



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2020 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

# **Bruk av masovns­slag som alternativt bedmateriale ved forbrenning av avfall med sirkulerende fluidisert bed-teknologi – en litteraturstudie**

Use of Blast Furnace Slag as Alternative Bed  
Material during Combustion of Waste using  
Circulating Fluidized Bed Technology  
– a Literature Review

**My An Thi Nguyen**  
Miljøfysikk og fornybar energi



# Sammendrag

Sirkulerende fluidisert bed (CFB) er en teknologi som har blitt mer etablert de siste tiårene når det gjelder forbrenning av avfall og biomasse på grunn av høy forbrenningseffektivitet og fleksibilitet ved bruk av brensel av varierende kvalitet. Kwartssand er vanligvis anvendt som bedmateriale i forbrenningsprosessen, men dette medfører utfordringer med defluidisering som følge av agglomerering i bedet. Sanden skiftes ut med jevne mellomrom for å minske risikoen for agglomerering, noe som betyr et stort forbruk av en ikke-fornybar ressurs.

Denne oppgaven har tatt utgangspunkt i Kvitebjørn Bio-El AS sitt avfallsforbrenningsanlegg i Fredrikstad, og undersøkt om bruk av masovnsstoff egner seg som et alternativt bedmateriale i anlegget som er basert på CFB-teknologi. Det har blitt gjennomført en litteraturstudie for å få en oversikt over relevant forskning innen feltet med fokus på utfordringer knyttet til agglomerering, forbruk av bedmateriale og utslipp til luft. Et utvidet litteratursøk ga i alt 138 artikler, og syv av disse ble vurdert som spesielt relevante og dannet grunnlaget for videre fordypning. Litteraturstudien har i tillegg blitt kombinert med erfaring fra bruk av masovnsstoff i testkjøringer og drift ved ulike finske forbrenningsanlegg.

I alle de utvalgte fordypningsartiklene ble det presentert gode resultater ved bruk av masovnsstoff som bedmateriale sammenlignet med kvartssand og andre alternative materialer eller tilsetningsstoffer som det ble testet med. Flertallet av de ulike testforsøkene hadde som fokus på å studere sammenhengen mellom bedmateriale og agglomerering, og viste at masovnsstoff reduserte tendensen til agglomerering og var spesielt godt egnet ved bruk av brensel av biomasse med høyt innhold av alkalimetaller.

Basert på litteraturen har det ikke blitt observert signifikante endringer i røykgass ved bruk av ulike bedmaterialer. Resultater fra drift i de ulike finske anleggene har vist en betydelig reduksjon i behov for utskiftning av bedet som følge av mindre agglomerering.

Litteraturstudien avdekket at det er utført lite forskning på CFB-anlegg som bruker avfall som brensel. Sammenlignet med biomasse har dette gjerne mindre ensartet brenselsammensetning og andre kjemiske egenskaper som kan gi andre utfordringer i kombinasjon med masovnsstoff som bedmateriale. Innhold av glass trekkes frem som en mulig årsak til agglomerering i stedet. Riikinvoima Oy sitt energigjenvinningsanlegg har mange likheter med

Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg. Erfaringer fra deres testperiode med bruk av luftkjølt masovns slag (GR-Granul) tyder på utelukkende positive funn når det gjelder både redusert agglomerering og forbruk av bedmateriale.

# Abstract

Circulating fluidized bed (CFB) is a technology that has become more established the last few decades for combustion of waste and biomass because of its high efficiency and flexibility when using fuels of varying quality. Quartz sand is the most common bed material in the combustion process, but it comes with challenges related to defluidization caused by bed agglomeration. The sand needs to be periodically replaced to reduce the chances of agglomeration, which results in large consumption of a non-renewable resource.

This thesis is based on Kvitebjørn Bio-El AS's waste-to-energy plant in Fredrikstad and examines the suitability of using blast furnace slag as an alternative bed material in the plant that is based on CFB-technology. A literature review has been conducted to gain an overview of relevant research in the field, focusing on challenges linked to agglomeration, consumption of bed material and air emissions. An extended literature search resulted in 138 articles, where seven of these were evaluated as especially relevant and formed the basis for further in-depth study. The literature study has been combined with experiences from the use of blast furnace slag in test runs and operations at different Finnish waste-to-energy plants.

All of the selected in-depth articles presented positive results with the use of blast furnace slag as bed material compared to quartz sand and other alternative materials or additives which were used in tests. The majority of the experiments were focused on studying the relationship between bed material and agglomeration, and showed that blast furnace slag reduced the tendency for agglomeration, and was especially suitable for the use of biomass fuels with a high content of alkali metals.

There has not been observed any significant changes in flue gas with the use of different bed materials. Results from operations in the different facilities in Finland have shown a considerable reduction in the need for replacement of the bed material as a result of less agglomeration.

The literature review revealed that little research has been done on CFB-plants that use waste as fuel. Compared with biomass it usually has a less uniform fuel composition and other chemical properties that can present different challenges in combination with blast furnace slag as bed material. Glass contents are highlighted as a possible cause of agglomeration

instead. Riikinvoima Oy's waste-to-energy plant has many similarities with Kvitebjørn Bio-El's plant. Experiences from their test period with the use of air-cooled blast furnace slag (GR-Granul) indicate only positive findings in terms of both reduced agglomeration and expenditure of bed material.



# Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på en femårig mastergrad i miljøfysikk og fornybar energi på Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Det har vært et lærerikt og utfordrende siste semester, og interessant å se nærmere på en mulighet for bruk av et avfallsprodukt som råvare i ny produksjon.

Jeg vil rette en stor takk til veileder John Morken for god oppfølging og alle nyttige innspill underveis i prosessen. Videre vil jeg takke Rune Dirdal ved Kvitebjørn Bio-El for muligheten til å være en del av testprosjektet på anlegget deres og å få innblikk i en spennende teknologi, samt å ha vært veldig hjelpelig med å svare på spørsmål.

Takk til kjæreste, familie og venner for all støtte, oppmuntringer og tålmodighet denne perioden. En siste felles takk rettes til medstudenter og kollektivet for alltid velkomne pauser i skriveprosessen og alle gode minner sammen i løpet av studietiden i Ås.

Oslo, 17. august 2020

My An Thi Nguyen





# Innhold

<b>Tabeller .....</b>	<b>xi</b>
<b>Liste over forkortelser .....</b>	<b>xii</b>
<b>1. Innledning .....</b>	<b>1</b>
1.1. Bakgrunn.....	1
1.1.1.    Kvitebjørn Bio-El AS.....	1
1.2. Problemstilling og målsetning.....	3
1.3. Avgrensninger .....	4
<b>2. Teori .....</b>	<b>5</b>
2.1. Avfall.....	5
2.2. Forbrenning med energiutnyttelse.....	6
2.2.1.    Avfallsforbrenning i Norge.....	6
2.2.2.    Forbrenningsprosessen .....	7
2.3. Restprodukter fra avfallsforbrenning.....	8
2.3.1.    Røykgass.....	8
2.4. Forbrenningsteknologi.....	9
2.4.1.    RDF og SRF .....	10
2.4.2.    Fluidisert bed .....	10
2.5. Bedmaterialer .....	12
2.5.1.    Kvartssand .....	12
2.5.2.    Masovnsstoff.....	12
2.5.3.    Agglomerering og sintring av bed.....	14
<b>3. Metode .....</b>	<b>15</b>
3.1. Litteraturstudie .....	15
3.2. Pilotstudier og driftserfaringer .....	17
<b>4. Resultater .....</b>	<b>17</b>
4.1. Litteraturanalyse.....	18
4.2. Fordypning i utvalgte publikasjoner .....	19
4.2.1.    Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction .....	21
4.2.2.    Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler .....	22

4.2.3.	Bed agglomeration characteristics of biomass fuels using blast-furnace slag as bed material	23
4.2.4.	Fullskaleforsök med hyttsand som bäddmaterial i 12 MW avfallseldad BFB-panna	24
4.2.5.	Alternativa bäddmaterial i fb/cfb-pannor .....	25
4.2.6.	Effect of GR Granule Used as Bed Material to Reduce Agglomeration in BFB Combustion of Biomass with High Alkali Metal Content.....	27
4.2.7.	Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers .....	28
4.3.	Testkjøringer og drift.....	28
4.3.1.	VTT pilotstudier.....	28
4.3.2.	Drift i anlegg.....	29
4.3.3.	Riikinvoima testprosjekt.....	30
<b>5.</b>	<b>Diskusjon av litteratur .....</b>	<b>31</b>
5.1.	Litteratursøk og litteraturanalyse.....	31
5.2.	Fordypningsartikler og erfaringer fra testkjøringer og drift i anlegg.....	32
<b>6.</b>	<b>Oppsummering av funn .....</b>	<b>34</b>
<b>7.</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>35</b>
7.1.	Videre forskning og utvikling .....	36
<b>8.</b>	<b>Referanser .....</b>	<b>37</b>

# Tabeller

Tabell 1: Gjennomsnittsverdier beregnet for energi levert årlig av Kvitebjørn Bio-El AS, basert på drift i 2015-2019 (Dirdal, R., 2020).....	2
Tabell 2: Kjemisk sammensetning i luftkjølt og vannkjølt masovnslegg (GR-Granul) målt i vektprosent [wt %] (Fescon AB, u.å.).....	13
Tabell 3: Oversikt over antall treff i de valgte søkedatabasene ved litteratursøk begrenset til tidsperioden 2000-2020.....	16
Tabell 4: Oversikt over publikasjoner som ble valgt ut til videre fordypning.....	18
Tabell 5: Oversikt over oppsett for de ulike forsøkene som er omtalt i utvalgte publikasjoner i litteraturstudien.....	20

# Liste over forkortelser

<b>Forkortelse</b>	<b>Engelsk navn</b>	<b>Norsk navn</b>
<b>BFB</b>	Bubbling Fluidized bed	Boblende fluidisert bed
<b>CFB</b>	Circulating fluidized bed	Sirkulerende fluidisert bed
<b>EDS/EDX</b>	Energy Dispersive X-ray	Energispredende røntgenspektroskopi
<b>FB</b>	Fluidized bed	Fluidisert bed
<b>FBC</b>	Fluidized bed combustion	Fluidisert bed-forbrenning
<b>PVC</b>	Polyvinyl chloride	Polyvinylklorid
<b>RDF</b>	Refuse Derived Fuel	Foredlet avfallsbrensel
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscopy	Sveipelektronmikroskop
<b>SRF</b>	Solid Recovered Fuel	Fast gjenvunnet avfallsbrensel
<b>XRD</b>	X-ray Powder diffractometer	Røntgendiffraksjon

# 1. Innledning

Økonomisk vekst og økt forbruk gir mer avfall. Verdensbanken anslår at det innen 2050 forventes at det genereres 3,4 milliarder tonn avfall årlig globalt, noe som tilsier en økning på om lag 70 % i forhold til situasjonen de siste par årene (Kaza et al., 2018). Den voksende mengden avfall utgjør en utfordring for både helse og miljø. Dette stiller krav til at avfallet håndteres på en forsvarlig og hensiktsmessig måte for å oppnå en god ressursutnyttelse.

## 1.1. Bakgrunn

Selskapet Kvitebjørn Bio-El AS har et pågående prosjekt i perioden 2019-2023 for å undersøke og prøve ut ulike bedmaterialer og gjøre enkle modifiseringer av energigjenvinningsanlegget sitt for å få ned sandforbruket. Et mulig bedmateriale er masovnsstoff, som blant annet finnes kommersielt under varemerket GR-Granul og anvendes i dag ifølge en forskningsstudie utført av VTT Expert Services Oy (nå Eurofins Expert Services Oy) i et titalls anlegg i Finland som forbrenner brensel av biomasse med gode resultater (Klasila & Ilvonen, 2018). Dette er bakgrunnen for oppstarten av prosjektet til Kvitebjørn Bio-El for å se om tilsvarende effekter er mulige å oppnå ved deres anlegg ved bruk av masovnsstoff som erstatning for sand som bedmateriale i forbrenningsprosessen.

