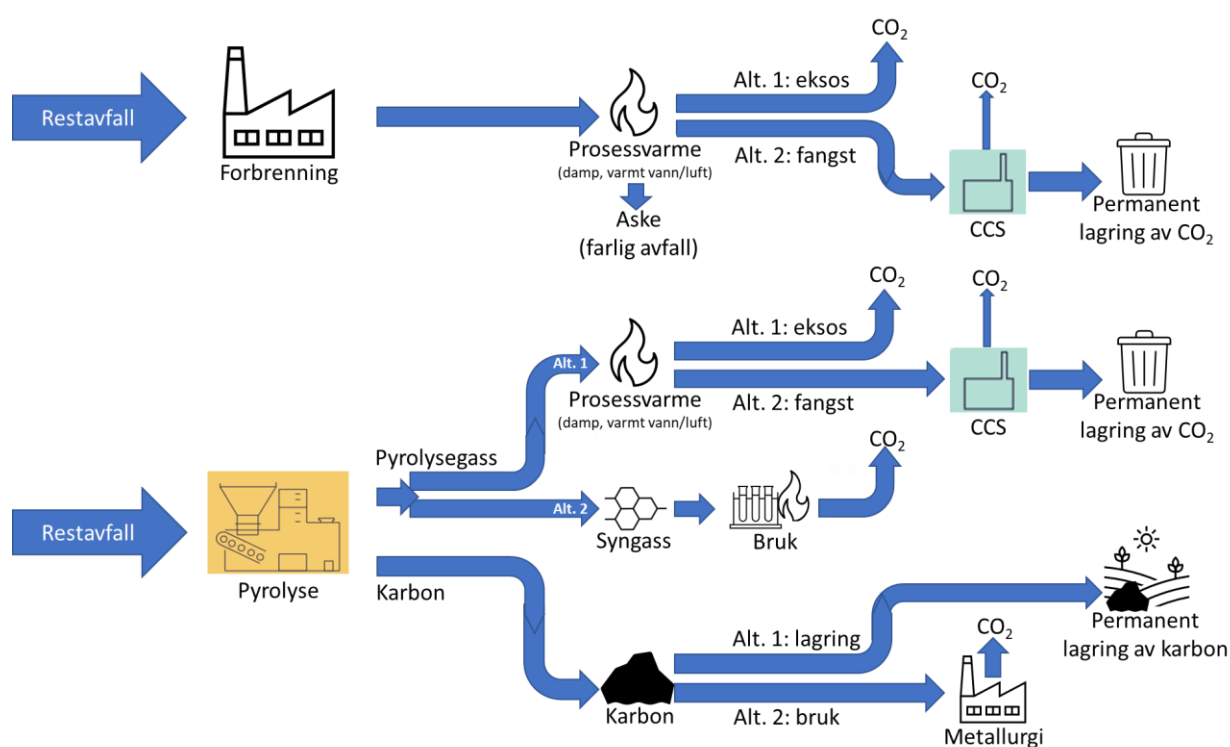


Forstudie: Pyrolyse versus avfallsforbrenning - med karbonfangst og lagring



FORFATTERE

HANNE LERCHE RAADAL OG INGUNN SAUR
MODAHL

RAPPORTNUMMER

OR 01.24

ÅRSTALL

2024

ISBN NR.
978-82-7520-931-1

ISSN NR.
2703-8610

RAPPORTTYPE
Oppdragsrapport

TILGJENGELIGHET
Åpen



PROSJEKTNUMMER

3420

PROSJEKTNAVN

Pyrolyse med produksjon av kull og pyrolysegass versus avfallsforbrenning, med karbonfangst og -lagring

OPPDRAKSGIVER

Regionale forskningsfond Vestfold og Telemark

REFERANSE

342886

KVALITETSSIKRER

Pieter Callewaert

ANTALL SIDER

11

EMNEORD

Pyrolyse, forbrenning, CCS, LCA

ILLUSTRASJON FORSIDE

NORSUS

Sammendrag

Denne forstudien er finansiert av Regionale forskningsfond Vestfold og Telemark og de deltagende partnerne. Vesar (Vestfold avfall og ressurs AS) har vært prosjektansvarlig med NORSUS som prosjektleder. De andre deltagende partnerne er Norsk senter for sirkulær økonomi (NCCE), Universitetet i Sørøst-Norge, Biosynergi AS og VOW ASA.

Det er benyttet Life Cycle Assessment (LCA) -metodikk for sammenligning av klimapåvirkning og bruk av primærenergi for to ulike behandlingsmåter for restavfall: pyrolyse med produksjon av kull og pyrolysegass og avfallsforbrenning. Begge behandlingsmåtene er analysert med og uten karbonfangst og -lagring (CCS). Det er viktig å påpeke at det er foretatt en rekke forutsetninger og forenklinger for gjennomføring av forstudien, og resultatene må vurderes i lys av dette.

Resultatene viser at pyrolyse av restavfall er en interessant behandlingsmåte sammenlignet med forbrenning med energiutnyttelse. For miljøpåvirkningskategorien klimapåvirkning kommer pyrolyse klart bedre ut enn forbrenning dersom CCS ikke inngår. Dersom CCS inngår, er rangeringen avhengig av hvor lagringsstabil kullet fra pyrolyseprosessen forutsettes å være. Forbrenningsalternativet gir et resultat som ligger mellom de to pyrolysescenariene som forutsetter henholdsvis 100 % og 80 % lagringsstabil kull. Det er verdt å presisere at pyrolyse kan medføre netto negative CO₂-utslipp og dermed fjerning av CO₂ fra atmosfæren selv uten fangst og lagring av CO₂ fra forbrenning av pyrolysegasen.

Forbrenningsalternativet medfører lavest bruk av primærenergi uavhengig av om CCS inngår. For både forbrenning og pyrolyse øker energibruken ved implementering av CCS fordi både fangstteknologien og transport av fanget CO₂ til lagring krever energi.

