suhde (A/C -suhde). A/C -suhde ilmoittaa yksinkertaisesti, kuinka nopeasti kaasu virtaa suodattimen lävitse. Yksikkönä käytetään yleensä jalkaa per minuutti (ft/min), joka on noin 30,5 cm/min. Pienempi suhde saavuttaa paremman kokonaistehokkuuden kuin suurempi suhde. (Miller 2015, 176–178.)

Vastavirtakangassuodatin on tyypeistä perinteisin ja ne toimivat matalalla A/C -suhteella (1,5–3,5 ft/min). Suodattimissa savukaasu kulkeutuu pussien sisäpuolta pitkin ulos, minkä takia tuhka kertyy pussien sisäpuolelle. Pussit puhdistetaan syöttämällä puhdistusilmaa pussien ulkopuolelta sisään, mikä aiheuttaa pussien osittaisen luhistumisen pudottaen irtonaisen tuhkan alas suppiloon. Tämän kaltainen järjestelmä esitellään kuviossa 17. (Miller 2015, 178.)



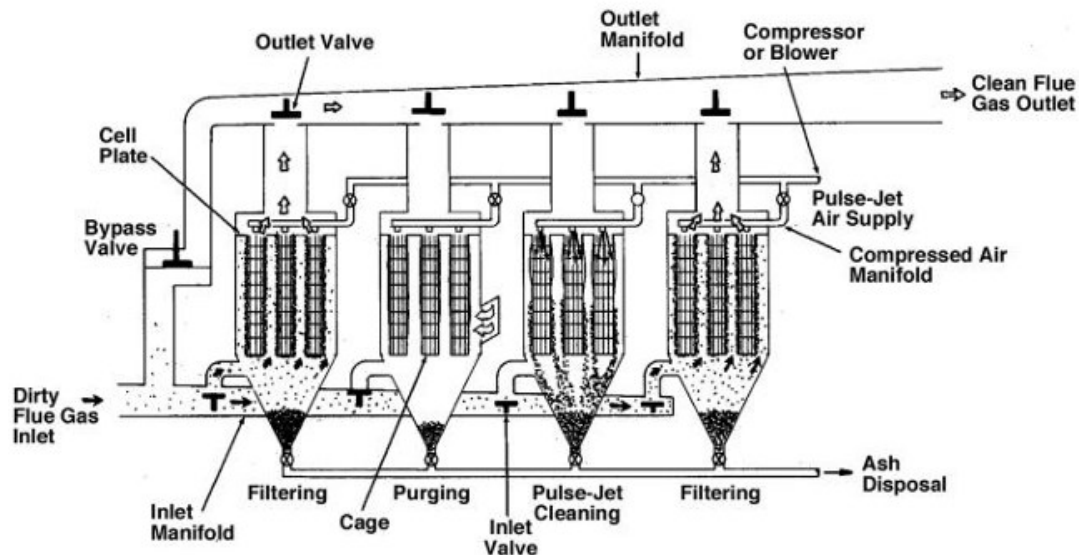
KUVIO 17. Kaaviokuva vastavirtatyyppisestä kangassuodatinjärjestelmästä (Miller 2015, 179).

Ravistus-tyhjennystyyppinen suodatin toimii vastavirtaisen suodattimen kaltaisesti matalalla A/C -suhteella (2–4 ft/min). Tuhkan kerääntyminen pusseihin tapahtuu myös samalla tavalla kuin vastavirtasuodattimissa. Puhdistus tapahtuu osastoittain johdattamalla pieni määrä puhdistettua kaasua takaisin puhdistettavaan osastoon, mikä rentouttaa suodatinpussit luhistamatta niitä täysin. Tämän jälkeen pusseja ravistellaan yläosasta noin 5–20 sekunnin ajan, mikä aiheuttaa tuhkan tippumisen suppiloon. Tämän kaltainen järjestelmä esitellään kuviossa 18. (Miller 2015, 180.)