### 1.1.1. Kvitebjørn Bio-El AS

Kvitebjørn Bio-El AS driver et energigjenvinningsanlegg (se **Feil! Fant ikke referanse kilden.**) som er lokalisert på Øra i Fredrikstad. Anlegget eies av Kvitebjørn Energi AS og har vært i drift siden 2008. Drift og vedlikehold ivaretas av en ekstern leverandør, som er nabobedriften FREVAR KF (Daimyo, u.å.).



Figur 1: Kvitebjørn Bio-El AS sitt energigjenvinningsanlegg i Fredrikstad. Foto: Felix Ellingsrud.

Anlegget benytter avfallsbrensel og har en forbrenningsovn som baserer seg på sirkulerende fluidisert bed-teknologi (CFB). Anlegget har en installert innfyrt effekt på 25 MW og sluttbehandler i gjennomsnitt 50 000 tonn avfall årlig som medfører en energileveranse på ca. 130 GWh generert (Dirdal, R., personlig kommunikasjon, 27. februar 2020). Dette fordeles på produksjon av fjernvarme, industridamp og elektrisitet, og Tabell 1 viser en oversikt over denne fordelingen og ulike formål og industrikunder som er mottakere av energileveransene. Anlegget produserer varmt vann som leveres til Fredrikstad Fjernvarme AS som forsyner fjernvarmenettet i Fredrikstad. Høytrykksdamp leveres via rør til lokal industri på Øra. Elektrisitet omdannes gjennom egen turbin og eksporteres direkte til nettet til produksjon av strøm.

Tabell 1: Gjennomsnittsverdier beregnet for energi levert årlig av Kvitebjørn Bio-El AS, basert på drift i 2015-2019 (Dirdal, R., 2020).

Energiform	Energi levert [GWh]	Formål
Fjernvarme (varmt vann)	62	Fredrikstad Fjernvarme AS
Damp	61	Denofa AS, Kronos Titan AS, Reichold AS, Kemira Chemicals, FREVAR (biogassanlegg)

<b>Elektrisitet</b>	6	Markedskraft/strømnettet
---------------------	---	--------------------------

I dag benytter Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg seg av jomfruelig sand fra Baskarp i Sverige til forbrenningsprosessen. Sanden transporteres dermed om lag 300 km, og sandforbruket er 1500 – 2000 tonn årlig, avhengig av anleggets driftstid (Dirdal, R., personlig kommunikasjon, 27. februar 2020).

## 1.2. Problemstilling og målsetning

Oppgaven har som mål å undersøke bruk av masovnsstoff som et alternativt bedmateriale ved avfallsforbrenning i et sirkulerende fluidisert bed-anlegg. Gjennom en litteraturstudie skal oppgaven gi en oversikt over forskning som er utført på dette, og undersøke om masovnsstoff tilfredstiller tekniske forutsetninger sammenlignet med konvensjonelle bedmaterialer som kvartssand. Dette er med utgangspunkt i Kvitebjørn Bio-El sitt forbrenningsanlegg i Fredrikstad som.

Problemstillingen for oppgaven er: I hvilken grad egner masovnsstoff seg til å anvendes som bedmateriale ved forbrenning av avfall i et forbrenningsanlegg basert på sirkulerende fluidisert bed-teknologi?

Denne presiseres ved følgende underspørsmål:

- Hvilken betydning har valg av biomasse eller avfall som brensel?
- Hvordan påvirker bedmaterialet fluidiseringsproblemer som følge agglomerering i bedet?
- Hvilken innvirkning har endring av bedmateriale for forbruk av jomfruelig natursand?
- Kan man forvente at karakteristikken på røykgassen endrer seg sammenlignet med dagens situasjon?



### 1.3. Avgrensninger

På grunn av oppgavens omfang og tid tilgjengelig har det blitt gjort noen avgrensninger av oppgaven for å få en mest mulig representativ oversikt over forskning for å belyse problemstillingen. Disse er beskrevet i følgende punkter:

- Utelukket bruk av fluidisert bed-teknologi ved gassifisering.
- Oppgaven har Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg som referanse, og ser kun på egenskaper til masovnslegg (produktet GR-Granul) levert av Fescon AB.
- Kun publikasjoner i litteraturstudien som er utgitt etter 2000.
- Oppgaven undersøker ikke om bruk av masovnslegg har økonomiske forutsetninger for å erstatte bruken av Baskarpsanden i dag.
- Miljøbelastninger og kostnader tilknyttet transport av bedmateriale og brensel er ikke inkludert.

## 2. Teori

Dette kapitlet utdyper det teoretiske grunnlaget som analysen er bygget på. Først defineres begrepet avfall i sammenheng med forbrenning med energiutnyttelse, og videre beskrives de ulike stegene i en forbrenningsprosess med fokus på sirkulerende fluidisert bed-teknologi.

### 2.1. Avfall

Avfall defineres i forurensningsloven § 27 som «løsovergjenstander eller stoffer som noen har kassert, har til hensikt å kassere eller er forpliktet til å kassere» (Forurensningsloven, 1981). Avløpsvann og avgasser er ikke medregnet som avfall i denne definisjonen.

Avfall kan hovedsakelig inndeles som ordinært eller farlig avfall, der sistnevnte er avfall som krever særskilt behandling på grunn av innhold av potensielt miljø- og helseskadelige stoffer (Forurensningsloven, 1981). I 2018 ble det ifølge avfallsregnskapet til Statistisk Sentralbyrå (SSB) generert 11,8 millioner tonn avfall i Norge. Av dette ble 1,54 millioner tonn (13 %) farlig avfall levert til godkjent behandling i Norge (Statistisk sentralbyrå, 2019).

Det skilles videre mellom om avfallet kommer fra husholdning eller næring. Med husholdningsavfall menes avfall som oppstår i private husholdninger, og det er kommunens ansvar å samle inn og håndtere dette i deres område. Næringsavfall er avfall fra offentlige og private virksomheter og institusjoner og håndteres av et valgt avfallsselskap.

Norsk avfallspolitikk følger prioriteringene i avfallshierarkiet som er styrende i EUs rammedirektiv for avfall. Dette har som høyeste prioritet å forebygge at avfall oppstår, og deretter håndtere avfallet som finnes i en prioritert rekkefølge til ombruk, materialgjenvinning, energiutnyttelse og forsvarlig sluttbehandling ved deponering (Miljøverndepartementet, 2013).

Energiinnholdet i avfall som ikke egner seg til ombruk eller materialgjenvinning kan utnyttes ved direkte forbrenning, ved biologisk omdannelse av organisk materiale til biogass (anaerob nedbrytning) eller ved å produsere et fast brensel som kan brukes i kraftverk, sementovner og andre forbrenningsanlegg (Christensen et al., 2011).

## 2.2. Forbrenning med energiutnyttelse

Forbrenning er en termisk konverteringsprosess som foregår med overskudd av oksygen. Ved forbrenning av avfall vil karbon i det faste brenselet oksidere og danne karbondioksid (CO<sub>2</sub>) og vann (H<sub>2</sub>O).

Forbrenning av avfall har blitt praktisert som en systematisk måte å håndtere avfall på siden slutten av 1800-tallet (Christensen et al., 2011). Det har til hensikt å redusere volum av innsamlet avfall som ikke kan gjenvinnes eller gå til ombruk, samt destruksjon av farlige stoffer og sikre en kompakt og steril rest.

I tillegg er det også fokus på energigjenvinning i prosessen. Energiutnyttelse ved forbrenning av avfall sikrer at ressursene i avfall som ikke kan gå til ombruk eller materialgjenvinning (på grunn av dårlig kvalitet eller innhold av helse- og miljøskadelige stoffer) fortsatt har en verdi. Dette erstatter også bruk av andre kilder og fossile brensler og kan utnyttes til ulike formål:

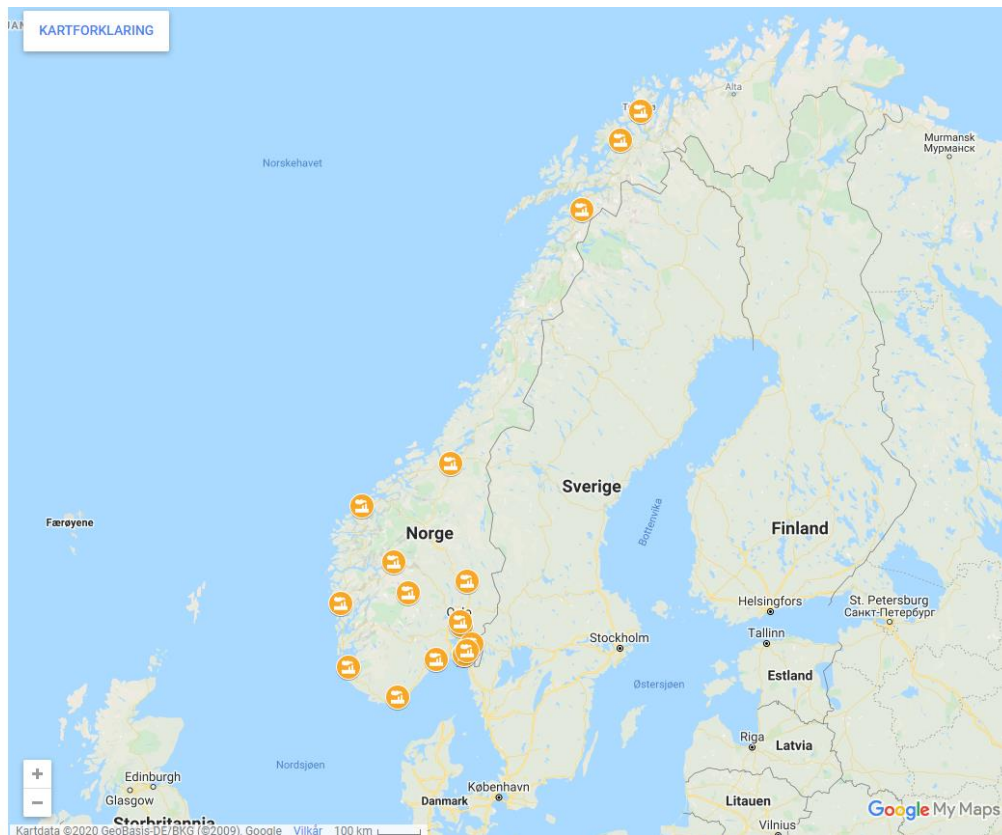
- Varmt vann til fjernvarme
- Industridamp for ulike næringer
- Elektrisitet
- Kraftvarme

### 2.2.1. Avfallsforbrenning i Norge

I 2017 ble 31 % av total mengde innlevert avfall (ikke inkludert lett forurensede masser) levert til forbrenning (Statistisk sentralbyrå, 2019). Ifølge SSB konverterte norske energigjennvinningsanlegg i 2017 4600 GWh energi fra rundt 1,6 millioner tonn restavfall som ikke kunne ombrukes eller materialgjenvinnes. Omtrent 3600 GWh ble utnyttet til fjernvarme, industridamp og elektrisitet. Bidraget fra energigjenvinning til fjernvarme har økt jevnt hvert år siden 2009 (Wilsgaard, 2018).

Per i dag er det 20 avfallsforbrenningsanlegg i Norge (se Figur 2), derav to er tilknyttet sementfabrikker. Forbrenningsteknologien til norske avfallsforbrenningsanlegg er i stor grad basert på ristforbrenning. 18 av anleggene har ovner med ristforbrenning, og de resterende to

anvender CFB-teknologi. Dette er Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg i Fredrikstad, og Haraldrud energigjenvinningsanlegg i Oslo (Avfall Norge, 2020).



Figur 2: Oversiktsbilde av forbrenningsanlegg i Norge. Kartet er laget av Avfall Norge ved bruk av Google My Maps.