Det ble gjennomført en workshop for diskusjon av resultatene og relevante problemstillinger for et eventuelt hovedprosjekt den 31.1.2024. Med bakgrunn i dette, anbefales det å jobbe videre med å etablere et FoU-hovedprosjekt for mer grundige bærekraftsanalyser for sammenligning av pyrolyse og avfallsforbrenning. Relevante utvidelser og problemstillinger for et hovedprosjekt er oppsummert til å være:

- Inkludere flere miljøpåvirkningskategorier
- Inkludere kostnader, eventuelt som en kost-/nytteanalyse
- Vurdere relevante forbehandlingsmetoder for restavfall før pyrolyse.
- Vurdere mulig bruksverdi for produsert kull, som for eksempel bruk som sorbent til PFAS-rensing og bruk i metallurgisk industri.
- Analysere eventuell utlekkingsrate for tungmetaller som oppkonsentreres i kullet.
- Analysere pyrolyse som en prosess for fjerning av miljøgifter i avfallet.
- Flere scenarier/alternativer for utnyttelse og bruk av pyrolyseproduktene, som f.eks syngass.
- Ulike energiutnyttelsesgrader og transportavstander avhengig av spesifikk lokalisering av relevant avfallsforbrennings- og pyrolyseanlegg.
- Inkludere mere nøyaktige data for anleggene, for eksempel ved å ta med eventuelt støttebrensel for forbrenningsanlegget.

Videreføring til et hovedprosjekt vil resultere i verdifull kunnskap for å definere avfallsbransjens strategiske veivalg for nye investeringer.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	iii
1 Innledning.....	1
2 Sammenlignende systemer og datagrunnlag.....	2
2.1 Systemer for avfallsbehandling av restavfall.....	2
2.2 Funksjonell enhet	3
2.3 Sammensetning av restavfall.....	3
2.4 Datagrunnlag for avfallsforbrenning og pyrolyseprosess.....	4
3 Resultater	6
3.1 Klimapåvirkning	6
3.1.1 Klimapåvirkning for de vurderte alternativene	6
3.1.2 Beregning av potensial for å fjerne CO ₂ fra atmosfæren for de vurderte alternativene	7
3.2 Bruk av primærenergi for de vurderte alternativene.....	8
4 Konklusjon og videre arbeid.....	10
5 Referanser	11

1 Innledning

Forstudien er finansiert av Regionale forskningsfond Vestfold og Telemark og de deltagende partnerne. Vesar (Vestfold avfall og ressurs AS) har vært prosjektansvarlig med NORSUS som prosjektleder. De andre deltagende partnerne er Norsk senter for sirkulær økonomi (NCCE), Universitetet i Sørøst-Norge, Biosynergi AS og VOW ASA.

Avfallsbransjen står foran store utfordringer knyttet til innføring av sirkulærøkonomi. De totale avfallsmengdene skal reduseres så mye som mulig, og dernest skal en så stor andel som mulig materialgjenvinnes for å utnytte ressursene flere ganger. Samtidig skal avfall som, av ulike årsaker, ikke bør gå inn i et nytt materialkretsløp behandles på en mest miljø- og ressurseffektiv måte. Dagens hovedløsning for sluttbehandling av restavfall er forbrenning med energiutnyttelse. Fordi restavfall generelt inneholder avfallsressurser av både fossil (f.eks plast) og biogen opprinnelse, er det utslipp av både fossil og biogen CO₂ fra forbrenningsanlegg. Bygging av karbonfangstanlegg er en løsning for å redusere CO₂-utslippet, men dette vil være kostbart både investerings- og driftsmessig. Bruk av pyrolyse for behandling av deler av avfallsstrømmene kan være et interessant supplement til forbrenning med karbonfangst. Dette fordi pyrolyse av avfall produserer lagringsstabil, fritt karbon (kull), som inneholder en andel av karbonet i avfallet, og som kan ha nyttige funksjoner både i landbruk, vannrensing og i industrielle prosesser. Avfallsressursenes opphav definerer hvorvidt kullet kan klassifiseres som biokull eller fossilt kull. En pyrolyseprosess som produserer biogent kull vil kunne medføre netto negative CO₂-utslipp mens fossilt kull vil medføre reduserte CO₂-utslipp. Pyrolyseprosessen produserer også pyrolysegass som kan utnyttes som energiresurs, evt. med tilhørende karbonfangst og lagring, eller den kan oppgraderes og utnyttes som råvare (syngass) for produksjon av kjemikalier.