KUVIO 18. Kaaviokuva ravistus-/tyhjennystyyppisestä kangassuodatinjärjestelmästä (Miller 2015, 180).

Painepuhallussuodattimissa A/C -suhde on korkeampi (3–4 ft/min) kuin muissa tyypeissä, mikä mahdollistaa suodattimen kompaktimman rakenteen. Savukaasu virtaa suodatinpussien ulkopuolelta sisäänpäin, mikä aiheuttaa tuhkan kertymisen suodatinpussien ulkopuolelle. Puhdistus tapahtuu kohdistamalla voimakas paineilmapurkaus pussin avoimeen päähän. Pussien romahtamisen paineilman vaikutuksesta estää niiden sisälle asennettu metallihäkki. Painepuhallussuodattimilla puhdistus pystytään suorittamaan muutama suodatinpussi kerrallaan, minkä takia koko osastoa ei jouduta sulkemaan puhdistuksen ajaksi. Ongelmana järjestelmässä on suodatinpussien lyhyempi käyttöikä verrattuna muihin järjestelmiin. Tämän kaltainen järjestelmä esitellään kuviossa 19. (Miller 2015, 180–181.)

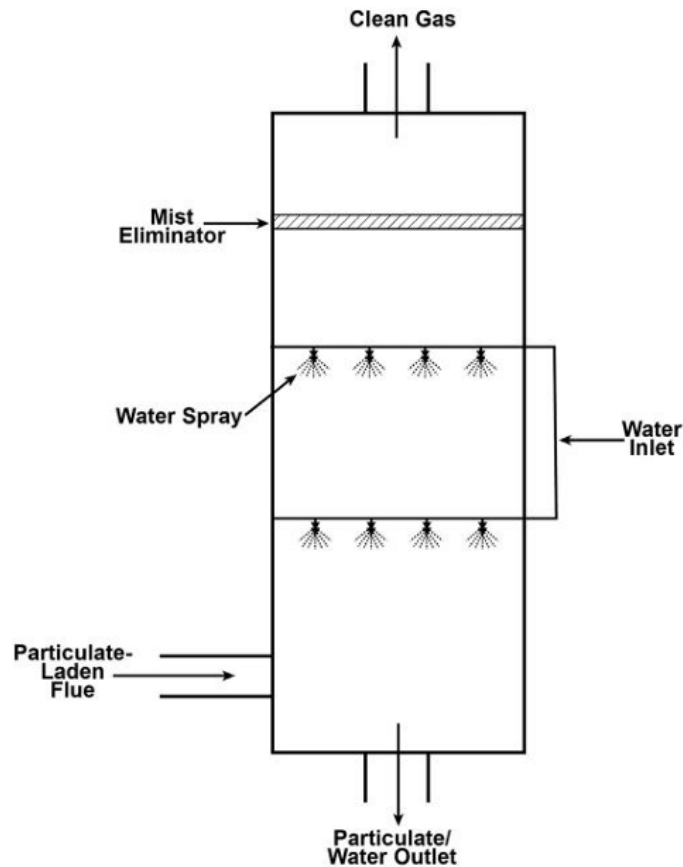


KUVIO 19. Kaaviokuva painepuhallustyypisestä kangassuodatinjärjestelmästä (Miller 2015, 181).