### 2.2.2. Forbrenningsprosessen

Prosessen ved forbrenning av avfall foregår i flere trinn. Brenselet går hovedsakelig gjennom fire faser i forbrenningskammeret:

1. Tørrking
2. Forgassing
3. Utglødning
4. Utbrenning av røykgassene

## 2.3. Restprodukter fra avfallsforbrenning

I tillegg til energien som frigjøres i forbrenningsprosessen, dannes det restprodukter og utslipp av røykgass til atmosfæren. For at energigjenvinning med brensel basert på avfall skal gjennomføres, er det en forutsetning at røykgassutslippene overholder krav til grenseverdier for utslipp til luft som er fastsatt i avfallsforskriften, og at støy- og luktp problemer minimeres (Avfallsforskriften, 2004).

### 2.3.1. Røykgass

Forbrenning medfører utslipp til luft som har negativ innvirkning på klima og helse. Denne røykgassen består av ulike forurensende stoffer som karbonmonoksid (CO), saltsyre (HCl), svoveloksid (SO<sub>x</sub>), nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) og partikulær luftforurensning (støv). I tillegg dannes tungmetaller, dioksiner og furaner i asken. Dannelsen av disse forurensningene i en fluidiserende bed-forbrenningsovn avhenger av driftsforhold og brenselegenskaper (Van Caneghem et al., 2012):

- CO i røykgassen i fluidisert bed-forbrenningsovner og forbrenningsanlegg generelt er et resultat av ufullstendig forbrenning av karbonholdig materiale. Konsentrasjonen av CO i avgassene øker generelt når andelen biomasse i avfallsbrenselet øker.
- Avfall som forbrennes i en fluidisert bed-forbrenningsovn inneholder varierende mengder klor i form av klororganiske forbindelser eller klorider. Dette gjelder spesielt for PVC-plast i husholdningsavfallet. Ved forbrenning av PVC dannes saltsyre (gass) som kan føre til problemer med korrosjon i blant annet brennkammeret i forbrenningsanlegget.
- Ved forbrenning oksideres også de svovelholdige forbindelsene i avfallet, og gassen svoveldioksid (SO<sub>2</sub>) dannes. I likhet med klorholdige forbindelser kan denne kan også føre til problemer med korrosjon i anlegget.
- NO<sub>x</sub> er en fellesbetegnelse på blandingen av gasser som inneholder nitrogen, nærmere bestemt nitrogenoksidene NO (nitrogenmonoksid) og NO<sub>2</sub> (nitrogendioksid). De nitrøse gassene dannes hovedsakelig ved forbrenning ved høy temperatur og bidrar til forsurening, fotokjemisk smog og eutrofiering. Lystgass (N<sub>2</sub>O) er en drivhusgass som anses som neglisjerbar for de fleste forbrenningsprosesser, men kan bli av betydning i

forbrenning der fluidisert bed-teknologi anvendes på grunn av det spesifikke temperaturområdet som kreves. Utslipp av nitrogenoksider vil variere avhengig av brensel, men det finnes flere måter å kontrollere og/eller redusere utslipp av NO<sub>x</sub> ved forbrenning i en fluidisert bed-forbrenningsovn. De viktigste teknikkene er å kontrollere av tilførsel av luft og brensel, samt innføring av et NO<sub>x</sub>-kontrollsystem.

- Partikulært materiale (PM), eller svevestøv, er en betegnelse på små luftbårne partikler. Disse vil variere i både størrelse og sammensetning av ulike forbindelser. Når avfall forbrennes i et anlegg med energigjenvinning vil de grovere delene av PM i røykgassen, som kan skyldes agglomerering i bedet, fjernes i dampkjelen og samles som en del av bunnasken. Hovedandelen av askeinnholdet i avfallet ender som bunnaske eller slagg etter forbrenning. Etter fjerning av uforbrent materiale og metaller kan dette gå til deponi eller gjenvinnes som aggregat til veikonstruksjon og byggemateriale (Buekens, 2013).

Bunnasken fra forbrenning på Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg leveres lokalt til FREVAR sitt deponi på Øra. Flyveaske separeres ved filtrering i røykgassrensingen. Ved Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg deponeres dette til NOAH sitt deponi på Langøya (Dirdal, R., personlig kommunikasjon, 27. april 2020).

## 2.4. Forbrenningsteknologi

Valg av forbrenningsteknologi i et forbrenningsanlegg avhenger av ulike faktorer som blant annet type avfall som skal behandles, ønsket kapasitet og krav til røykgassutslipp. Avfall til forbrenning kan komme fra både husholdninger og næring, og vil dermed bestå av et variert innhold av type materialer og stoffer. Det ulike avfallsforbrenningsanlegg har til felles er at de er designet for å behandle avfall med variert sammensetning (Christensen et al., 2011).

Forbrenning av avfall kan foregå i et anlegg basert på hovedsakelig ristovn-teknologi eller fluidisert bed-teknologi (Taherzadeh & Richards, 2016). I ristforbrenningsanlegg kan blandet avfall mates direkte inn i ovnen uten behov for forbehandling. Forbrenningsanlegg med fluidisert bed-kjel krever derimot et homogent brensel som foredlet avfallsbrensel (RDF) eller fast gjenvunnet avfallsbrensel (SRF).

### 2.4.1. RDF og SRF

Avfall som ikke går til direkte forbrenning kan omformes til fast brensel for å produsere varme og elektrisitet. Dette er tilfellet for brensel som skal anvendes i avfallsforbrenningsanlegg med CFB-teknologi. Her må utsortert husholdningsavfall og/eller næringsavfall gjennom forbehandling og bearbeides mekanisk for å få en mer ensartet partikkelstørrelse, ved fjerning av store partikler og ikke brennbare materialer som metaller og glass. Dette foregår gjennom en sammensatt prosess bestående av blant annet kverning, sikting og separering. Produktet kalles foredlet avfallsbrensel (RDF) og er et brensel med både høy kvalitet og innhold av mindre fuktighet, noe som gir en høyere brennverdi (Buekens, 2013).

Kvitebjørn Bio-El anvender fast gjenvunnet avfallsbrensel (SRF) i forbrenningsprosessen i anlegget deres. Dette er avfallsbrensel med mindre partikkelstørrelse og høyere brennverdi sammenlignet med RDF. Om lag 2/3 av dette er næringsavfall som importeres fra Storbritannia gjennom gjenvinningselskapet Geminor, og den resterende mengden er en blanding av næringsavfall og husholdningsavfall som leveres fra ulike avfallsselskaper i Norge. I tillegg behandles noe farlig avfall (Dirdal, R./Fossum, K., personlig kommunikasjon, 6. mai 2020).

### 2.4.2. Fluidisert bed

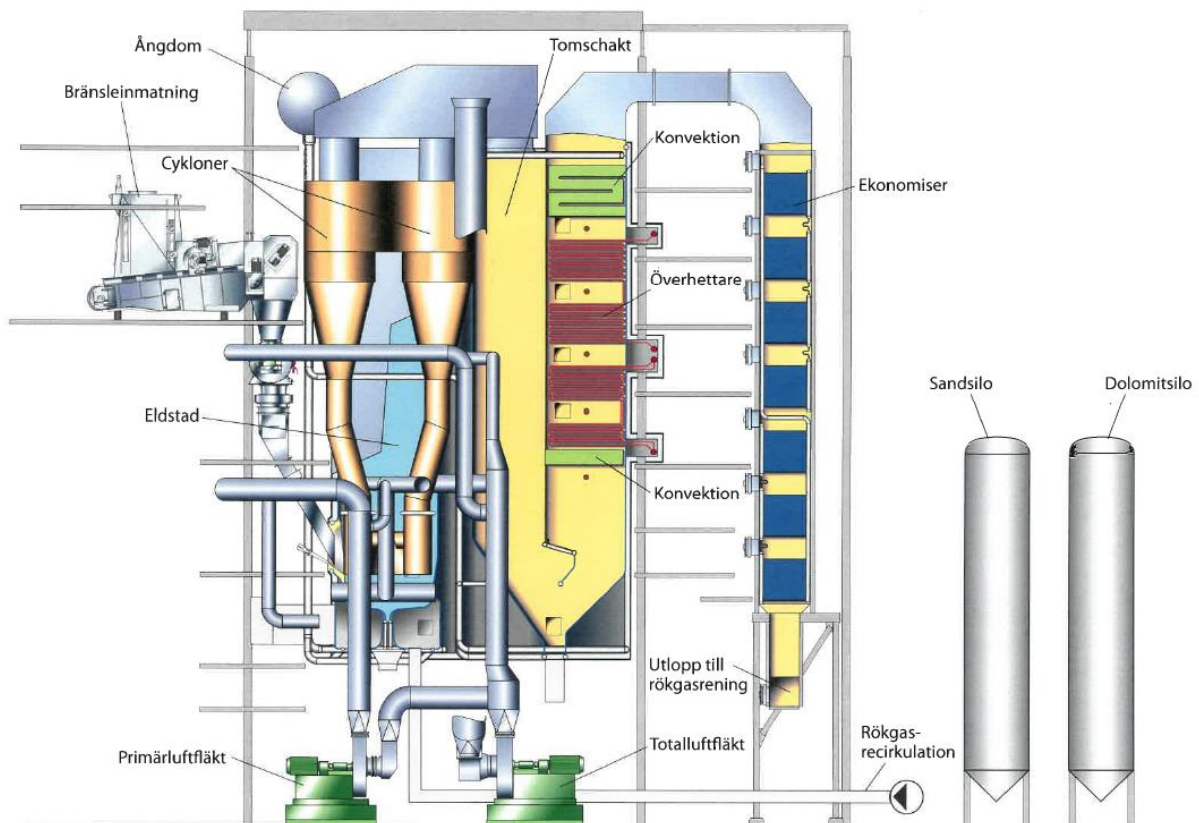
Felles for en fluidisert bed-forbrenningsteknologi er at den tradisjonelle fyrriksen er byttet ut med et bed som består av et lag med inert materiale (ofte sand) som fluidiserer. Prinsippet bak fluidisering er at bedpartikler settes i bevegelse ved hjelp av en strøm av fluid (gass eller væske) som blåses oppover gjennom bedet ved hjelp av luftdyser. Dette fører til en kraftig omblanding av det tilførte brenselet i forbrenningskammeret, og bedet består dermed i hovedsak av en blanding av bedmateriale, brenselpartikler og aske som gir gode forbrenningsforhold. Når strømningshastigheten er tilstrekkelig lav og fluidet kan strømme mellom de faste partiklene i laget, vil sandkornene ligge stille i bedet. Økt strømningshastighet til fluidet fører til økt trykkforskjell (trykkfall) over bedet. Når trykkfallet over bedet til slutt tilsvare vekten av sandbedet, begynner det å fluidisere. Strømningshastigheten ved tidspunktet for den begynnende fluidiseringen kalles minimum fluidiseringshastighet. Når denne er nådd, vil luftmotstanden på hvert sandkorn og oppdriftskraften motvirke tyngdekraften for partiklene i laget slik at de svever. Ifølge Eklund

& Öhman er fluidisering i bedet en funksjon av partikkelstørrelse, partikkelform og bulk tetthet. (Eklund & Öhman, 2004).

Det er hovedsakelig to typer fluidiserte bed-reaktorer som anvendes til avfallsforbrenning: boblende fluidisert bed (BFB) og sirkulerende fluidisert bed (CFB). Sistnevnte type er den som anvendes i Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg. Figur 3 illustrerer komponentene i Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg. Valmet AB er leverandør av CFB-teknologien som anvendes her. Utforming av anlegg vil variere med ulike produsenter.

Sirkulerende fluidisert bed-forbrenning har blitt utviklet og anvendt siden starten av 1990-tallet. Forbrenningsteknologien er utbredt over hele verden tusenvis av CFB-kjeler er i drift i dag (Basu, 2015).

Partikkelstørrelsen til bedmaterialet i CFB-kjeler er mindre enn 0,5 mm, og har høyere fluidiserings hastighetene sammenlignet med anlegg som bruker BFB-teknologi. I en CFB-kjel vil bedmaterialet sirkulere som følge av fluidiseringen. Partiklene stiger opp og blir videre transportert til en syklon hvor de faste partiklene skilles fra røkgassene og de blir returnert til ovnen.