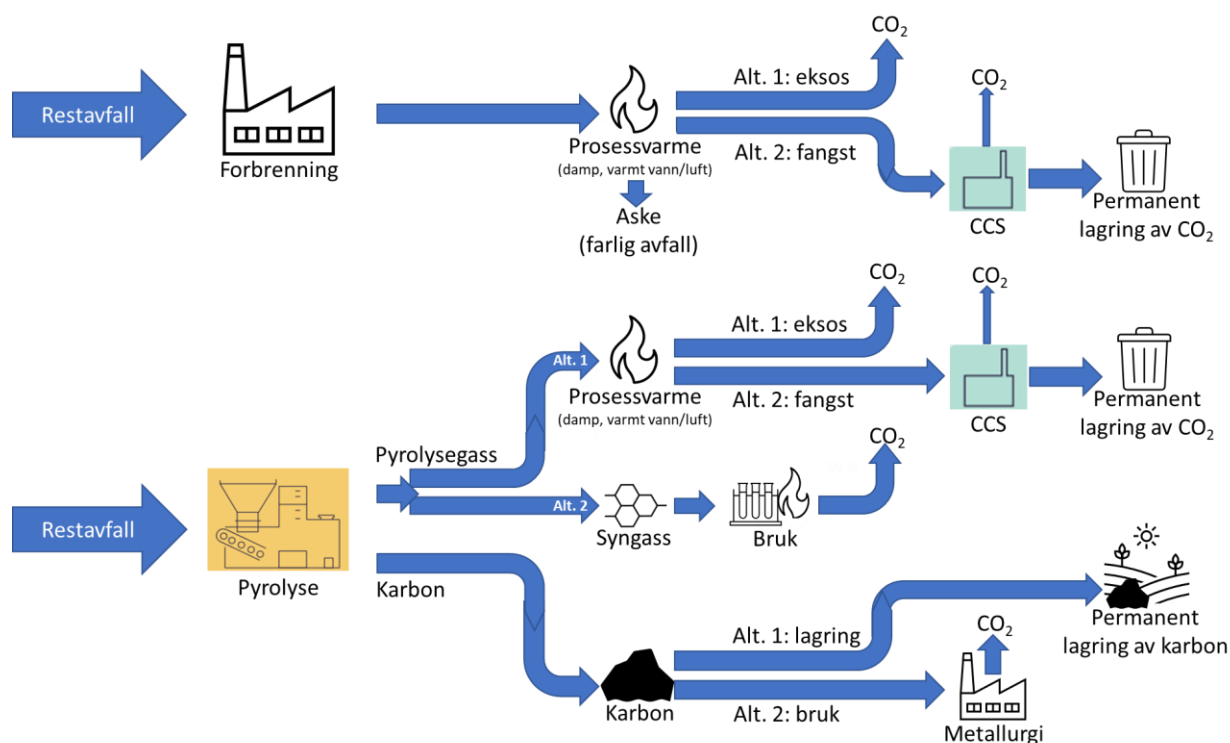
Det er benyttet Life Cycle Assessment (LCA) -metodikk for sammenligning av klimapåvirkning og bruk av primærenergi for to ulike behandlingsmåter for restavfall: pyrolyse med produksjon av kull og pyrolysegass og avfallsforbrenning. Begge behandlingsmåtene er analysert med og uten karbonfangst og -lagring (CCS).

I tillegg til å presentere resultatene for klimapåvirkning for hovedanalysen (kapittel 3.1.1 for sammenligning av de alternative behandlingsmåtene, presenteres resultater for beregning av mulige netto negative utslipp (kapittel 3.1.2). Denne gjøres med noe andre systemgrenser enn hovedanalysen siden denne analysen skal vurdere hvorvidt det tekniske systemet i seg selv kan være netto negativt (skal da ikke sammenlignes med andre systemer).

2 Sammenlignende systemer og datagrunnlag

2.1 Systemer for avfallsbehandling av restavfall

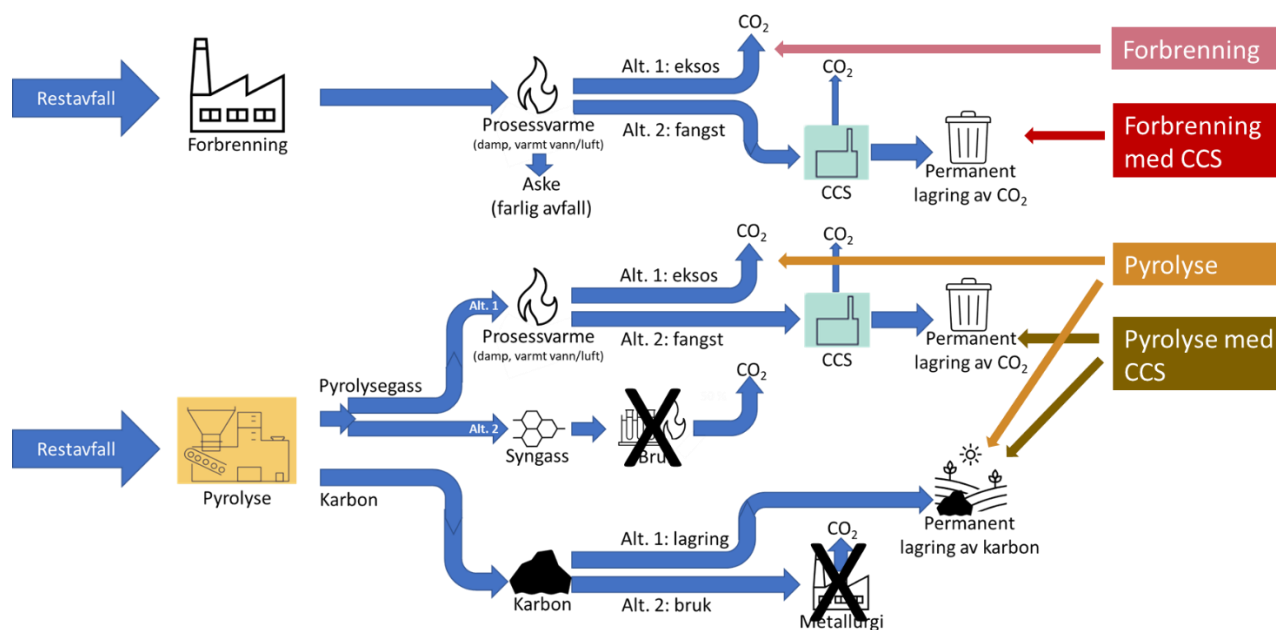
Figur 1 viser en prinsippskisse for forbrenning og pyrolyse av restavfall, med alternative ruter for fangst og behandling av karbon.



Figur 1 Prinsippskisse for forbrenning og pyrolyse av restavfall, med alternative ruter for fangst og behandling av karbon.

Figuren over viser at CO₂ fra forbrenning av restavfall kan slippes direkte ut i atmosfæren eller bli fanget ved hjelp av et fangstanlegg med etterfølgende lagring. Prosessvarmen kan benyttes til produksjon av eksempelvis damp, varme eller strøm. Videre sees at pyrolyseprosessen produserer pyrolysegass som kan utnyttes som energiressurs, eventuelt med tilhørende karbonfangst og lagring. En annen mulighet er at pyrolysegassen oppgraderes og utnyttes som en råvare (syngass) for produksjon av kjemikalier. Pyrolyseprosessen produserer også kull/karbon som enten kan lagres i jord eller utnyttes som råvare i for eksempel metallurgiske prosesser.