## 5.5 Märkäkeräimet

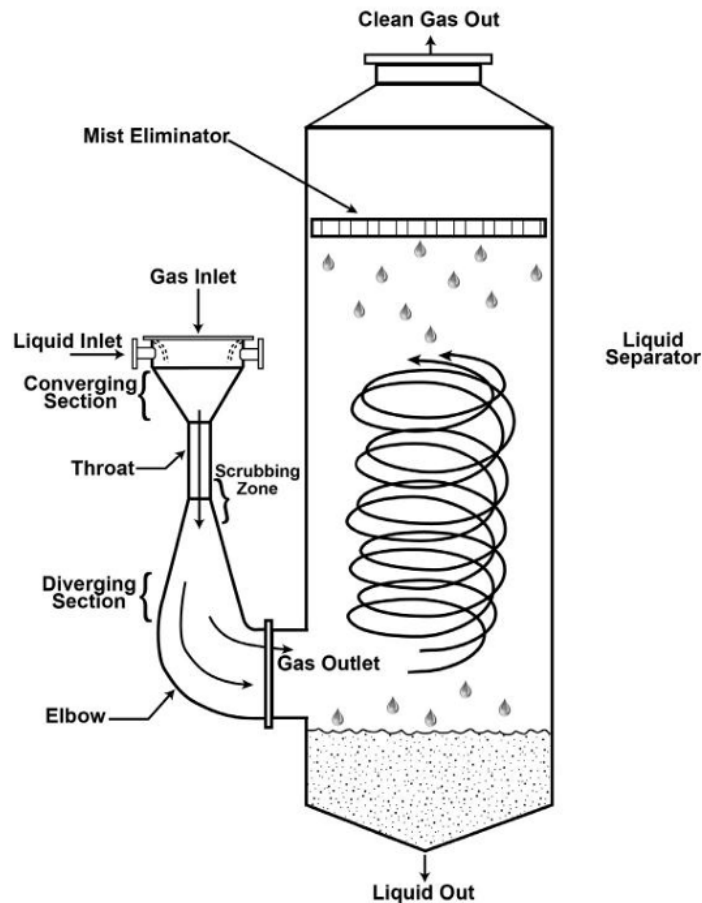
Märkäkeräimet käyttävät nestettä (yleensä vettä) hiukkasten tai aerosolien poistamiseen savukaasusta. Märkäkeräimet ovat erityisen tehokkaita hienojen hiukkasten poistamisessa (0,1–20 µm). Erotusprosessissa hiukkaset törmäävät vesipisaroihin muodostaen isompia hiukkaskertymiä, mitkä ovat helpompia erottaa savukaasun joukosta. Erotuksen mekanismi perustuu erityisesti kahteen fysikaaliseen mekanismiin inertiaaliseen iskeytymiseen ja Brownin diffuusion. Päämekanismina yli 0,5 µm hiukkasten erotuksessa toimii pääasiassa inertiaalinen iskeytyminen ja alle 0,05 µm hiukkasissa Brownin diffuusio. (Miller 2015, 182–184.)

Suihkutorni on yksi märkäkeräintyypeistä mitä käsitellään tässä luvussa venturi- ja syklonipesureiden lisäksi. Suihkutornin hiukkastenpoisto tapahtuu suihkuttamalla nestettä suihkusuuttimien avulla savukaasun joukkoon. Savukaasun virtaus tornissa voi olla pystysuuntainen tai vaakasuuntainen. Pystysuuntaisessa suihkutornissa savukaasu nousee ylöspäin tornia pitkin törmäten nestepisaroihin. Törmäyksessä muodostuu suuri ja pieniä hiukkasia sisältäviä pisaroita. Suuret pisarat putoavat painovoiman vaikutuksesta alas ja pienet pisarat kulkeutuvat tornissa olevaan sumunerottimeen. Tämän kaltainen pystysuuntainen suihkutorni mallinen märkäerotin esitellään kuviossa 19. (Miller 2015, 184–185.)