*Figur 3: Illustrasjon av Kvitebjørn Bio-El sitt forbrenningsanlegg basert på CFB-teknologi. Gjengitt med tillatelse av Kvitebjørn Bio-El AS.*

## 2.5. Bedmaterialer

Formålet til bedmaterialet som anvendes i fluidiserende bed er, sammen med primærluften som tilføres, å skape en god fluidisering slik at det oppnås en effektiv forbrenning av brenselet. Egenskaper som størrelsesfordeling, partikkelform og tetthet er noen viktige parametere for god fluidisering.

Bedmaterialet forbrukes i forbrenningsprosessen ved sikting av røykgass og videre til deponering av flyveasken, eller gjennom agglomerering i bed og til videre behandling som en del av bunnasken.

### 2.5.1. Kwartssand

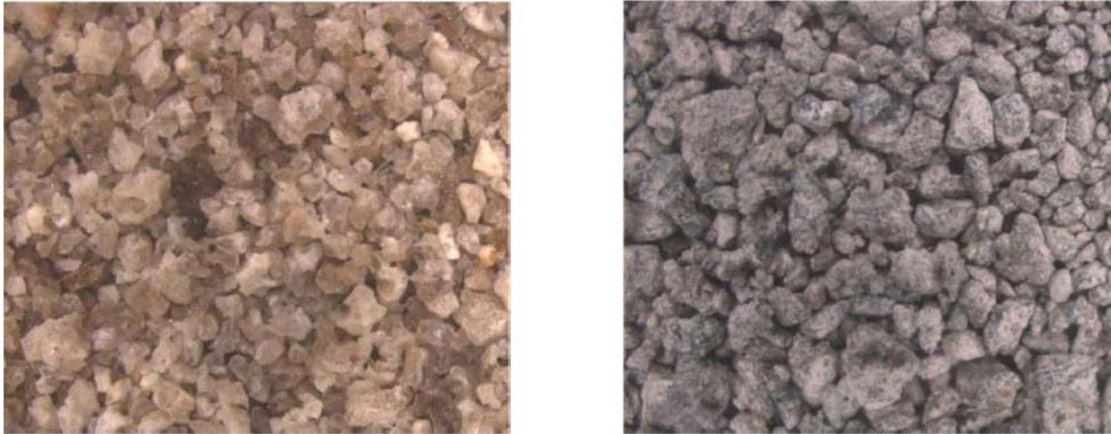
Silisiumdioksid ( $\text{SiO}_2$ ) som forekommer som sand er mest anvendt som bedmateriale i fluidiserende bed-anlegg (Eklund & Öhman, 2004). Denne natursanden utvinnes fra jorda og medfører dermed forbruk av en ikke-fornybar ressurs. Den anses som en knapphetsressurs ifølge FNs miljøprogram, som skriver i sin rapport fra 2019 at sand- og grusressurser er den nest største ressursen (målt i volum) som utvinnes og omsettes i verden etter vann (UNEP, 2019).

Kvitebjørn Bio-El anvender i dag Baskarpsand fra Baskarp i Sverige, som produseres av selskapet Sibelco. Produktet Baskarpsand B25 har et kvartsinnhold på 90,5 % og et sintringspunkt ved 1270 °C (Dirdal, R., personlig kommunikasjon, 27. februar 2020).

### 2.5.2. Masovns slag

Masovns slag er et biprodukt fra stålindustrien ved fremstilling av råjern. Ifølge leverandøren av GR-Granul, Fescon AB, har masovns slag en mineralstruktur som liker på natursanden. Masovns slag kan deles inn i to forskjellige typer basert på kjøleteknologi. Det skilles mellom luftkjølt og vannkjølt masovns slag som vist i Figur 4. Vannkjøling er en raskere prosess enn luftkjøling, men den viktige effekten av kjøling er betydningen for strukturen på

masovns slagget. Det vannkjølte masovns slagget er i amorf form, og krystalliserer ved ca. 850 °C. Ved krystalliseringstemperaturen skjer det en øyeblikkelig eksoterm reaksjon i anlegget, og varmen som frigjøres kan medføre en betydelig økning på temperaturen i bedet og forårsake problemer i kjelen. Det luftkjølte masovns slagget frigjør derimot ikke en slik krystalliseringsvarme (Fescon AB, u.å.).



Figur 4: Luftkjølt masovns slag (til venstre) og vannkjølt masovns slag (til høyre). Foto: Eurofins Expert Services.

Utenom krystallisering har luftkjølt og vannkjølt masovns slag tilsvarende kjemiske og fysiske egenskaper. Siktanalyse av GR-Granul viser at fordelingen av partikkelstørrelse er tilnærmet lik som for Baskarpsanden (Nurkkala, M., personlig kommunikasjon 22. juni 2020). Dette tilfredsstillende dermed spesifikasjonene til leverandøren Valmet AB. En oversikt over den kjemiske sammensetningen for begge typene vises i Tabell 2. Smeltepunktet for begge er ved 1300 °C, noe som betyr at en høyere forbrenningstemperatur sammenlignet med bruk av kvartssand kan tillates. Dette kan føre til en bedre forbrenning og mindre utslipp.

Tabell 2: Kjemisk sammensetning i luftkjølt og vannkjølt masovns slag (GR-Granul) målt i vektprosent [wt %] (Fescon AB, u.å.).

Kjemisk sammensetning	Luftkjølt masovns slag [wt %]	Vannkjølt masovns slag [wt %]
Natrium, Na	0,39	0,41
Magnesium, Mg	5,1	5,5
Aluminium, Al	4,9	4,9

Silisium, Si	15	16
Svovel, S	1,5	1,2
Klor, Cl	0,01	
Kalium, K	0,46	0,56
Kalsium, Ca	30	30
Titan, Ti	1,2	0,89
Vanadium, V	0,08	0,05
Mangan, Mn	0,32	0,21
Jern, Fe	0,53	0,34
Strontium, Sr	0,05	0,06
Zirkonium, Zr	0,02	0,02
Barium, Ba	0,08	0,11

### 2.5.3. Agglomerering og sintring av bed

Bedsintring og bedagglomerering anses som et stort problem i fluidiserende bed-anlegg. Dette fører til defluidisering av bedet som igjen kan resultere i driftsstans i anlegget. Begge begrepene bedagglomerering og bedsintring kan brukes for å beskrive det samme effekten med at partikkelstørrelsen for et bedmateriale øker (Van Caneghem et al., 2012).

Mekanismene som ligger til grunn for dette skiller seg derimot fra hverandre. I følge Elled et al. kan sintring defineres som dannelsen av bindinger mellom partikler ved høye temperaturer, og agglomerering defineres som dannelsen av klynger av partikler (agglomerater) (Elled et al., 2013). For å forhindre problemer på grunn av agglomerering av bedmateriale, er de viktigste tiltaket kontinuerlig sikting av asken og utskiftning av bedmaterialet i for å opprettholde en optimal partikkelstørrelse på bedet slik at fluidisering fungerer som normalt.

Spesielt kombinasjonen av forbrenning av biomassebasert brensel og bruk av kvartssand som bedmateriale fluidiserende bed-anlegg fører til problemer med agglomerering. Biomasse inneholder ofte høye konsentrasjoner av alkalimetaller (spesielt natrium og kalium), som

reagerer med kvartssanden og danner alkalismelt. Dette fester seg til overflaten av bedpartiklene og limer dem sammen (Elled et al., 2013).

## 3. Metode

Dette kapitlet beskriver fremgangsmåten som er anvendt i arbeidet for å besvare problemstillingen. Dette var planlagt som et tredelt arbeid bestående av en litteraturstudie, analyse av resultater fra en gjennomført testperiode ved bruk av GR-Granul i Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg, samt analyse av prøver av masovns slag og Baskarp-sanden før og etter kjøring i anlegget. Denne analysen skulle gjennomføres på NMBU sin lab med SEM (Scanning Electron Microscope) og EDS/EDX (Energy Dispersive Spectrometer/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) som verktøy.

På grunn av utfordringer og begrenset tilgang som følge av COVID-19 og tilhørende forsinkelser i testprosjektet ved Kvitebjørn Bio-El, ble den planlagte metoden for oppgaven tilpasset deretter. Det ble i stedet besluttet å bruke bedriftens egne eksterne analyser av sand og masovns slag gjennomført hos henholdsvis SINTEF og Eurofins i 2019. I tillegg ble det valgt å anvende resultater fra drift ved ulike andre anlegg i Finland. Dette ga et mer begrenset datagrunnlag og foregikk også gjennom personlig kommunikasjon, noe som gjør metoden i oppgaven mindre reproducerbar enn ønskelig.

Metoden i denne studien består dermed av en litteraturstudie kombinert med vurdering av erfaringer fra ulike testkjøringer og drift i anlegg i Finland ved bruk av masovns slag som bedmateriale.

### 3.1. Litteraturstudie

Det er gjennomført en litteraturstudie for å få en oversikt over eksisterende forskning på bruk av masovns slag som bedmateriale i en CFB-forbrenningsovn ved avfallsforbrenningsanlegg.

Det ble valgt å utføre litteratursøket i tre ulike databaser for å sikre større variasjon i treff ettersom disse benytter seg av ulike algoritmer. Søkedatabasene *Google Scholar*, *Scopus* og *Web of Science* ble anvendt for å finne relevant forskning og faglitteratur innen det gitte

emnet. For å få mest mulig oppdatert litteratur for å kunne belyse status på forskning innen feltet, ble det valgt å begrense søket til å kun inkludere publikasjoner fra tidsperioden 2000-2020.

Litteratursøket med kombinasjonen av søkeordene «*circulating fluidized bed*» AND *combustion* AND «*blast furnace slag*» AND «*bed material*» ga et resultat med totalt 125 antall treff som presentert i Tabell 3.

Tabell 3: Oversikt over antall treff i de valgte søkedatabasene ved litteratursøk begrenset til tidsperioden 2000-2020.

Database	Antall treff
Google Scholar	81
Scopus	43
Web of Science	1

For gjennomgang av treffene for relevante publikasjoner, ble først tittelen vurdert og deretter eventuelt sammendraget lest. Her ble det lagt vekt på følgende kriterier for videre vurdering:

1. Sirkulerende fluidisert bed-teknologi er nevnt i tittelen og/eller sammendraget.
2. Bruken av masovns slag som alternativt bedmateriale er nevnt i tittelen og/eller sammendraget.
3. Forbrenning av avfall eller RDF er nevnt i tittelen og/eller sammendraget.

Dersom alle disse tre kriteriene var oppfylt, ble publikasjonen valgt for videre analyse. Basert på dette var det ingen av treffene som kvalifiserte til kriteriene. Dermed ble det besluttet å utvide søket til å gjelde fluidisert bed-teknologi generelt og i tillegg ikke spesifisere valg av brensel i forbrenningsprosessen. Kriteriene (nr.1 og 3) for gjennomgang av treffene og utvelgelse av relevante publikasjoner ble tilpasset deretter. Dette resulterte i totalt 138 treff. I alt ble fem av disse treffene vurdert som spesielt relevante publikasjoner og valgt til videre analyse fordi de oppfylte vurderingskriteriene. For hver av disse ble det også valgt å gjennomgå referanser i publikasjonen for å finne flere mulige relevante publikasjoner som burde inkluderes i litteraturanalsen. I tillegg ble det utført et eget litteratursøk for å finne ut om bruk av produktet GR-Granul som bedmateriale har vært med i publisert forskning. Den totale litteraturmengden for videre fordypning endte på ni publikasjoner.

## 3.2. Pilotstudier og driftserfaringer

Litteraturstudien kombineres med bruk av erfaringer fra pilotstudier og drift ved forbrenningsanlegg i Finland. Gjennom mailutveksling og samtaler fra februar til juli 2020 med salgssjef ved Fescon AB, Mattias Nurkkala, er det blitt tilsendt data fra følgende kjøring med masovnsstoff som bedmateriale i forbrenningsprosessen:

1. Tester ble gjennomført av VTT på deres testanlegg med fluidiserende bed (3 kW).
2. Tester gjennomført av VTT på en kjel med boblende fluidiserende bed (300 kW) ved Savonia University of Applied Sciences i Varkaus i Finland.
3. Driftserfaringer fra to av anleggene (30 MW) tilhørende de finske selskapene Metsä Board og UPM som befinner seg i henholdsvis Kaskö og Valkeakoski.
4. Testkjøring og drift ved Riikinvoima Oy sitt energigjenvinningsanlegg Ekovoimalaitos (54 MW) nær byen Varkaus i Finland.