I dette forprosjektet er det gjort forenklinger av systemene. Figur 2 viser dette ved at ekskluderte aktiviteter er satt kryss over.



Figur 2 Forenklet skisse for forbrenning og pyrolyse av restavfall slik det er analysert i dette forprosjektet (fire systemer er analysert). Prosessvarme forutsettes å erstatte norsk strøm.

Figuren viser at både avfallsforbrenning og pyrolyse er analysert som 2 alternative systemer: med og uten fangst og lagring av CO₂ i røkgassen fra henholdsvis forbrenning av avfall og forbrenning av pyrolysegassen. Det antas at avfallsenergien fra både forbrenningsanlegget og pyrolyseanlegget utnyttes som varme. Pyrolysesystemet er forenklet ved at det antas at all gassen utnyttes som varme, noe som betyr at ingenting antas kondensert til tjære eller bioolje for eventuell annen bruk. Dette medfører at pyrolyseprosessen har to utstrømmer (kull/karbon og gass til varmeproduksjon). Tilsvarende er pyrolysesystemet forenklet ved at det antas at alt kullet lagres ved at det graves ned i jordsmonn, og at ingenting benyttes til for eksempel metallurgisk industri.

2.2 Funksjonell enhet

Funksjonell enhet for analysen er: Behandling av 1 tonn avfall med tilhørende erstatning av den mengden energi som genereres fra avfallet når det behandles.

2.3 Sammensetning av restavfall

En oversikt over restavfallet med hensyn på avfallstyper, brennverdi, innhold av tørrstoff, fossilt og biogent karbon, samt andel karbon som ender opp i henholdsvis pyrolysegass og kull er oppsummert i Tabell 1.

Utgangspunkt i 100 kg avfall	100 kg fra avfallsanalysen, våt basis (Vesar 2021)	Kg tørrstoff i de forskjellige kategoriene	Brennverdi i 100 kg avfall (MJ)	Kg karbon i 100 kg restavfall	Kg biogent karbon i 100 kg restavfall	Kg fossilt karbon i 100 kg restavfall	Andel biogent karbon i restavfall	Andel fossilt karbon i restavfall	Andel biogent karbon i pyrolysegass	Andel fossilt karbon i pyrolysegass	Andel biogent karbon i kull	Andel fossilt karbon i kull
Papp og papir	4.4	3.8	68.5	1.7	1.7	0.0						
Mat	26.0	9.8	175.5	4.4	4.4	0.0						
Planterester	9.9	5.4	43.6	2.3	2.3	0.0						
Plast	10.8	10.3	410.4	6.8	0.0	6.8	74 %	26 %	41 %	25 %	33 %	1 %
Tekstil	4.9	4.7	135.0	2.3	1.2	1.2						
Annet brennbart	31.2	29.6	533.5	13.1	13.1	0.0						
Ikke brennbart	12.8	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0						
Summerte verdier	100.0	76.1	1366.5	30.6	22.6	8.0	100 %		100 %			

Tabell 1 Restavfallets sammensetning fordelt avfallstyper, innhold av tørrstoff, fossilt og biogent karbon, brennverdi og andel av karbonet som ender opp i henholdsvis pyrolysegass og kull.

Sammenstillingen er utført av prosjektgruppens medlemmer Marianne Sørflaten Eikeland (USN) og Tormod Briseid (Biosynergi) som en del av prosjektet. Fordeling av restavfall på avfallstyper er basert Vesars Avfallsanalyse (Hultin & Bjørnerud, 2021). Verdier for tørrstoffinnhold, brennverdi, aske- og karboninnhold er hentet fra Christensen and Jacobsen (1998). Videre antas at papir og papp, mat, planterester, annet brennbart og 50% av tekstilene består av biogent karbon. Basert på data fra Veses, Sanahuja-Parejo, Callén, Murillo, and García (2020), er det antatt hvordan karbonet i avfallet fordeles på henholdsvis kullet og pyrolysegassen. For plast forutsettes at ca 2,5 % av karbonet er igjen i kullet etter pyrolyse, mens resten følger pyrolysegassen. For de andre avfallstypene antas at 45 % og 55 % av karbonet blir igjen i henholdsvis kullet og pyrolysegassen. Totalt sett betyr dette at 34 % og 66 % av karbonet blir igjen i henholdsvis kullet og pyrolysegassen.

2.4 Datagrunnlag for avfallsforbrenning og pyrolyseprosess

Det forutsettes, som beskrevet over, at det produseres varme fra både avfallsforbrenningsanlegget og fra forbrenning av pyrolysegassen. Utslipp av CO₂ fra forbrenningsprosessene er beregnet basert på karboninnhold i avfallet og, for pyrolysegassen, mengde karbon som havner i gassen. Det betyr at det kun er CO₂-utslipp som inngår i beregning av klimapåvirkning fra forbrenningsprosessene. Videre antas en energiutnyttelsesgrad av varmen på 80 % og at norsk elektrisitet (NVE, 2020) erstattes av den produserte varmen. Det antas samme utnyttelse av varme fra forbrenning av gass fra pyrolyseanlegget som for varme fra direkte forbrenning av avfall fra forbrenningsanlegget.

Temperaturen i pyrolyseprosessen forutsettes å ligge rundt 650 grader. Prosessen forutsettes å benytte elektrisitet, i tillegg til at 8,7 % av pyrolysegassen blir benyttet til tørking (Nilsen, 2023). Andre prosessrelaterte data er basert på spesifikke energiberegninger for et anlegg som behandler 8000 tonn restavfall per år (op. cit).