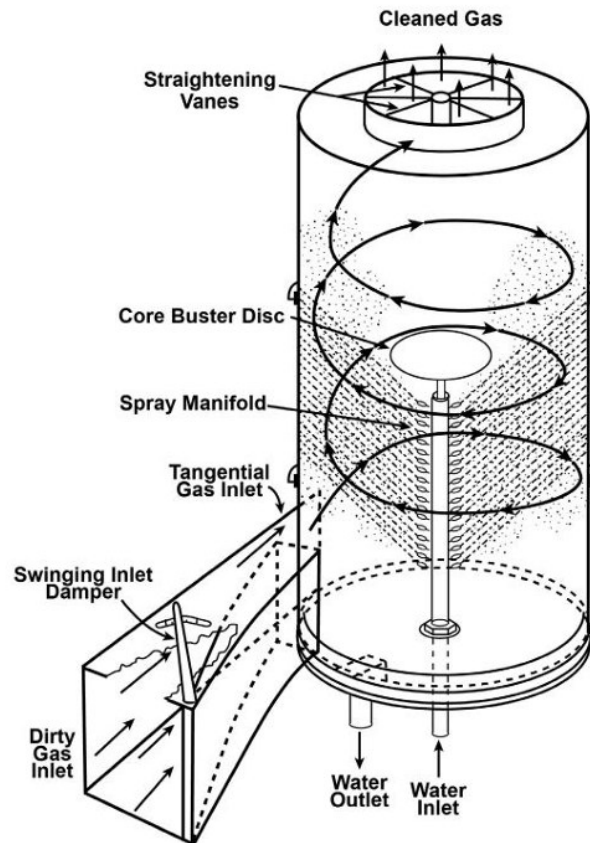
KUVIO 19. Pystysuuntainen ylöspäin virtaava suihkutornipesuri (Miller 2015, 185).

Venturipesureilla on erittäin korkea erotustehokkuus ja niitä käytetään alle kahden mikrometrin hiukkasten puhdistukseen. Erottaminen perustuu laitteen kuristettuun osioon eli kurkkuun, minkä aikana tapahtuu suurin osa hiukkasten poistosta. Kurkku aiheuttaa kaasun ja hiukkasten nopeuden merkittävän kasvun. Tämän aikana kaasu ja hiukkaset törmäävät hitaammin liikkuviin nestepisaroihin inertialliseen iskeytymisen vaikutuksesta. Kurkussa savukaasun virtausnopeus voi saavuttaa 30–183 m/s nopeuden, mistä poistuessaan kaasun virtausnopeus laajenee ja hidastuu. Tämän kaltainen venturipesuri esitellään kuviossa 20. (Miller 2015, 187–188.)



KUVIO 20. Venturipesuri (Miller 2015, 187).

Syklonipesureissa kaasuvirtaus johdetaan syklonin sisälle tangentin suuntaisesti. Syklonin sisällä savukaasu muodostaa pyörteen, minkä joukkoon aksiaalisesti asetettu monisumutin suihkuttaa nestepisaroita. Pyörteen ulkokehällä liikkuvat hiukkaset tarttuvat nestepisaroihin ja törmäävät pisaroiden mukana syklonin ulkoseinämään, mistä ne valuvat seinämää pitkin pohjalle poistettavaksi. Tämän kaltainen syklonipesuri esitellään kuviossa 21. Syklonipesuri pystyy saavuttamaan 90–100 prosentin erotustehokkuuden, mikä riippuu hiukkasten koosta. (Miller 2015, 188.)



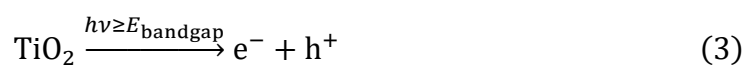
KUVIO 21. Syklonipesuri aksiaalisesti suunnatuilla suihkusumuttimilla (Miller 2015, 189).

Märkäkeräimien etuna muihin pienhiukkastenpoistolaitteisiin verrattuna on niiden eri tyyppien suuri määrä, joka mahdollistaa optimaalisimman tyypin valinnan erotusta varten. Haittapuolena ovat esimerkiksi korkeat painehäviöt ja suurien nestemäärien käsitteleminen ja hävittäminen, mitkä aiheuttavat korkeita energiakustannuksia ja ongelmia logistiikan ja ympäristön kannalta. (Miller 2015, 184.)