Forskningen ved de ulike VTT-testanleggene i Finland foregikk i tidsrommet 2016-2019 og var under ledelse av Tapio Klasila og Satu Ilvonen ved VTT/Eurofins Expert Services Oy. Resultatet av forskningsstudien ble er sammenfattet i en presentasjon. Ved testkjøring i Riikinvoima-anlegget i 2019 ble observasjoner og analyser også gjort sammen med Eurofins Expert Services Oy. Informasjonen som er mottatt har gjengitt hovedkonklusjonene fra disse forsøkene.

## 4. Resultater

I dette kapittelet vil litteraturen som er funnet innen emnet presenteres. Formålet med litteraturstudien var først og fremst å undersøke hva som er gjort av forskning på bruk av masovnsstoff som bedmateriale i fluidiserende bed-forbrenningsanlegg, og identifisere utfordringer og løsninger som har oppstått knyttet til dette.

## 4.1. Litteraturanalyse

Det utvidede litteratursøket resulterte i totalt ni publikasjoner som tilfredsstilte de forhåndsbestemte kriteriene som presentert i kapittel 3.1. **Feil! Fant ikke referanseilden.** viser en oversikt over de utvalgte publikasjonene til litteraturanalysen.

Litteratursammensetningen har lite geografisk spredning, og består av svenske og finske publikasjoner. Det er en tydelig overvekt av artikler som er gitt ut av universiteter, og flere forfattere er bidragsytere til mer enn én publikasjon. Som presentert i metodekapittelet ble kun publikasjoner fra de tyve siste årene inkludert i litteratursøket, noe som resulterte i et utvalg av relevant litteratur som er publisert i tidsrommet 2001-2009.

Tabell 4: Oversikt over publikasjoner som ble valgt ut til videre fordypning.

	<b>Publikasjon</b>	<b>Institusjon</b>	<b>Land</b>	<b>Utgivelsesår</b>
1	Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction (Pettersson et al., 2009)	Universitet	Sverige	2009
2	Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler (Davidsson et al., 2008)	Universitet	Sverige	2008
3	Bed agglomeration characteristics of biomass fuels using blast-furnace slag as bed material (Brus et al., 2004)	Universitet	Sverige	2004
4	Utvärdering av Hyttsand som bäddsand i FB-anläggningar (Eklund et al., 2003)	Forskningsinstitut	Sverige	2003

5	Fullskaleforsøk med hyttsand som bæddmaterial i 12 MW avfallseldad BFB-panna (Eklund & Öhman, 2004)	Forskningsinstitut	Sverige	2004
6	Alternativa bæddmaterial i fb/cfb-pannor (Zintl & Ljungdahl, 2004)	Bransjeorganisasjon	Sverige	2004
7	Agglomeration and the Content of Amorphous Material in FB Combustion. A Full-Scale Boiler Test (Daavitsainen, J. H. A. et al., 2001)	Universitet	Finland	2001
8	Effect of GR Granule Used as Bed Material to Reduce Agglomeration in BFB Combustion of Biomass with High Alkali Metal Content (Daavitsainen, J. et al., 2001)	Universitet	Finland	2001
9	Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers (Nuutinen et al., 2004)	Universitet	Finland	2004

Publikasjon nr. 6 og 7 i Tabell 4 ble funnet som relevante gjennom referanselisten i publikasjon nr. 4, og nr. 8 og 9 er resultat av eget søk på produktet GR-Granul.

## 4.2. Fordypning i utvalgte publikasjoner

I denne delen er det blitt valgt ut artikler til videre fordypning. Her har det blitt lagt spesielt vekt på resultater knyttet til masovnsstoff som bedmateriale. Tabell 5 gir en samlet oversikt over oppsettet i forsøk som er beskrevet i de ulike utvalgte forskningsartiklene. Videre presenteres hovedfunn i de utvalgte studiene. To av de svenske publikasjonene (nr. 3 og 4 i Tabell 4) omhandlet i stor grad samme laboratorieforsøk og er skrevet av samme forfattere, og



det er dermed valgt å kun fokusere på den ene av disse artikkelen videre. Tilsvarende gjelder også for to av de finske publikasjonene (nr. 7 og 8 i Tabell 4).

Tabell 5: Oversikt over oppsett for de ulike forsøkene som er omtalt i utvalgte publikasjoner i litteraturstudien.

Referanse	Forbrennings- teknologi	Anleggs- kapasitet	Brensel	Bedmateriale	Tilsetningsstoff
1 (Pettersson et al., 2009)	CFB	12 MW	Trepellets, halmpellets	Kvartssand, olivinsand, masovns slag	Kaolin, zeolitt, svovel
2 (Davidsson et al., 2008)	CFB	12 MW	Treflis, trepellets, halmpellets	Kvartssand, olivinsand, masovns slag	Kaolin, svovel, ammoniumsulfat
3 (Brus et al., 2004)	BFB	5 kW	Bark, rester fra produksjon av olivenolje, torv, halm, strandrør	Kvartssand, masovns slag	
4 (Eklund & Öhman, 2004)	BFB	12 MW	Industri- og husholdningsavfall, ulike typer trevirke fra skog	Kvartssand, masovns slag	
5 (Zintl & Ljungdahl, 2004)	FB/CFB	10 kW, 750 kW	Kryssfiner, luserpellets	Kvartssand, olivinsand, kyanitt, mullitt, magnesiumoksid, masovns slag (GR-Granul, Hyttsten/Hytt sand), LD-slag	Kalk, natriumsilikat
6 (Daavitsainen, J. et al., 2001)	BFB	5 MW, 6 MW, 15 MW	Kryssfiner, bark, sagflis	Kvartssand, masovns slag	

			MW, 25		
			MW		
7	(Nuutinen et al., 2004)	BFB, CFB	3 kW, 5 MW-110 MW	Bark, forskjellige type trebrensel, torv, biologisk slam, kyllingavfall, skogsavfall	Kvarts, natursand, masovnsstoff

#### 4.2.1. Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction

I denne studien utført av Pettersson et al. ble kjemisk fraksjonering, SEM-EDX og XRD anvendt til karakterisering av flyveaske fra forskjellige samforbrenningsstester. Disse testene ble gjennomført i en 12 MW sirkulerende fluidisert bed-kjel ved Chalmers tekniska högskola (CTH) i Gøteborg. Trepellets ble benyttet som brensel og ble forbrent sammen med halmpellets (blandingsforhold på henholdsvis 80 % og 20 % regnet på energibasis) for å oppnå en brenselsblanding med forventet høye alkali- og klorkonsentrasjoner som kan forårsake både agglomerering i bed og avsetninger i kjel. For å forhindre dette ble det utført tester med bruk av alternative bedmaterialer og ulike tilsetningsstoffer. Bruk av olivinsand og masovnsstoff ble sammenlignet med kvartssand som bedmateriale, og det ble testet å tilsette kaolin, zeolitt og svovel til kvartssand.

Hver forbrenningstest i studien hadde en varighet på 12 timer, etterfulgt av en periode på 36 timer med kun trepellets som brensel og utskiftning av bedet for å sørge for at ny test ikke ble påvirket av foregående resultater. Ved skifte til nytt bedmateriale ble det anvendt trepellets og flis som brensel i en uke før innblanding av halm, samtidig som byttet av bedmaterialet foregikk kontinuerlig.

Artikkelen konkluderer med at masovnsstoff ga minst utfordringer med avsetning av alkalier ved forbrenning, og bidro i tillegg til mindre alkalier og klor i flyveasken sammenlignet med de to andre bedmaterialene. Det ble oppdaget en betydelig nedgang i konsentrasjon av

silisium i askesammensetningen, men en økning i konsentrasjon av magnesium ved bruk av både olivinsand og masovns slag. Resultatet av kjemisk fraksjonering viste at alkalier i flyveasken fra bruk av masovns slag som bedmateriale var litt mindre løselig enn ved bruk av olivinsand og kvartssand. Dette kan indikere at masovns slag reduserer problemene ved forbrenning sammenlignet med de andre to bedmaterialene (Pettersson et al., 2009).

#### **4.2.2. Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler**

Artikkelen (Davidsson et al., 2008) undersøker ulike måter å begrense problemer relatert til alkalier ved forbrenning av biomasse i sirkulerende fluidiserte bed. Det ble gjennomført forsøk med treflis, trepellets og halmpellets som brensel for å studere utvikling av agglomerering og dannelse av avsetninger. Det ble utført flere tester i et fullskala CFB-anlegg med en 12 MW kjel. Forsøkene varte normalt i 12 timer, men enkelte ble forlenget til opp mot 60 timer. Testene innebar tilsetning av svovel, ammoniumsulfat og kaolin til et bed med kvartssand, eller bruk av olivinsand og masovns slag som alternative bedmaterialer. Dette ble gjort for å øke smeltepunktet til bedmaterialet og senke konsentrasjoner av alkaliklorider i røykgassen som kan påvirke agglomerering i bed.

Ved skifte av bedmateriale til olivinsand ble alt av kvartssanden fjernet etter en stopp i anlegget. Ved innføring av masovns slag som bedmateriale, ble dette kontinuerlig matet inn i forbrenningsovnen i løpet av en uke for å fullstendig erstatte kvartssanden. Et 12-timers-forsøk startet etter minst 12 timer med forbrenning av kun trepellets og normal drift. Både før et slikt forsøk ble gjennomført og avsluttet ble det tatt prøver av både bunnaske og flyveaske. For disse prøvene av asken fra bedet og sykklonen ble agglomereringstemperatur, sammensetning og struktur undersøkt. Videre ble sammensetning av røykgass målt og analysert. I tillegg utførte Davidsson et al. en evaluering av kostnader for å kunne vurdere om de ulike tiltakene var økonomisk lønnsomme.

Resultatet av analyser av røykgass viser at bruk av olivinsand istedenfor kvartsbasert sand førte til høyere konsentrasjon av alkaliklorider, mens bruk av masovns slag som bedmateriale medførte en svak nedgang av både dette og HCl. Utslipp av SO<sub>2</sub> økte generelt i de fleste tilfellene. Analysen i artikkelen viser at tilsetning av kaolin og bruk av masovns slag som bedmateriale var de beste metodene for å motvirke problemet med agglomerering. Ifølge

beregninger utført i studien kan det være lønnsomt å bruke masovns slag som bedmateriale dersom behovet for utskiftning av bedet reduseres med 25 % sammenlignet med tilsvarende tilfelle ved bruk av kvartssand som bedmateriale. Ifølge artikkelen kan dette sannsynligvis gjøres, men tilsetning av kaolin anses i dette tilfellet som en bedre metode for å unngå agglomerering. Når det gjelder utfordringen med avsetninger konkluderer studien med at begge de alternative bedmaterialene ikke er egnet for å løse dette problemet sammenlignet med bruk av tilsetningsstoffer. Tilsetning av ammoniumsulfat til kvartssand vil her være det mest effektive tiltaket som medfører lavest kostnader sammenlignet med alternativene.

### **4.2.3. Bed agglomeration characteristics of biomass fuels using blast-furnace slag as bed material**

I studien utført av (Brus et al., 2004) var formålet å undersøke egenskaper ved agglomerering i bed under forbrenning av biomasse ved bruk av både masovns slag og kvartssand som bedmaterialer. Det ble gjennomført tester i en 5 kW boblende fluidisert bed-kjel. Her ble det anvendt fem ulike brenslere som bestod av pelletert (6-8 mm) biomasse: bark, rester fra produksjon av olivenolje, torv, halm og gressplanten strandrør. Disse ble forbrent separat og hver test hadde en varighet på 40 timer. Unntaket var ved bruk av halm og strandrør som brensel, som begge ble forbrent til agglomerering i bedet oppsto. Det ble tatt flere prøver av bedmaterialet på fastsatte tidspunkter etter start i løpet av testens varighet. Mengden av kvartssand eller masovns slag i bedet var 540 g, og de to ulike bedmaterialene hadde en partikkelstørrelse 106-125  $\mu\text{m}$ . Både bedmaterialer og agglomerater ble analysert ved hjelp av SEM/EDS og røntgendiffraksjon. Videre ble det utført kjemiske likevektsberegninger for å tolke funn fra eksperimentene.