For fangst og lagring av CO₂ fra røykgass (både fra avfallsforbrenning direkte og fra forbrenning av pyrolysegass) er det benyttet data fra Raadal and Modahl (2021) for et fangstanlegg som representerer teknologien til CO₂ Capsol, som er basert på trykk og med kaliumkarbonat som løsemiddel. Anlegget forutsettes å ha en fangstgrad på 90 %. Transport frem til og lagring på sokkel er inkludert.

I hovedscenariet antas lagret karbon i kullet å ha 20 % flyktig innhold som slippes ut i form av CO₂ (IPCC, 2019). Det er også vist resultater for et scenario for pyrolyse der det antas 0 % flyktig innhold slik at 100 % av kullet blir permanent lagret (Azzi, Li, Cederlund, Karlton, & Sundberg, 2024; Sanei et al., 2024).

Databasen ecoinvent (allocation, cut-off by classification, v.3.9.1) er brukt for modellering av generiske data i bakgrunnsystemet (transport og infrastruktur i forbindelse med CCS, produksjon av energibærere til

elektrisitet smiksen osv). Programvaren som er brukt for modellering av systemene er spesiallaget for LCA-modellering (SimaPro Developer v.9.5.0.0 Multi user).

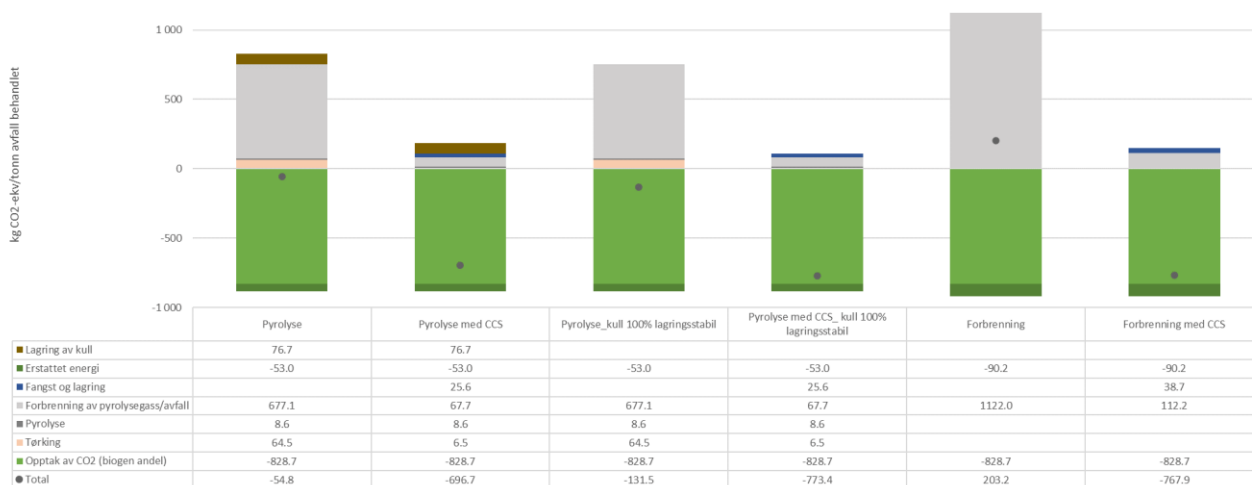
3 Resultater

Dette kapittelet presenterer resultatene for klimapåvirkning og primærenergi for de to hovedalternativene pyrolyse og avfallsforbrenning av restavfall. Hvert hovedalternativ er analysert som to scenarier: med og uten karbonfangst og lagring (CCS) av CO₂ i røykgassen fra henholdsvis forbrenning av avfall og forbrenning av pyrolysegass. For klimapåvirkning er resultatene vist med systemgrensene som definert for hovedanalysene (kapittel 3.1.1). I tillegg presenteres resultatene med systemgrenser for beregning av negative utslipp/fjerning av CO₂ fra atmosfæren (kapittel 3.1.2).

3.1 Klimapåvirkning

3.1.1 Klimapåvirkning for de vurderte alternativene

Figur 3 viser resultatene for klimapåvirkning for sammenligning av de to hovedalternativene pyrolyse og avfallsforbrenning, med tilhørende scenarier med og uten CCS. I tillegg er det presentert et ekstra scenario for pyrolyse som antar at all kullet forutsettes å bli permanent lagret (ingen oksidering av lagret karbon i kullet til CO₂, som forutsatt i hovedscenariet (20 %)). Resultatene presenteres som positiv og negativ klimapåvirkning for behandling av 1 tonn restavfall, fordelt på de ulike livsløpsfasene. Positiv klimapåvirkning representerer utslipp av klimagasser mens negativ klimapåvirkning representerer sparte klimagassutslipp fra produksjon av elektrisitet som forutsettes erstattet av avfallsressursene, samt opptak av biogen CO₂. I tillegg er netto klimapåvirkning, summen av positiv og negativ klimapåvirkning, vist ved en grå prikk på figuren.



Figur 3 Resultater for klimapåvirkning vist som kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall for pyrolyse (4 scenarier) og forbrenning (2 scenarier).

Figur 3 viser at CCS-alternativene gir lavest klimapåvirkning. Pyrolyse med 100 % lagringsstabil kull og forbrenning gir best og tilnærmet likt resultat (henholdsvis -773 og -768 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall), etterfulgt av pyrolyse med 80 % lagringsstabil kull (-697 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall), alle representert ved grå prikk «Total». Videre sees at forbrenning uten CCS gir klart dårligst netto klimapåvirkning med 203 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall. Tilsvarende resultat for pyrolyse (uten CCS) med henholdsvis 80 % og 100 % lagringsstabil kull er -55 og -132 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall.