## 6 UUDET JA KEHITTEILLÄ OLEVAT MENETELMÄT

### 6.1 Fotokatalyyttinen NO<sub>x</sub>-absorptiotekniikka

Fotokatalyyttisessä NO<sub>x</sub>-absorptiotekniikassa valon tai keinovalon energiaa käytetään katalyytin aktivoimiseen, mikä käynnistää typen oksidien hapetus- ja hajoamisreaktiot. Aktiivisen katalyytin valenssivyöhykkeen elektronit (e<sup>-</sup>) virittyvät siirtyen johtavuusvyöhykkeelle jättäen positiivia aukkoja (h<sup>+</sup>) seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



Elektronit reagoivat hapen kanssa muodostaen superoksidiradikaaleja (O<sub>2</sub><sup>-</sup>)



ja valenssivyöhykkeen positiiviset aukot reagoivat veden kanssa muodostaen hydroksyyliiradikaaleja (OH<sup>•</sup>):



Superoksidiradikaalit yhdistyvät typpimonoksidin (NO) kanssa muodostaen typpihappoa (HNO<sub>3</sub>):



Myös hydroksyyliiradikaalit muodostavat NO<sub>x</sub>-yhdisteiden kanssa typpihappoa (reaktiot 7–9):



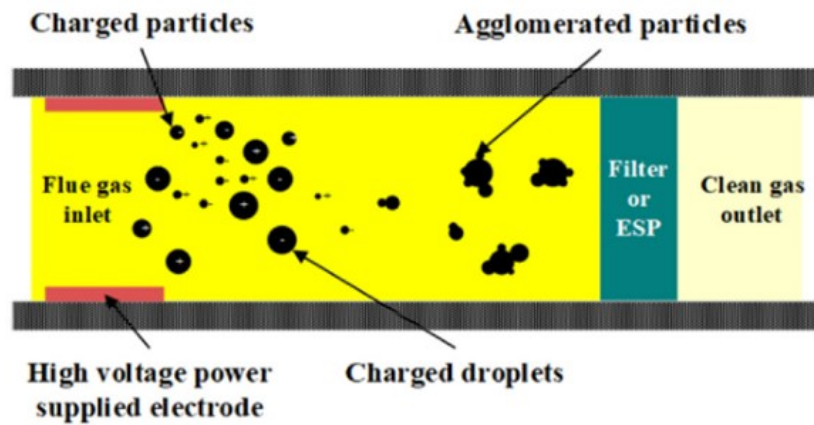
Menetelmässä katalyyttina toimivalla materiaalilla pitää olla kyky samanaikaisesti absorboida valoa ja aloittaa hapetusprosesseja. Materiaalina voidaan käyttää tyypillisesti metallioksideja, puolijohdenanopartikkeleita ja orgaanisia yhdisteitä. Titaanioksidia ( $\text{TiO}_2$ ) pidetään tutkimusten mukaan parhaimpana vaihtoehtona tällä hetkellä, sillä se on edullista, kemiallisesti stabiilia ja sitä on runsaasti saatavilla. (Larki ym. 2023, 19–20.)

Keskeisimpinä etuina menetelmällä on sen vakaus, riippumattomuus ulkoisista kemiakaaleista, vähäinen sivutuotteiden muodostus ja mahdollisuus käyttää uusiutuvia energianlähteitä. Ongelmana on katalyytin nopean passivoitumisen lisäksi kaasumaisten päästöjen kiinnittyminen katalyytin pinnalle vaatien ratkaisuksi spesifisiä materiaaleja ja reaktorin rakenteita. Menetelmä on tutkimus- ja kehitysvaiheessa, minkä takia menetelmän merkittävyys  $\text{NO}_x$ -yhdisteiden poistossa on toistaiseksi vähäinen. (Larki ym. 2023, 19–20.)