Resultatene i artikkelen tyder på at bruk av masovns slag hadde mindre tendens til å reagere med askedannende elementer fra brenselet og til agglomerering sammenlignet med kvartssand for de fleste av brenselstypene (bark, rester fra produksjon av olivenolje og strandrør). Det ble dannet færre og mer porøse agglomerater og i tillegg ble det også oppdaget at agglomereringsprosessen varte lenger ved bruk av masovns slag som bedmateriale for disse brenslene. Ved bruk av torv ble det ikke oppdaget noen forskjell mellom bruk av de to bedmaterialene siden agglomerasjonstemperaturen fra start i begge tilfeller var høyere enn den maksimale temperaturen som var angitt i forsøkene. Bruk av halm som brensel førte til rask agglomerering ved forbrenning av hver av de to bedmaterialene, og det ble dermed ikke

påvist noen forskjell i agglomereringstendenser.

Ifølge artikkelen medførte alle kombinasjoner av brensel og bedmateriale til dannelse av belegg på bedpartiklene. Det ytre laget som ble dannet på partiklene i bedmaterialet hadde lignende egenskaper og tykkelse for begge bedmaterialene når samme type brensel ble anvendt. Tykkelsen på det indre laget var derimot større for kvartspartikler. Resultatet fra analysene med SEM/EDS viste at det indre Ca-K-silikatrike laget var årsaken til agglomereringsprosessen ved bruk av kvartssand som bedmateriale. For masovns slag var det det ytre laget som var årsaken. Dette var mer porøst og inhomogent, og ble vurdert til å mest sannsynlig være sammensatt av ulike komponenter av oksider, salter og silikater som alle har ulike smeltepunkt og viskositet i temperaturområdet 800-1000 °C. Resultatene av beregningene av kjemisk likevekt bekreftet den mindre tendensen til agglomerering ved bruk av masovns slag sammenlignet med kvartssand.

#### **4.2.4. Fullskaleforsøk med hyttsand som bäddmaterial i 12 MW avfallseldad BFB-panna**

Denne studien (Eklund & Öhman, 2004) er ett av flere prosjekt tilknyttet det svenske forskningsinstituttet Värmeforsk for å redusere problem med bedsintring i kjel og forbruk av bedmateriale. Det har blitt gjennomført et fullskalaforsøk med vannkjølt masovns slag (Hyttsand) som bedmateriale ved Säverstaverkets to 12 MW BFB-forbrenningsovner i Bollnås i Sverige. Formålet var å undersøke hvor anvendelig Hyttsand er som bedmateriale i forbrenning av typisk avfallsbrensel ved bruk av fluidisert bed-teknologi sammenlignet med bruk av kvartssand (Baskarpsand). Brenselet bestod av en blanding av industri- og husholdningsavfall, samt ulike typer trevirke fra skogen (hovedsakelig en blanding av bark, flis og rester etter felling, men også returtrevirke). Testperioden varte i 19 døgn, og nesten 100 tonn Hyttsand fra leverandøren SSAB Merox ble anvendt i løpet av denne tiden.

I løpet av forsøksperioden oppsto problemer med fluidisering i bedet som førte til stans i anlegget to ganger. Analyser av prøver fra bedet i studien viste at smeltet glass fra brenselet forårsaket defluidisering og agglomerering i bedet. Artikkelen konkluderer med at det dermed ikke kan begrunnes om bruken av Hyttsand medførte redusert agglomerering i bed. I tillegg vurderes det i studien om både partikkelstørrelse og form kan ha vært medvirkende årsaker til redusert fluidisering i bedet. Hyttsanden som ble anvendt hadde en kantete og mindre ensartet

partikkelform og struktur sammenlignet med Baskarpsanden. Når bedpartiklene ble avrundet under forbrenning (etter ca. tre dager med drift) endret fluidiseringsegenskapene seg. Et forslag til løsning på dette var ifølge studien å velge en grovere størrelsesfordeling av Hyttsand-partiklene enn det som normalt ville vært anvendt for natursand i anlegget. Ettersom fluidiseringen i bedet forandret seg de første dagene, er det også foreslått å skifte ut bedet gradvis.

Artikkelen konkluderer med at Hyttsand er fullt anvendelig som bedmateriale til BFB-kjeler ved forbrenning av avfall. Fullskalaforsøket viste at en overgang fra Baskarpsand til Hyttsand og blandinger av disse to bedmaterialene kan brukes uten at det medfører et behov for å endre på driftinnstillinger. Andre observasjoner i dette fullskalaforsøket var:

- Forbruket av bedmateriale ble redusert med opptil 30 % ved bruk av Hyttsand sammenlignet med Baskarpsand.
- Bedtemperaturen økte gjennomsnittlig med 17 °C ved bruk av Hyttsand, og bedet fikk en jevnere temperatur ved normale forhold.
- Utslippene av CO, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> og O<sub>2</sub> var tilnærmet uforandret, bortsett fra en økning i utslipp av HCl og SO<sub>2</sub> med henholdsvis 8 % og 16 % under forsøksperioden med Hyttsand.
- Belegg som ble dannet på varmeoverføringsflater hadde samme karakteristikk uavhengig av anvendt bedmateriale. Forsøksperioden med bruk av Hyttsand viste at det ble dannet belegg som inneholdt mer svovel og kalium, og mindre mengde av silisium, aluminium og klor sammenlignet med bruk av Baskarpsand.
- Ingen signifikant endring i mengden flyve-, sykron- og bunnaske.
- Hyttsanden og Baskarpsanden hadde begge lignende belegg på bedpartiklene og like agglomerasjonstendenser.

#### 4.2.5. Alternativa bäddmaterial i fb/cfb-pannor

Artikkelen (Zintl & Ljungdahl, 2004) undersøker bruk av ulike bedmaterialer som alternativ til den vanlige kvartssanden. Det ble gjennomført tre ulike type forsøk i denne studien:

1. Digeltest i elektrisk oppvarmet ovn og selvsintringstest i 10 kW fluidisert bed.

2. Forbrenningsforsøk i en 10 kW fluidisert bed.
3. Forsøk i en 750 kW fluidisert bed og analyse av røykgass-sammensetning.

Det ble samlet inn prøver av bunnaske fra ti ulike kjeler fra åtte kraftverk som deltok i prosjektet. Hver prøve ble varmet opp i en digel til en bestemt temperatur og holdt ved denne over en gitt tid. Deretter ble prøven avkjølt for å kunne analysere agglomereringstendens. Noen av materialene i digeltestene viste indikasjoner til begynnende agglomerering ved uventet lave temperaturer, og ble derfor undersøkt videre i selvsintringstester. Her foregår oppvarming av bedet uten bruk av brensel frem til sintring blir konstatert.

Forbrenningsforsøk ble utført med kvartssanden Fylesand som referanse-bedmateriale. Denne inneholdt 99 % kvarts. Det ble gjennomført tester med totalt åtte ulike bedmaterialer:

- Olivinsand
- Aluminiumsilikater: kyanitt eller mullitt
- Magnesiumoksid
- Biprodukter fra industrielle prosesser: GR-Granul, Hyttsten, Hyttsand og LD-slagg.

Det ble også utført to forsøk som testet å bruke Fylesand som hadde blitt forbehandlet med kalk og/eller natriumsilikat. Som brensel i forbrenningsforsøkene ble det anvendt kryssfiner eller pellets av planten lusern.

Til slutt ble det utført forsøk i 750 kW fluidiserende bed med kun lusernpellets som brensel og Fylesand eller GR-Granul som bedmateriale. Målet var å bekrefte at et alternativt materiale kan gi økt beskyttelse mot agglomerering, samt undersøke endringer i røykgassen.

Det viste seg også at det å lage et tilsvarende lag gjennom forbehandling med kalk og natriumsilikat heller ikke har noen praktisk verdi. Resultatet i studien viser at for begge brenseltypene hadde både olivinsand og GR-Granul mest lovende resultat når det gjaldt motstandskraft mot bedsintrang. Deretter fulgte Hyttsten og Hyttsand. Tre av disse fire materialene er restprodukter. Ved forbrenning av sterkt alkaliske biobrensler eller brenselblandinger konkluderes det med at GR-Granul vil være en god kandidat. Ved forsøkene i 750 kW fluidisert bed kunne GR-Granul påvises å ha motarbeidet bedsintrang i minst ti ganger lenger tid enn kvartssand. Når det gjaldt utslipp til luft så ble det konkludert

med at resultatene ikke var helt sammenlignbare på grunn av at temperaturen i den øvre delen av brennkammeret ikke rakk å stabilisere seg i løpet av forsøksperioden, og dermed var lavere enn vanlig. Dette førte til høyere utslipp av NO enn forventet.

#### **4.2.6. Effect of GR Granule Used as Bed Material to Reduce Agglomeration in BFB Combustion of Biomass with High Alkali Metal Content**

Artikkelen (Daavitsainen, J. H. A. et al., 2001) beskriver bruk av GR-Granul som bedmateriale i flere tester med fire ulike BFB-forbrenningsanlegg som brant biomasse med høyt innhold av alkalimetaller. Brenselet var kryssfiner-avfall alene eller sammen med bark og sagflis som ikke er tilsatt noen tilsetningsstoffer. Hovedkilden til alkalimetaller i disse testene var limet mellom lagene av finér. I løpet av testene ble prøver samlet inn av både brensel og bedmateriale, og videre undersøkt ved hjelp av SEM-EDS. I tillegg ble elementanalyse utført.

Ifølge artikkelen ble det ikke oppdaget noen problemer med agglomerering forårsaket av reaksjoner mellom asken og bedmaterialet. Det ble derimot observert at majoriteten av bedpartiklene ble belagt med flere tynne lag som var sammensatt på ulik måte. Det indre laget var bestående av hovedsakelig kalsium og fosfor, og det ytterste laget av belegget inneholdt en betydelig mengde magnesium. Det ble vurdert sannsynlig at det er dette ytre laget som hindrer agglomerering av partiklene i det nye bedet.

To av testene var fullskala testkjøringer, mens prøver fra de resterende to testene ble samlet inn ved normal drift av anleggene. Både prøver av ubrukt bedmateriale og brensel ble tatt, samt bunnaske fra forbrenningsovnen. Resultater av analyser av disse fra dag 10, 15 og 21 i forsøksperioden ble sammenlignet.

Artikkelen konkluderer med at det kvartsfrie bedmaterialet GR-Granul egnet seg godt til forbrenning av kryssfiner-avfall, som kan være problematisk på grunn av høyt innhold av natrium. Det som ble observert av agglomerering i løpet av testene som ble gjennomført har utelukkende blitt dannet rundt kvarts-partikler som skyldes urenheter i bedet.



### **4.2.7. Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers**

Studien (Nuutinen et al., 2004) undersøker dannelse av lag av belegg på ulike bedmaterialer ved fluidisert bed-forbrenning av biomassebrensel. Prøver av bed har blitt samlet fra forsøk utført i lab skala (BFB), pilotskala (3 kW BFB) og fullskala (5 MW-110 MW BFB/CFB) kjeltester. Bedmaterialene som ble anvendt i forsøkene var kvarts (98 % SiO<sub>2</sub>), natursand og GR-Granul. De ulike typene biomassebrensel var bark, forskjellige type trebrensel, torv, biologisk slam, kyllingavfall og skogsavfall. Den kjemiske sammensetningen av belegglagene ble karakterisert ved bruk av hovedsakelig SEM-EDS.