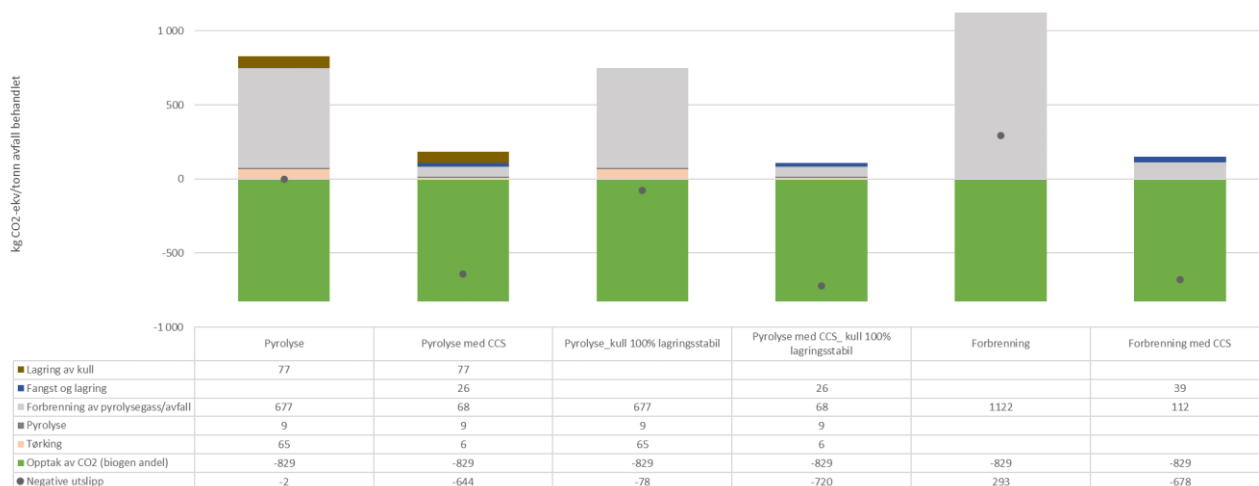
Figur 3 viser at bidraget til negativ (spart) klimapåvirkning er relativt lik for alle scenariene, og domineres av opptak av biogen CO₂ (-829 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall). Dette skjer ved 'produksjon' av den biogene andelen av restavfallet (74 %, se Tabell 1). Videre sees at pyrolysescenariene også får et bidrag til negativ klimapåvirkning (-53 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall) fordi pyrolysegassen som antas benyttet til oppvarming forutsettes å erstatte elektrisitet. På samme måte får forbrenningsscenariene et bidrag til negativ klimapåvirkning (-90 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall) fordi avfallsenergien også her antas benyttet til oppvarming og forutsettes å erstatte elektrisitet.

Figur 3 viser at bidragene til positiv klimapåvirkning varierer i mye større grad mellom scenariene, først og fremst i form av utslipp fra forbrenning av pyrolysegass/avfall. For scenariene uten CCS, gir disse utslippene det klart største bidraget til positiv klimapåvirkning, der forbrenningsalternativet har størst bidrag fra forbrenning (1122 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall). I scenariene med CCS reduseres utslippene fra forbrenning med 90% (som utgjør antatt fangstgrad). I tillegg kommer et ekstra bidrag fra selve fangst- og lagringsaktivitetene. Pyrolyseprosessen har, utover dette, også bidrag fra tørkeprosessen (bruk av pyrolysegass) og fra lagring av kull for scenariene der kullet antas å være 80% lagringsstabil.

3.1.2 Beregning av potensial for å fjerne CO₂ fra atmosfæren for de vurderte alternativene

Terminologien «negative utslipp» refererer til fjerning av CO₂-utslipp fra atmosfæren. For å kunne resultere i en nedgang i atmosfærisk CO₂, må netto klimabelastning fra hele verdikjeden til det tekniske systemet som vurderes være negativ (Tanzer & Ramírez, 2019). Dette kan oppnås ved fangst og permanent lagring av biogene CO₂-utslipp siden dette karbonet i utgangspunktet ble «fanget av fotosyntesen», og således tilhører det naturlige karbonkretsløpet. Ved å fange og lagre dette karbonet permanent, hindres det å returneres til atmosfæren, og det kan derfor regnes som fjernet/tatt ut av det naturlige karbonkretsløpet. Netto negative klimautslipp for en aktivitet oppnås altså kun dersom de tilførte klimautslippene som må til for å gjennomføre aktiviteten (for eksempel utslipp fra drift av fangstanlegget og fra transport av fanget CO₂ frem til lagring) er lavere enn de som fjernes fra atmosfæren. Negative utslipp kan ikke oppnås for fossile CO₂-utslipp fordi opprinnelsen til dette karbonet er fra olje/gass, som i utgangspunktet var permanent lagret fra før, og dermed ikke tilhører det naturlige karbonkretsløpet med kort omløpstid. Fanges og lagres dette utslippet, gir det fortsatt en reduksjon av utslipp sammenlignet med ikke-fangst, men det vil aldri kunne karakteriseres som fjerning av karbon fra atmosfæren. Sparte utslipp som følge av erstattet materiale eller energi utenfor systemet som analyseres skal ikke telle med siden 'netto negativ'-analyser kun skal vurdere hvorvidt det tekniske systemet i seg selv kan være netto negativt (skal da ikke sammenlignes med andre systemer). Ved beregning av netto negative utslipp er altså systemgrensene noe annerledes enn det som er benyttet i hovedanalysen (kapittel 3.1.1 i dette prosjektet, som sammenligner de ulike teknologiene mot hverandre).

Figur 4 viser resultater for mulige netto negative utslipp (nettoresultater er representert ved en brun prikk) for de ulike scenariene, samt hvordan de ulike aktivitetene bidrar. Sammenlignet med resultatene for klimapåvirkning i Figur 3, beregnes mulige netto negative utslipp som summen av de samme aktivitetene, bortsett fra sparte utslipp fra erstattet energi.