## 6.2 Pienhiukkasten agglomeraatio

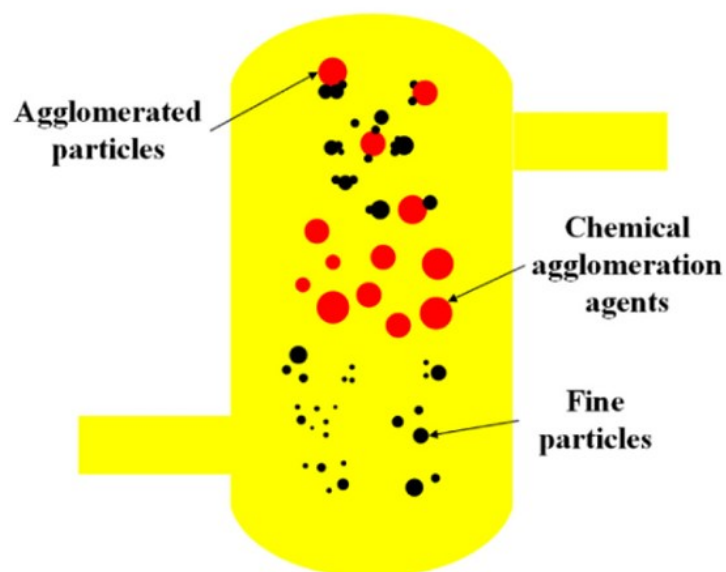
Agglomeraatiota eli hiukkasten tarttumista toisiinsa käytetään esikäsitteilymenetelmänä savukaasujen puhdistamisessa. Menetelmän tarkoituksena ei ole kerätä hiukkasia vaan parantaa hiukkasten poistojärjestelmien tehokkuutta yhdistämällä pieniä hiukkasia toisiinsa muodostaen suuria hiukkasia. Tämän avulla pienhiukkasten poistoon voidaan käyttää halvempia ja yksinkertaisempia laitteita kalliiden sijaan. Hiukkasten agglomeraatioon käytetään pääasiallisesti kemiallisia, sähköisiä, akustisia ja turbulenttisia prosesseja. (Larki ym. 2023, 17–18.)

Sähköisessä prosessissa latautuneet hiukkaset johdetaan turbulenttisten sähköisten kenttien läpi, aiheuttaen niiden kerääntymisen yhteen. Menetelmä parantaa sähköstaattisen pölynkeräimen erotustehokkuutta  $0,3\text{--}0,5\ \mu\text{m}$  kokoisten hiukkasten kohdalla noin 90 prosenttiin. Sähköisen prosessin agglomerointimekanismi esitetään kuviossa 22. (Larki ym. 2023, 17–18.)



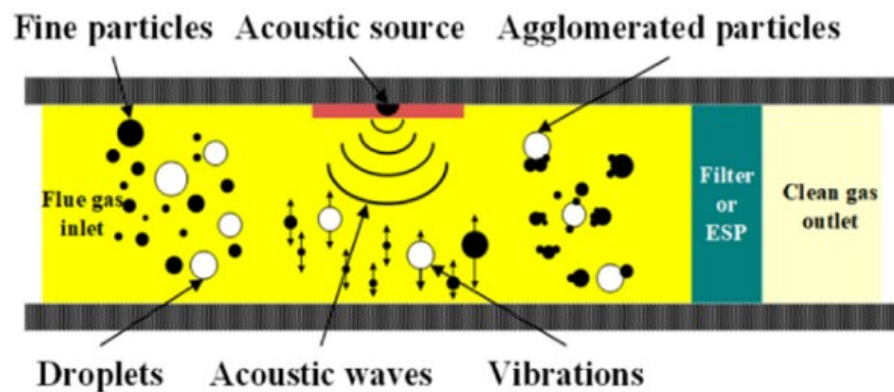
KUVIO 22. Sähköisen agglomeraatioprosessin toimintamekanismi (Larki ym. 2023, 18).

Kemiallisessa menetelmässä pienhiukkaset johdetaan kammioon, mikä sisältää korkean adheesion agglomeraatioainetta. Törmätessään toisiinsa aineen ja hiukasten tartuntavoimat aiheuttavat niiden kasaantumisen toisiinsa. Pääasiallisesti aineena käytetään vettä, polysorbaatti 80:tä, polyakryyliamidia ja κ-karrageenia. Näistä aineista käytetyin on vesi, vaikka sillä on huonot adheesio ominaisuudet muihin verrattuna. Vettä käyttäessä agglomeraatioaineena voidaan sähköstaattisen pölynkeräimen erotustehokkuutta tehostaa ehostaa tehostaa noin 30 prosentilla. Kemiallisen prosessin agglomeroitumekanismi esitetään kuviossa 23. (Larki ym. 2023, 17–18.)



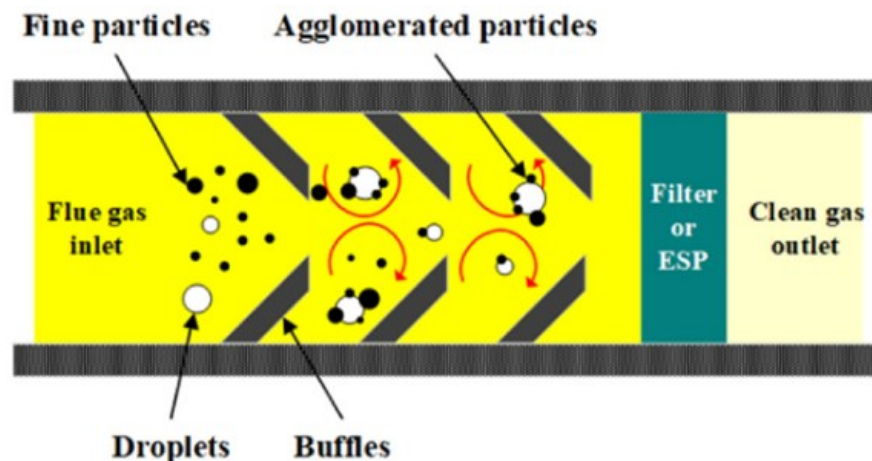
KUVIO 23. Kemiallisen agglomeraatioprosessin toimintamekanismi (Larki ym. 2023, 18).

Akustista agglomeraatiota käytetään yleensä pölyisen kaasun esikäsittelyssä ennen sähköstaattista pölynkeräintä tai kangassuodattimia. Menetelmässä hiukkaset altistetaan kammiossa äänialloille aiheuttaen niiden värähtelyä, mikä aiheuttaa hiukkasten törmäämisen toisiinsa (kuvio 24). Suuremmalla taajuudella menetelmästä saadaan tehokkaampi, mutta samalla kustannukset kasvavat energiankulutuksen lisääntymisen myötä. Menetelmän avulla sähköstaattisen pölynkeräimen erotustehokkuus nousee noin 98,3 prosenttiin. (Larki ym. 2023, 17–18.)



KUVIO 24. Akustisen agglomeraatioprosessin toimintamekanismi (Larki ym. 2023, 18).

Turbulenttisessa agglomeraatiossa turbulaattoreilla luodaan kaasuvirtaan turbulenssia, mikä lisää hiukkasten toisiinsa törmäämisen mahdollisuutta aiheuttaen agglomeraatiota. Menetelmää käytetään yleensä yhdessä kemiallisen prosessin kanssa (kuvio 25). (Larki ym. 2023, 17–18.)



KUVIO 25. Kemiallinen ja turbulenttinen agglomeraatioprosessin toimintamekanismi (Larki ym. 2023, 18).

Yhdistämällä menetelmät saadaan kangassuodattimen erotustehokkuutta hiukkasten (alle 0,1  $\mu\text{m}$ ) kohdalla parannettua 89,7 prosenttiin. Tutkimuksissa on myös havaittu muiden yhdistelmä menetelmien parantavan merkittävästi erotustehokkuutta etenkin pienimpien hiukkasten kohdalla. (Larki ym. 2023, 17–18.)

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Uusiutuvien energianlähteiden osuus maailman sähköntuotannosta on ollut kasvussa jo monien vuosien ajan, mutta silti yli puolet maailman energiasta tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Fossiilisten polttoaineiden käyttö voimalaitoksissa tuottaa merkittäviä määriä ilmansaasteita, mikä on johtanut useiden päästöjen käsittelymenetelmien kehittämiseen vuosikymmenten varrella. Nykyaikana kiristynyt lainsäädäntö liittyen teollisuuden päästöihin lisää tarvetta kehittää olemassa olevia menetelmiä entistä tehokkaimmiksi ja ympäristöystävällisemmiksi tai luoda kokonaan uudenlaisiin tekniikoihin perustuvia jälkikäsittelymenetelmiä. Toisaalta vaihtoehtona on myös siirtyä pois fossiilisista polttoaineista, mikä tuo energiateollisuudelle toisenlaisen varteenotettavan vaihtoehdon.

Opinnäytetyön tutkimuskysymyksen mukaisesti haettiin vastausta siihen, mitä  $\text{SO}_x$ -,  $\text{NO}_x$ - ja pienhiukkaspäästöjen jälkikäsittelymenetelmiä on. Tämä yleiskatsaus osoittaa sen, että näiden päästöjen jälkikäsittelyyn on käytössä monia tehokkaita menetelmiä. Johtopäätöksenä voidaan todeta savukaasujen jälkikäsittelyn olevan olennainen osa kestäväää energiantuotantoa. Työstä huomataan myös se, että sopivan menetelmän valinta ei perustu pelkästään sen tehokkuuteen vaan siihen vaikuttaa myös merkittävästi taloudelliset ja rakenteelliset tekijät. Tämän takia monet voimalaitosten savukaasujen puhdistusjärjestelmistä on mitoitettu yksilöllisesti sopiviksi, mikä tarkoittaa yleensä useampien eri menetelmien yhdistämistä toimivaksi kokonaisuudeksi. Opinnäytetyö soveltuu myös tavoitteiden mukaisesti käytettäväksi tulevalla opintojaksolla kurssimateriaalin perustana.

Tästä työstä rajattiin kokonaan pois esikäsittelymenetelmät. Esikäsittelymenetelmät ovat tärkeä osa voimalaitosten savukaasujen puhdistusjärjestelmiä etenkin  $\text{SO}_x$ -,  $\text{NO}_x$ - ja hiilidioksidipäästöjen hallinnassa. Tämän vuoksi ne sopisivat hyvin jatkotutkimuksen aiheeksi.

## LÄHTEET

European Commission. n.d. c. Industrial and Livestock Rearing Emissions Directive (IED 2.0). Verkkosivu. Viitattu 24.3.2025.

[https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-and-livestock-rearing-emissions-directive-ied-20\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-and-livestock-rearing-emissions-directive-ied-20_en)

European Commission. n.d. b. Industrial Emissions and Safety. Verkkosivu. Viitattu 24.3.2025.

[https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety_en)

European Commission. n.d. d. Industrial Emissions Portal Regulation (IEPR). Verkkosivu. Viitattu 24.3.2025.

[https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-emissions-portal-regulation-iepr\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-emissions-portal-regulation-iepr_en)

European Commission. n.d. e. The Medium Combustion Plant Directive. Verkkosivu. Viitattu 24.3.2025.

[https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/medium-combustion-plant-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/medium-combustion-plant-directive_en)

European Commission. n.d. a. Zero Pollution Action Plan. Verkkosivu. Viitattu 24.3.2025.

[https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en)

Larki, I., Zahedi, A., Asadi, M., Forootan, M., Farajollahi, M., Ahmadi, R. & Ahmadi, A. 2023. Mitigation approaches and techniques for combustion power plants flue gas emissions: A comprehensive review. Elsevier Science Direct Journals. Viitattu 22.4.2025.

<https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0048969723047332?via%3Dihub>

Miller, B. 2015. Fossil fuel emissions control technologies. 1. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Rackley, S. 2017. Carbon capture and storage. 2. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Speight, J. 2019. Natural gas: A basic handbook. 2. painos. Houston: Gulf Professional Publishing.

Woodruff, E., Lammers, H. & Lammers, T. 2017. Steam plant operation. 10. painos. New York city: McGraw Hill Education.