Artikkelen konkluderer med at belegg på bedpartiklene generelt besto av 1-3 lag. Sammensetningen av disse avhenger av både egenskaper til bedmaterialet og brenselet som ble anvendt i forbrenningen. Det innerste laget inneholdt hovedsakelig alkalisilikater, mens det ytterste laget var rikt på kalsium eller magnesium. Belegglag som inneholder kalium eller natrium kan være klebende og forårsake dannelsen av agglomerater, noe som kan forklare hvorfor kvarts og naturlige sandbedmaterialer er problematiske når brensel med høyt alkalimetallinnhold forbrennes. Det ytterste laget på bedpartikler knyttet til GR-Granul var rikt på magnesium. Det oppsto ingen problemer ved forbrenning av ulike brenslere i forsøkene ved bruk av GR-Granul, og det vurderes at det magnesiumholdige belegglaget som oppsto på GR-Granul-partikler kan beskytte bedpartiklene mot agglomerering. På bakgrunn av dette konkluderer artikkelen med at bedmaterialet kan brukes i forbrenning av problematiske brenslere slik som kryssfiner.

## **4.3. Testkjøringer og drift**

### **4.3.1. VTT pilotstudier**

Testene som ble utført på VTT sine anlegg foregikk i perioden 2016-2019. Testen i det 3 kW fluidiserende bedet ble gjennomført med bark som brensel og vannkjølt masovns slagget (GR-Granul) eller natursand som bedmateriale. Resultatet fra studien (Klasila & Ilvonen, 2018) viser at sanden båndt kalium i brenselet fire ganger raskere enn masovns slagget. Ved kjøring med det vannkjølte masovns slagget som bedmateriale reagerte ikke kalium med masovns slagget, men med sand som brenselet inneholdt. Når det gjelder utslipp til luft som

ble målt under testene ble det oppdaget at NO<sub>x</sub>-innholdet var lavere ved bruk av vannkjølt masovnsstoff sammenlignet med natursanden.

På BFB-anlegget i Savonia ble forsøkene gjennomført med både luftkjølt og vannkjølt masovnsstoff som bedmateriale i tillegg til natursand. Her ble bark og slam fra vannrensplanlegg anvendt som brensel. Det viste seg at kaliuminnholdet hadde en betydelig økning ved sand som bedmateriale, mens det knapt ble registrert noen økning ved bruk av masovnsstoff. Innhold av natrium økte ved bruk av de to typene bedmateriale, men her var økningen tre ganger raskere ved bruk av natursand. Fra resultatet av utslipp som ble målt under testene, kan man se en økning i utslipp av SO<sub>2</sub> for luftkjølt masovnsstoff sammenlignet med de andre to bedmaterialene. Ellers var det ingen betydelig forskjell ved bruk av de ulike bedmaterialene. Dette kan ha sammenheng med at brenselet i disse testene skal ha inneholdt rikelig med sand, som blant alkalier og kan ha hatt innvirkning blant annet for bindingen av NO<sub>x</sub>.

#### 4.3.2. Drift i anlegg

Luftkjølt masovnsstoff har blitt anvendt i Metsä Board sitt BFB-anlegg i Kaskö siden 2016 (Fescon AB, u.å.). Anlegget har tidligere brukt natursand som bedmateriale som har ført til stans som følge av agglomerering, til tross for at opptil 15 av 35 tonn av bedet har blitt byttet daglig. Ved anlegget benyttes både bark og slam fra vannrensplanlegg som brensel.

Presentasjonen fra VTT (2018) angir at det i motsetning til tidligere ikke lenger inntreffer sintring med bedmaterialet. Forbruket av bedmateriale har blitt redusert fra 10-15 tonn/dag til 2 tonn/dag (Klasila & Ilvonen, 2018).

Vannkjølt masovnsstoff ble tatt i bruk i UPMs Tervasaari-anlegg i 2017. Brenselet i forbrenningsprosessen var blant annet skogsavfall og biprodukter fra treforedlings- og treindustri. Behovet for bytte av bedet ble redusert fra 10-15 tonn/dag til 2 tonn/dag.

I tillegg til at behovet for bytte av bed minsker ved bruk av masovnsstoff, anslo VTT at avhengig av materialet er slitasjen på kjel rundt 15-20 % sammenlignet med bruk av sand. Andre observasjoner ved anvendelse av masovnsstoff er at luftkjølt masovnsstoff støver mer enn sand. Dette minsker imidlertid under forbrenningen. I presentasjonen fra VTT (2018) presiseres det i tillegg at det ved bruk av begge typene masovnsstoff, i likhet med andre

kvartsfrie bedmaterialer, også må tas hensyn til eventuell sand som følger med brenselet som kan begynne å danne agglomerater (Klasila & Ilvonen, 2018).

### 4.3.3. Riikinvoima testprosjekt

Riikinvoima sitt Ekovoimalaitos-anlegg har opplevd store utfordringer med bedsintring. Basert på pilotstudiene utført av Eurofins Expert Services Oy ble det valgt å anvende luftkjølt masovnsstoff (GR-Granul) levert av Fescon AB til dette formålet. Anlegget forbrenner husholdningsavfall samt litt farlig avfall i prosessen.

Våren 2019 startet testperioden etter stopp på anlegget for planlagt vedlikehold. Testperioden varte i åtte måneder før deretter å gjennomføre en evaluering. Tidligere har det bare vært mulig å kjøre anlegget i fire måneder av gangen før driftsstans for vedlikehold på grunn av mye sintring i syklonen. Resultatet av testprosjektet tydet på mindre sintring og bedre sirkulering mellom ovn og syklon ved bruk av luftkjølt masovnsstoff sammenlignet med bruk av natursand tidligere. Figur 6 og **Feil! Fant ikke referanseilden.** viser forskjellen i sintring som ble observert i syklonen ved bruk av henholdsvis natursand og GR-Granul som bedmateriale.

Forbruk av bedmateriale ble redusert fra 15 tonn/dag til 8 tonn/dag med GR-Granul.



Figur 5: Sintring i syklon i Riikinvoima-anlegget observert etter 10 uker i drift ved bruk av natursand som bedmateriale. Foto: Eurofins Expert Services.



Figur 6: Sintring i sykklon i Riikinvoima-anlegget observert etter 15 uker i drift med GR-Granul som bedmateriale. Foto: Eurofins Expert Services.

Basert på resultatene oppnådd i testperioden ble det luftkjølte masovns slagget sin egnethet evaluert for forbrenning med fluidisert bed i en avfallsskjel, og det er planlagt å innføre dette over en lenger tidsperiode på 12 måneder før stopp. Sandsikten skal i tillegg byttes ut, og det forventes fremover at forbruket av bedmaterialet vil kunne reduseres ytterligere (Nurkkala, M., personlig kommunikasjon 9. juni 2020).

## 5. Diskusjon av litteratur

I dette kapittelet diskuteres metoden som er brukt, og resultater fra litteratursøk og erfaringer fra pilotstudier og drift i anlegg vurderes opp mot tidligere kunnskap innen emnet.

### 5.1. Litteratursøk og litteraturanalyse

Litteratursøket som ble utført hadde som fokus å finne forskning på bruk av masovns slagget som bedmateriale i avfallsforbrenningsanlegg med CFB-teknologi. Dette er et smalt emne innen en gren av forbrenningsteknologi som kan anses som relativt ny, og det var dermed forventet å finne lite publisert forskning på dette. Litteratursøket som først ble utført med begrensninger som beskrevet i kapittel 3.1 resulterte i ingen relevante treff i de valgte søkedatabasene. Det var dermed behov for å utvide søket med en mer generell søkekombinasjon, i tillegg til å inkludere litteratur ved gjennomgang av deres referanser for å

finne et tilstrekkelig antall publikasjoner som kunne bidra til å belyse problemstillingen.

Det er en usikkerhet knyttet til om det endelige utvalget av litteratur er representativt nok, ettersom metoden for utvelgelse av publikasjoner var basert på vurdering av tittel og sammendrag og det forhåndsbestemte kravet om at ordene masovnsslagg, fluidisert bed og forbrenning måtte nevnes her. Søkeordene som det ble valgt å bruke anses som de mest relevante i forhold til oppgavens tema, men ved mer tid tilgjengelig kunne det også ha blitt testet å utføre mer utvidede litteratursøk for å se om det hadde gitt en annen litteratursammensetning. Dette kunne vært ved å benytte andre kombinasjoner av søkeord knyttet til spesifikke utfordringer som er kjent ved bruk av denne forbrenningsteknologien (som agglomerering, sandforbruk og utslipp til luft) eller bruk av andre søkedatabaser utover de tre som er valgt i denne oppgaven. I tillegg kunne det blitt utført ytterligere søk på alternative bedmaterialer til fluidisert bed-forbrenning som er på markedet for å ha et bredere sammenligningsgrunnlag med GR-Granul når det gjelder kjemiske og fysiske egenskaper.

Videre kan valget om å begrense søket til de tyve siste årene også ha ført til at relevante publikasjoner har blitt utelatt. Den nyeste av publikasjonene som ble benyttet til videre fordypning er fra 2009. Dette kan ha en innvirkning på gyldigheten av testforsøkernes resultater i dag, spesielt når det kommer til tilgang og pris på ulike bedmaterialer. Erfaringer fra pilotstudier og drift ved de finske anleggene er derimot utført i 2016 og senere. Ved å kombinere dette med resultater fra litteratursøket, vurderes likevel den endelige litteratursammensetningen til å være relevant nok til å kunne trekke noen slutninger.

Litteratursøket i denne studien avdekket at det var lite geografisk spredning når det gjaldt land som har gjennomført forskning på området, til tross for at teknologien er utbredt i store deler av verden. Kun Sverige og Finland som bidragsytere, og flere av forfatterne har bidratt i mer enn én publikasjon. I tillegg viste det seg at det var en tydelig overvekt av publikasjonene som er utgitt i samarbeid med universiteter eller forskningsinstitutter (åtte av ni publikasjoner).

## **5.2. Fordypningsartikler og erfaringer fra testkjøringer og drift i anlegg**

Forsøkene som er presentert i de ulike studiene varierer når det kommer til både vektlagt innhold og fremgangsmåte. Dette er spesielt med tanke på anvendt forbrenningsteknologi,

anleggskapasitet, valg av brensel og varighet på forsøk. I tillegg er det en forskjell i detaljnivået for beskrivelsene av hvordan forsøkene er utført. Med slike ulike utgangspunkt blir sammenligning av resultater fra disse studiene vanskelig, men det er likevel flere felles trekk som kan diskuteres som relevante til Kvitebjørn Bio-El sitt testprosjekt.

Alle de utvalgte publikasjonene og erfaringene fra de finske forbrenningsanleggene viser til utelukkende gode resultater ved bruk av masovnsstoff som bedmateriale i BFB/CFB-kjel. Dette er sammenlignet med kvartssand, som er bedmaterialet som alle disse studiene har brukt som referanse, men også i forhold til andre alternative materialer eller bruk av tilsetningsstoffer til kvartssanden.

Videre har også alle forsøkene og pilotstudiene til felles at det anvendes en eller flere typer biomassebasert brensel. I publikasjonene fremheves det spesifikt at masovnsstoff egner seg godt ved forbrenning av biobrensler som kan være problematiske på grunn av høyt innhold av alkalimetaller. Dette stemmer overens med teorien om at masovnsstoff som er kvartsfritt ikke reagerer med alkalier i brenselets aske og dermed redusert agglomerering.

Årsaker til agglomerering og hvordan forhindre dette var hovedfokuset i de fleste av forskningsartiklene. Disse anvendte alle SEM-EDS som verktøy for å studere sammensetningen av agglomeratene. Resultatene viste reduserte agglomereringstendenser i alle studiene bortsett fra fullskalaforsøket med Hyttsand som bedmateriale. Her ble smeltet glass som fungerer som lim mellom bedpartiklene ansett som årsaken til agglomerering. Dette er i motsetning til de andre studiene der det skjer en reaksjon mellom brensel og bedmateriale, og har en sammenheng med at det i dette forsøket hovedsakelig var avfall som ble brukt som brensel. Erfaringer fra testkjøringen i Riikinvoima-anlegget, som benytter tilsvarende brensel, har derimot ikke presentert dette som en utfordring. En nærmere analyse med sammenligning av brenselsammensetningen fra begge disse forsøkene kan være av betydning før oppstart av pilotprosjektet ved anlegget til Kvitebjørn Bio-El for å fastslå hvor overførbare resultatet her er.