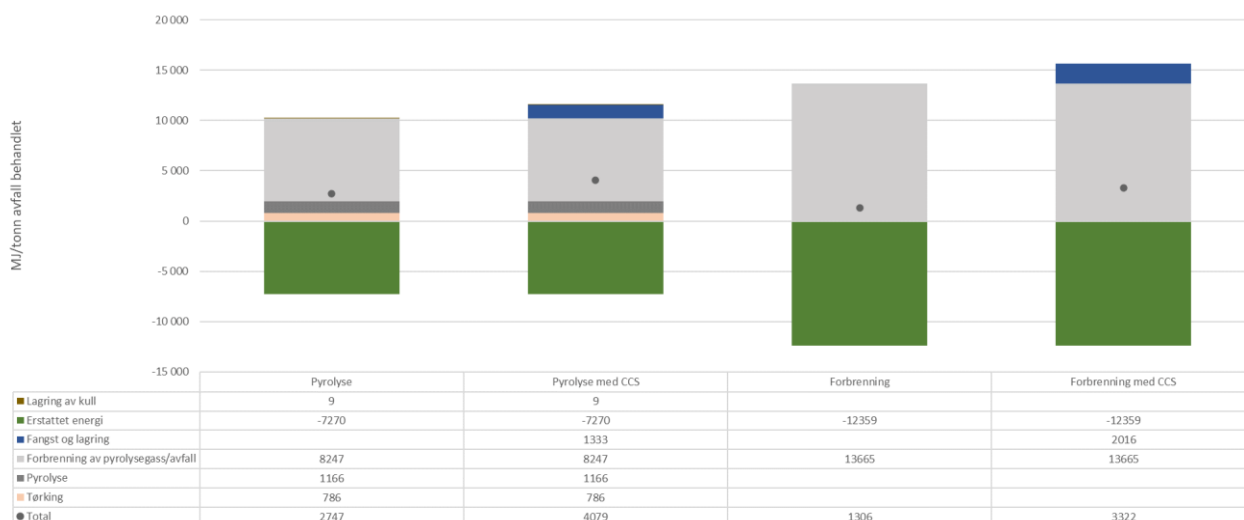


Figur 4 Resultater for beregning av mulige netto negative utslipp (nettoutslipp vist ved brun prikk) vist som kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall for pyrolyse (4 scenarier) og forbrenning (2 scenarier) for aktivitetene som inngår i beregningen (erstattet energi er ikke inkludert i systemgrensene).

Fra figuren sees at alle scenariene, bortsett forbrenning uten CCS, fører til netto negative utslipp. Årsaken til at forbrenningsalternativet uten CCS ikke bidrar til netto negative utslipp er at ingen utslipp fanges og lagres, og dermed når både de biogene og fossile CO₂-utslippene atmosfæren. De biogene CO₂-utslippene gir ingen netto bidrag (fordi de nøytraliseres av opptaket) mens de fossile utslippene gir bidrag. Pyrolysealternativet uten CCS medfører derimot netto negative utslipp i størrelsesorden -2 og -78 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall. Årsaken til at pyrolyse medfører netto negative utslipp selv uten CCS er at behandlingen av kullet i seg selv medfører lagring av karbon. Videre sees at dersom CCS inkluderes for pyrolysegassen, vil netto negative utslipp økes til henholdsvis -644 kg og -720 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall, avhengig av om kullet antas å være 80% eller 100% lagringsstabil. Forbrenning med CCS medfører et netto negativt utslipp på -678 kg CO₂-ekv per tonn behandlet restavfall.

3.2 Bruk av primærenergi for de vurderte alternativene

Figur 5 viser resultatene for bruk av primærenergi for de to hovedalternativene pyrolyse og avfallsforbrenning med tilhørende scenarier med og uten CCS. I kapittel 3.1 ble resultatene også vist for et ekstra scenario for pyrolyse som antar at alt karbon i kullet forutsettes å bli permanent lagret. Dette har ingen påvirkning på indikatoren bruk av primærenergi, og pyrolyseresultatene vises derfor kun for de to hovedscenarier i dette kapittelet: med og uten CCS. På samme måte som for klimapåvirkning, presenteres resultatene som positiv og negativ bruk av primærenergi for behandling av 1 tonn restavfall, fordelt på de ulike livsløpsfasene. Positiv primærenergi representerer bruk av energi mens negativ primærenergi representerer spart energi fra produksjon av elektrisitet som fortsettes erstattet av avfallsressursene. I tillegg er netto primærenergi, beregnet som summen av positiv og negativ klimapåvirkning, vist ved en brun prikk på figuren.



Figur 5 Resultater for primærenergi vist som MJ per tonn behandlet restavfall for pyrolyse (2 scenarier) og forbrenning (2 scenarier).

Figur 5 viser at pyrolyse og forbrenning uten CCS gir lavere primærenergibruk enn tilsvarende avfallsbehandling med CCS. Årsaken til dette er at fangst- og lagringsaktivitetene krever energi, en energibruk som ikke medfører redusert bruk av energi andre steder i verdikjeden (den bidrar 'kun' til redusert klimapåvirkning, som vist i Figur 3). I tillegg sees at forbrenningsalternativet medfører lavest netto primærenergi uavhengig av om CCS inkluderes. Dette kommer av at alt avfallet i forbrenningsalternativet går til energiutnyttelse og dermed erstatter elektrisitetsproduksjon. I pyrolysealternativet havner 34 % av karbonet i kullet, som lagres i jordsmonn, og dermed blir mindre av avfallets energipotensial utnyttet til energi med mulighet for å erstatte annen strømproduksjon. Dette medfører at bidraget til gevinst for primærenergibruk, som følge av at energien i avfallet erstatter produksjon av strøm, er størst for forbrenningsscenariet (-12 359 MJ vs -7 270 MJ per tonn behandlet restavfall for pyrolyse).

Når det gjelder byrder for primærenergibruk viser figuren at det største bidraget kommer fra forbrenning av pyrolysegass/avfall som følge av at avfallets energi brukes opp. For pyrolysealternativet kommer i tillegg et bidrag fra selve pyrolyseprosessen (1 166 MJ/tonn behandlet restavfall) som følge av elektrisitetsbruk. Det presiseres at det ikke er lagt inn bruk av støttebrensel for forbrenningsanlegget, noe som betyr at energibruken kan være noe underestimert her. Videre sees fra Figur 5 at begge behandlingsalternativene med CCS får en ekstra energibyrd fra fangst- og lagringsaktivitetene. Denne er på 1 333 MJ og 2 016 MJ per tonn behandlet restavfall for henholdsvis pyrolyse og forbrenning.

4 Konklusjon og videre arbeid

Det er viktig å påpeke at det er foretatt en rekke forutsetninger og forenklinger for gjennomføring av forstudien, og resultatene må vurderes i lys av dette.

Resultatene viser at pyrolyse av restavfall er en interessant behandlingsmåte sammenlignet med forbrenning med energiutnyttelse. For miljøpåvirkningskategorien klimapåvirkning kommer pyrolyse klart bedre ut enn forbrenning dersom CCS ikke inngår i noen av behandlingsalternativene. Dersom CCS derimot inngår i både pyrolyse- og forbrenningsalternativet, er rangeringen avhengig av hvor lagringsstabil kullet fra pyrolyseprosessen forutsettes å være. Forbrenningsalternativet gir et resultat som ligger mellom de to pyrolysescenariene som forutsetter henholdsvis 100 % og 80 % lagringsstabil kull.

Det er verdt å presisere at pyrolyse kan medføre netto negative CO₂-utslipp og dermed fjerning av CO₂ fra atmosfæren selv uten fangst og lagring av CO₂ fra forbrenning av pyrolysegasen.

Forbrenningsalternativet medfører lavest bruk av primærenergi uavhengig av om CCS inngår. For både forbrenning og pyrolyse øker energibruken ved implementering av CCS fordi både fangstteknologien og transport av fanget CO₂ til lagring krever energi.

Det ble gjennomført en workshop for diskusjon av resultatene og relevante problemstillinger for et eventuelt hovedprosjekt den 31.1.2024. Med bakgrunn i dette, anbefales det å jobbe videre med å etablere et FoU-hovedprosjekt for mer grundige bærekraftsanalyser for sammenligning av pyrolyse og avfallsforbrenning. Relevante utvidelser og problemstillinger for et hovedprosjekt er oppsummert til å være:

- Inkludere flere miljøpåvirkningskategorier
- Inkludere kostnader, eventuelt som en kost-/nytteanalyse
- Vurdere relevante forbehandlingsmetoder for restavfall før pyrolyse.
- Vurdere mulig bruksverdi for produsert kull, som for eksempel bruk som sorbent til PFAS-rensing og bruk i metallurgisk industri.
- Analysere eventuell utlekkingsrate for tungmetaller som oppkonsentreres i kullet.
- Analysere pyrolyse som en prosess for fjerning av miljøgifter i avfallet.
- Flere scenarier/alternativer for utnyttelse og bruk av pyrolyseproduktene, som f.eks syngass.
- Ulike energiutnyttelsesgrader og transportavstander avhengig av spesifikk lokalisering av relevant avfallsforbrennings- og pyrolyseanlegg.
- Inkludere mere nøyaktige data for anleggene, for eksempel ved å ta med eventuelt støttebrensel for forbrenningsanlegget.

Videreføring til et hovedprosjekt vil resultere i verdifull kunnskap for å definere avfallsbransjens strategiske veivalg for nye investeringer.

5 Referanser

- Azzi, E. S., Li, H., Cederlund, H., Karlton, E., & Sundberg, C. (2024). Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data. *Geoderma*, 441, 116761. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116761>
- Christensen, T. H., & Jacobsen, H. (1998). *Affaldets mængde og sammensætning*. Retrieved from Ingeniøren/Bøger, Ingeniøren AS, København:
- Hultin, J. W., & Bjørnerud, S. (2021). *Analyse av restavfall og kildesortert matavfall og detaljert matsvinnanalyse*. Retrieved from Vesar:
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>
- Nilsen, P. J. (2023). *Energiberegning pyrolyseprosess, oversendt på epost 29.06.2023*.
- NVE. (2020). Hvor kommer strømmen fra? Retrieved from <https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/hvor-kommer-stroemmen-fra/>
- Raadal, H. L., & Modahl, I. S. (2021). *Life Cycle Assessment of CCS (carbon capture and storage) and CCU (carbon capture and utilization)* (OR 28.21). Retrieved from Fredrikstad, Norway: <https://norsus.no/en/publikasjon/life-cycle-assessment-of-ccs-carbon-capture-and-storage-and-ccu-carbon-capture-and-utilization/>
- Sanei, H., Rudra, A., Przyzwitt, Z. M. M., Kousted, S., Sindlev, M. B., Zheng, X., . . . Petersen, H. I. (2024). Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, 281, 104409. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104409>
- Tanzer, S. E., & Ramírez, A. (2019). When are negative emissions negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 12(4), 1210-1218. doi:10.1039/C8EE03338B
- Veses, A., Sanahuja-Parejo, O., Callén, M. S., Murillo, R., & García, T. (2020). A combined two-stage process of pyrolysis and catalytic cracking of municipal solid waste for the production of syngas and solid refuse-derived fuels. *Waste Management*, 101, 171-179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.009>

Visjonen til NORSUS Norsk institutt for bærekraftsforskning AS, tidligere Østfoldforskning AS, er å bidra til bærekraftig samfunnsutvikling. Vi utvikler kunnskap og metoder for å forstå og implementere bærekraft bedre i samfunnet. Sammen med bedrifter og offentlige aktører kartlegger og reduserer vi miljøbelastninger, ofte med økonomisk gevinst. Slik bidrar vi til å bevege samfunnet i en bærekraftig retning.