Når det gjelder forbruk av bedmateriale viste testkjøringene ved de finske anleggene at det er mulig å oppnå en betydelig reduksjon i forbruket ved overgang til masovnsstoff som bedmateriale. Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg har flest likheter med Riikinvoima-anlegget, som betyr at det kan være mulig å oppnå en tilsvarende reduksjon sammenlignet med bruk av

kvartssand som tidligere. Der ble forbruket redusert fra 15 tonn/dag til 8 tonn/dag.

Under halvparten av de utvalgte publikasjonene viste til resultater knyttet til røykgass. Med unntak for at det ble observert noe økte konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> og HCl, ble det konkludert med at endring av bedmateriale hadde liten effekt på utslippene til luft.

## 6. Oppsummering av funn

Litteraturstudien som har blitt gjennomført har resultert i en rekke funn som oppsummeres her.

- Lite geografisk spredning i den valgte litteratursammensetningen. Sverige og Finland er de eneste bidragslandene i studien.
- De utvalgte publikasjonene og testkjøringene presenterte alle gode resultater for bruk av masovnslegg som bedmateriale ved fluidisert bed-forbrenning. Det var varierende hvilke parametere som ble målt og hvor detaljert beskrevet anvendte metoder i studiene var.
- Kun én av publikasjonene omhandlet forsøk der avfall er brukt som brensel i forbrenningsprosessen. I de resterende publikasjonene anvendes ulike typer biomassebasert brensel.
- Avfall som brensel skilte seg fra biomasse ved at innholdet av alkalimetaller var lavere. Når brenselet reagerer med bedmaterialet dannes belegglag på bedpartiklene, og ved bruk av masovnslegg tydet resultatene på at det ytterste laget som ble dannet beskytter mot agglomerering.
- Flertallet av publikasjonene har i stor grad hatt fokus på alternative bedmaterialer sin innvirkning på agglomerering. Bruk av masovnslegg har resultert i reduserte tendenser til agglomerering i bedet i samtlige studier. To av publikasjonene viste også til lenger agglomereringsprosess, som kan tyde på at masovnslegg tåler mer varme og forbrukes langsommere enn kvartssanden ved forbrenning.
- Kun tre av syv publikasjoner analyserer røykgassen ved bruk av alternative bedmaterialer, og konkluderte med at røykgasskomponentene var relativt uendret ved overgang til masovnslegg. Unntak var noe økte konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> og HCl.

- Når det gjelder forbruk av bedmateriale viste alle erfaringene fra drift i de nevnte finske anleggene at en overgang til bruk av masovnsstoff medførte en betydelig reduksjon i forbruket. Ved både Metsä Board og UPM sine anlegg ble forbruket av bedmateriale redusert med ca. 80 % sammenlignet med natursand, mens det i Riikinvoima sitt anlegg gikk fra 15 tonn/dag til 8 tonn/dag.

## 7. Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt gjennomført en litteraturstudie for å finne aktuell forskning på bruk av masovnsstoff som bedmateriale i avfallsforbrenningsanlegg som baserer seg på CFB-teknologi slik som i Kvitebjørn Bio-El sitt anlegg i Fredrikstad.

Resultatet av litteratursøket tydet på at det er utført lite forskning på dette feltet de siste tyve årene. Kun Sverige og Finland har vært bidragslandene til forskningen, og flertallet av publikasjonene er utgitt i samarbeid med universiteter.

Det ble valgt ut syv publikasjoner til videre fordypning, og disse ble kombinert med bruk av erfaringer fra testkjøringer og drift ved noen finske anlegg. Forsøkene som er presentert i de ulike studiene varierer i både innhold og detaljnivå for beskrivelse av utførelse, i tillegg til anvendt forbrenningsteknologi, anleggskapasitet og valg av brensel. Spesielt sistnevnte ga ikke et relevant grunnlag for å svare på egnethet til masovnsstoff som brensel i et avfallsforbrenningsanlegg, ettersom et klart flertall av publikasjonene ikke anvendte avfall som brensel i testforsøkene, men kun ulike typer biomasse. Det er derfor vanskelig å sammenligne resultatene fra disse og trekke slutninger som er direkte overførbare til testprosjektet med bruk av GR-Granul som bedmateriale i anlegget til Kvitebjørn Bio-El.

Resultatene tyder likevel på at masovnsstoff har gode fluidiseringsegenskaper og egner seg godt ved fluidisert bed-forbrenning. Det har et klart potensial som erstatning av kvartssand som bedmateriale, og kan bidra til betydelig redusert agglomerering ved valg av brensel med høyt innhold av alkalimetaller. I tillegg vil eventuell erstatning av ikke-fornybar sand med masovnsstoff, som er et biprodukt fra stålindustrien, bety at ressursene holdes i kretsløpet og være i tråd med sirkulær økonomi.



## 7.1. Videre forskning og utvikling

Litteraturstudien avdekket at det var utført lite forskning på bruk av masovnsstoff som bedmateriale i CFB-kjel ved forbrenning av avfall. Ved å gjennomføre forsøk med dette i anlegget til Kvitebjørn Bio-El vil dette gi et bedre sammenligningsgrunnlag med blant annet resultatet ved Riikinvoima-anlegget og fullskalaforsøket med Hyttsand som bedmateriale. I tillegg kan det bidra til økt forståelse av årsak til agglomerering i bed når avfall anvendes som brensel.

Det vil være naturlig å gjøre en avveining av økonomisk lønnsomhet og miljø for å anslå om det er gunstig å anvende masovnsstoff som bedmateriale istedenfor Baskarpsanden. Her kan det være aktuelt å bruke livsløpsanalyse (LCA) for å dokumentere hvilket bedmateriale som gir best miljøprestasjon.

Løsninger ved bruk av alternativer til ikke-fornybare ressurser er et stadig aktuelt tema, og det kan derfor være interessant å gjennomføre en ny litteraturstudie for å undersøke om andre avfallsprodukter enn masovnsstoff kan benyttes som bedmaterialet i anlegget.

## 8. Referanser

- Avfall Norge. (2020). *Behandlingsanlegg for avfall 2020*: Google My Maps. Tilgjengelig fra: [https://www.google.com/maps/d/u/0/embed?mid=1bzfnG6ZSrNK7GEBWAUaes1\\_cDQA&ll=63.309779256925005%2C9.58362734522436&z=5](https://www.google.com/maps/d/u/0/embed?mid=1bzfnG6ZSrNK7GEBWAUaes1_cDQA&ll=63.309779256925005%2C9.58362734522436&z=5) (lest 05.08.2020).
- Avfallsforskriften. (2004). *Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall. Kapittel 10. Forbrenning av avfall*. Tilgjengelig fra: [https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-930/KAPITTEL\\_10#KAPITTEL\\_10](https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-930/KAPITTEL_10#KAPITTEL_10) (lest 11.05.2020).
- Basu, P. (2015). *Circulating Fluidized Bed Boilers : Design, Operation and Maintenance*. 1st ed. 2015. utg. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer.
- Brus, E., Öhman, M., Nordin, A., Boström, D., Hedman, H. & Eklund, A. (2004). *Bed agglomeration characteristics of biomass fuels using blast-furnace slag as bed material*. *Energy & fuels*, 18 (4): 1187-1193.
- Buekens, A. (2013). *Incineration Technologies*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. New York, NY: Springer New York.
- Christensen, T. H., International Waste Working Group & International Solid Waste Association. (2011). *Solid waste technology & management*, b. 1. Chichester: Wiley.
- Daavitsainen, J., Laitinen, R., Nuutinen, L., Ollila, H., Tiainen, M. & Virtanen, M. (2001). *Effect of GR GRANULE used as bed material to reduce agglomeration in BFB combustion of biomass with high alkali metal content*. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*: 705-712.
- Daavitsainen, J. H. A., Nuutinen, L. H., Tiainen, M. S. & Laitinen, R. S. (2001). *Agglomeration and the Content of Amorphous Material in FB Combustion. A Full-Scale Boiler Test*. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*: 779-788. doi: 10.1002/9780470694954.ch62.
- Daimyo. (u.å.). *Kvitebjørn Bio-El AS*. Tilgjengelig fra: <https://www.daimyo.no/kvitebjornbioel> (lest 21.01.2020).
- Davidsson, K. O., Åmand, L. E., Steenari, B. M., Elled, A. L., Eskilsson, D. & Leckner, B. (2008). *Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler*. *Chemical Engineering Science*, 63 (21): 5314-5329. doi: 10.1016/j.ces.2008.07.012.
- Eklund, A., Brus, E., Öhman, M., Hedman, H., Boström, D. & Nordin, A. (2003). *Utvärdering av Hyttsand som bäddsand i FB-anläggningar. Förstudie och laborieförsök*.
- Eklund, A. & Öhman, M. (2004). *Fullskaleförsök med hyttsand som bäddmaterial i 12 MW avfallseldad BFB-panna*.
- Elled, A.-L., Åmand, L.-E. & Steenari, B.-M. (2013). *Composition of agglomerates in fluidized bed reactors for thermochemical conversion of biomass and waste fuels*

*Experimental data in comparison with predictions by a thermodynamic equilibrium model. Fuel (Guildford), 111: 696.*

Fescon AB. (u.å.). *GR-Granul*. Tilgjengelig fra:

[https://www.fescon.fi/Download/23744/granul\\_broschyr\\_sv.pdf](https://www.fescon.fi/Download/23744/granul_broschyr_sv.pdf) (lest 10.08.2020).

Forurensningsloven. (1981). *Lov om vern mot forurensninger og om avfall*

(*forurensningsloven*). Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1981-03-13-6> (lest 04.02.2020).

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., Ionkova, K., Morton, J., Poveda, R. A., Sarraf, M., Malkawi, F., Harinath, A. S., et al. (2018). *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development: Washington, DC: World Bank.

Klasila, T. & Ilvonen, S. (2018). *Masugnsslagg som bäddmaterial*: VTT Expert Services Oy.

Miljøverndepartementet. (2013). *Fra avfall til ressurs*. Tilgjengelig fra:

[https://www.regjeringen.no/contentassets/27128ced39e74b0ba1213a09522de084/t-1531\\_web.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/27128ced39e74b0ba1213a09522de084/t-1531_web.pdf) (lest 10.02.2020).

Nuutinen, L. H., Tiainen, M. S., Virtanen, M. E., Enestam, S. H. & Laitinen, R. S. (2004). *Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers. Energy Fuels, 18 (1): 127-139.* doi: 10.1021/ef0300850.

Pettersson, A., Åmand, L.-E. & Steenari, B.-M. (2009). *Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction. Fuel, 88 (9): 1758-1772.* doi: 10.1016/j.fuel.2009.03.038.

Statistisk sentralbyrå. (2019). *Avfallsregnskapet*. Tilgjengelig fra:

<https://www.ssb.no/avfregno> (lest 06.04.2020).

Taherzadeh, M. J. & Richards, T. (2016). *Resource Recovery to Approach Zero Municipal Waste*. Green chemistry and chemical engineering. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

UNEP. (2019). *Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources*: United Nations Environment Programme.

Tilgjengelig fra:

[https://unepgrid.ch/storage/app/media/legacy/89/Sand\\_and\\_sustainability\\_UNEP\\_2019.pdf](https://unepgrid.ch/storage/app/media/legacy/89/Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf) (lest 28.05.2020).

Van Caneghem, J., Brems, A., Lievens, P., Block, C., Billen, P., Vermeulen, I., Dewil, R., Baeyens, J. & Vandecasteele, C. (2012). *Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues. Progress in Energy and Combustion Science, 38 (4): 551-582.* doi: 10.1016/j.peccs.2012.03.001.

Wilsgaard, S. (2018). *Fjernvarme fra avfallsforbrenning vokser jevnt og trutt*. Tilgjengelig

fra: <https://www.avfallnorge.no/bransjen/nyheter/fjernvarme-fra-avfallsforbrenning-vokser-jevnt-og-trutt> (lest 06.04.2020).

Zintl, F. & Ljungdahl, B. (2004). *Alternativa bäddmaterial i FB/CFB-pannor*.





**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway