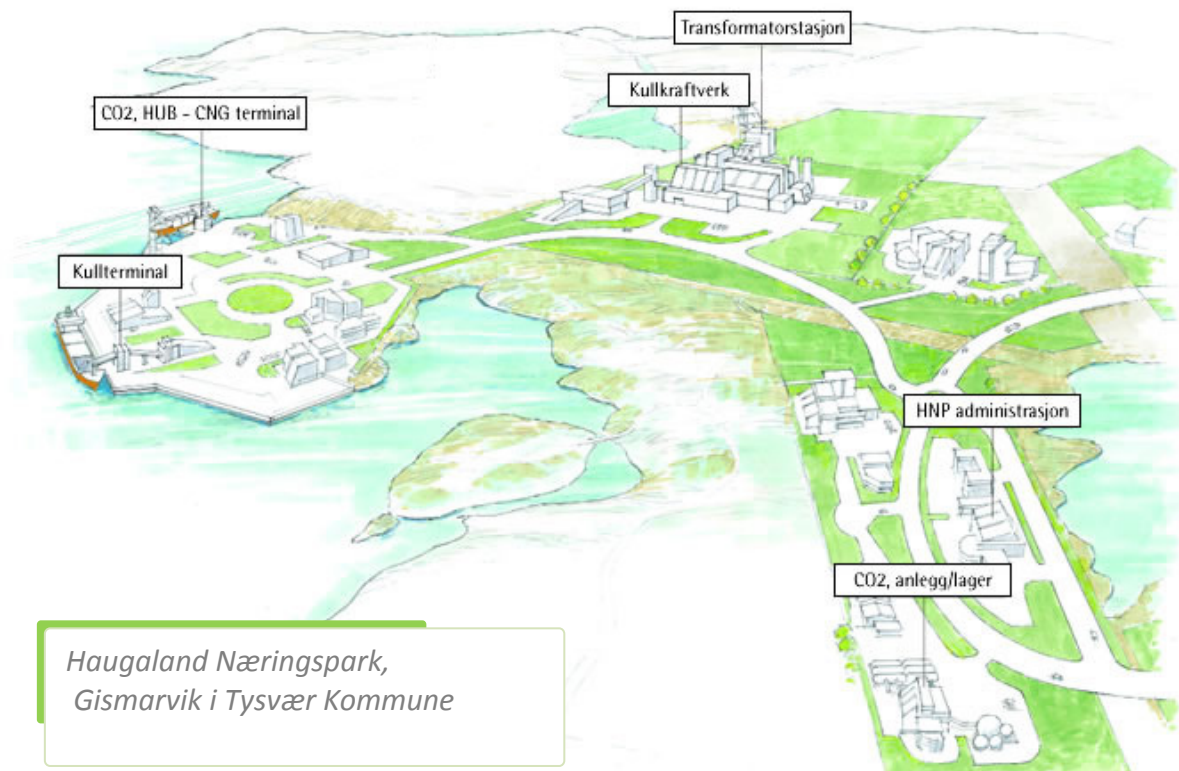




HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Innblanding av biomasse i kullkraftverk



Bacheloroppgave utført ved

Høgskolen Stord/Haugesund – Avd. Haugesund – Ingeniørfag

Studieretning: Maskin, Prosess- og energiteknikk

Av: Margareth Kongsvik Johansen

Kandidatnr. 49

Haugesund 2008

BACHELOROPPGAVE

Studentens navn: Margareth Kongsvik Johansen

Linje & studieretning: Maskin, Prosess og Energiteknikk

Oppgavens tittel: Innblanding av biomasse i kullkraftverk

Oppgavetekst:

Haugaland Kraft utreder muligheten for å etablere et kullkraftverk med CO₂-håndtering i Haugaland Næringspark i Tysvær. I den forbindelse skal en undersøke muligheten for innblanding av biomasse i kullkraftverket. Oppgaven skal gi en vurdering av teknologisk, praktisk og økonomisk gjennomførbarehet samt redegjør for påvirkning på miljøregnskapet.

Endelig oppgave gitt:

Innleveringsfrist: Fredag 2.mai 2008 kl. 12.00

Intern veileder: Jorunn S. Nysted – HSH

Ekstern veileder: Berit Thuestad – Haugaland Kraft

Godkjent av studieansvarlig:

Dato:



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Høgskolen Stord/Haugesund
Studie for ingeniørfag
Bjørnsonsgt. 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 52 70 26 00
Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel Innblanding av biomasse i kullkraftverk		Rapportnummer
Utført av Margareth Kongsvik Johansen		
Linje Maskin		Studieretning Prosess- og energiteknikk
Gradering Åpen	Innlevert 02.05.08	Veiledere Jorunn S. Nysted – HSH Berit Thuestad – Haugaland Kraft

Ekstrakt

I denne rapporten er det gjennomført en vurdering av teknologiske, praktiske og økonomiske temaer i forbindelse med innblanding av biomasse i et planlagt kullkraftverk med CO₂-håndtering i Haugaland Næringspark.

Det er gjennomført en overordnet litteraturstudie av de tre forskjellige hovedteknologiene med CO₂-rensing som er aktuelle for prosjektet. I denne sammenhengen er hver teknologis grad av modenhet av interesse for prosjektets tidsperspektiv.

De økonomiske beregningene som er gjennomført i denne oppgaven er gjort for å gi et sammenligningsgrunnlag for to tilfeller av innblanding av biomasse med et tilfelle uten bruk av biomasse.

I tillegg er temaer rundt tilgang, bearbeiding og innblanding av biomassen samt biomassens kjemiske egenskaper ved forbrenning tatt opp.

Forord

Bacheloroppgaven skal være en selvstendig oppgave som skal utgjøre den avsluttende delen av ingeniørutdanningen. Oppgaven skal være metode- og problembasert og formålet skal være å gi studentene mulighet til å benytte kunnskaper og ferdigheter fra flere fagområder[9]. Arbeidet med oppgaven strekker seg over et helt semester.

Hensikten med denne oppgaven er å få kartlagt den teknologiske, praktiske og økonomiske gjennomførbarheten ved å innblande biomasse i et planlagt kullkraftverk på Haugalandet. For å kunne gjøre overordnede vurderinger vil det være nødvendig å få en grunnleggende forståelse av det teknologiske bak et kullkraftverk for videre å kunne forstå hvilke innvirkninger biomassen vil ha på det rent tekniske. Den påvirkningen innblandingen av biomasse vil ha på miljøregnskapet rundt kullkraftverket er også et tema som vil bli gjennomgått i denne oppgaven. I den forbindelse er CO₂-utslipp av spesiell interesse, men andre uønskede biprodukter må også vurderes.

I tillegg må en sette seg inn i problemstillinger som relaterer seg til biomassens tilgang og sammensetning. Dette er viktige temaer når det skal foretas en vurdering om prosjektet skal videreføres.

De økonomiske betraktningene i oppgaven er foretatt på et helt overordnet plan for å gi et enkelt sammenligningsgrunnlag rundt de faktorene som kan oppstå ved innblanding av biomasse.

Oppgaven er laget som en gjennomførbarhetsstudie, det vil si at temaene er gjennomgått på et overordnet nivå ved hjelp av litteraturstudie og de påfølgende betraktningene er gjort rundt utfordringer og muligheter som kan oppstå.

Jeg vil gjerne takke mine veiledere Jorunn S. Nysted og Berit Thuestad for god oppfølging og veiledning gjennom hele oppgaven.

Haugesund, 02. mai 2008

Margareth Kongsvik Johansen

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Innholdsfortegnelse	ii
Sammendrag	iv
1 Innledning.....	1
1.1 Haugaland Næringspark	1
1.2 Bakgrunn og formål for kullkraftverket.....	1
1.3 Problemstilling og målsetting.....	1
1.4 Begrensning av oppgaven.....	1
1.5 Oppbygging av oppgaven	2
2 Kullkraftteknologi	3
2.1 PCC – Pulverized Coal Combustion.....	3
2.1.1 Teknologi	3
2.1.2 CO ₂ -renseteknologi	3
2.1.3 Modenhet.....	5
2.2 IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle	5
2.2.1 Teknologi	5
2.2.2 CO ₂ -renseteknologi	6
2.2.3 Modenhet.....	7
2.3 Oxyfuel.....	7
2.3.1 Teknologi	8
2.3.2 Modenhet.....	9
2.4 Virkningsgrader.....	9
3 Bruk av kull og biomasse	11
3.1 Kull	11
3.1.1 Generelt.....	11
3.1.2 Forbrenning av kull.....	12
3.2 Biomasse.....	12
3.2.1 Generelt.....	12
3.2.2 Forbrenning av biomasse	13



3.3	Forskjellen mellom kull og biomasse.....	13
3.3.1	Forskjell i brennverdi.....	14
3.3.2	Forskjell i pris.....	14
3.4	Innblanding av biomasse i kullkraftverk.....	15
3.4.1	Generelt.....	15
3.4.2	Innblandingsmetoder.....	16
3.4.3	Forbehandling av biomassen.....	16
3.4.4	Forbrenningsprosessen.....	17
3.4.5	Biomassens kjemiske egenskaper ved forbrenning.....	17
3.4.6	Bruk av biomasse i nevnte kullkraftteknologier.....	18
3.5	Tilgang på biomasse.....	18
4	Resultater.....	19
4.1	Økonomi.....	19
4.1.1	Generelt.....	19
4.1.2	CO ₂ -kvoter.....	19
4.1.3	Økonomiske beregninger.....	19
4.2	Miljø.....	21
4.2.1	Biomassens innvirkning på miljøregnskapet.....	21
4.2.2	CO ₂ -verdikjede.....	22
5	Diskusjon og konklusjon.....	23
5.1	Diskusjon.....	23
5.2	Konklusjon.....	24
	Kilder.....	26



Sammendrag

I denne oppgaven blir teknologiske, praktiske og økonomiske temaer rundt innblanding av biomasse i et kullkraftverk planlagt i Haugaland Næringspark gjennomgått. Selve målsettingen med oppgaven er å belyse enkelte temaer som kan ha en innvirkning på senere gjennomføring av prosjektet.

Innledningsvis er det en gjennomgang av de tre aktuelle hovedteknologiene med CO₂-rensing for kullkraftverket. De forskjellige teknologienes grad av modenhet er viktig med tanke på tidsperspektivet til et slik prosjekt. Et anlegg med PCC (Pulverized Coal Combustion) teknologi vil kunne gjennomføres på kort sikt mens oxyfuel anses for å være for umoden. IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) er en teknologi som viser seg å være interessant i dette tilfellet spesielt med tanke på brenselfleksibiliteten, men teknologien finnes foreløpig bare på demonstrasjonsnivå og må derfor vurderes mot tidsperspektivet gitt senere i prosjektet.

Resultater av beregninger viser at prisen på biomasse er mer enn dobbelt så dyrt som for kull. Til tross for dette viser de økonomiske beregningene at enhetskostnadene mellom to tilfeller av innblanding av biomasse (henholdsvis 5 % og 15 %) og et tilfelle uten bruk av biomasse ikke er så forskjellig som først antatt. En avgjørende faktor i denne sammenhengen er CO₂-kvoteprisen som forbrenning av fossilt brensel er pålagt. I konklusjonen fremgår det at prisforskjellen mellom kull og biomasse ikke kan være avgjørende for om prosjektet skal gjennomføres.

I tillegg blir temaer rundt tilgang, bearbeiding og innblanding av biomassen samt biomassens kjemiske egenskaper ved forbrenning tatt opp.

1 Innledning

1.1 Haugaland Næringspark

”Haugaland Næringspark er et 5 000 dekar stort område regulert for industri og næringsformål. Området ligger på Gismarvik i Tysvær kommune og er godt lokalisert i forhold til naturgassrørledningene og elektrisitetsnettet i regionen.” (...) ”Dette gir særs gode logistikkforhold for industri/næring med kunder på kontinentet. Når det moderne kaianlegget i Førdesfjorden står ferdig vil Haugaland Næringspark fremstå som et av landets beste etableringssteder for energikrevende industri og industri som benytter naturgass som råstoff eller energi.” [10]

1.2 Bakgrunn og formål for kullkraftverket

Bakgrunnen for utredningen av et kullkraftverk på Haugalandet var behovet for en stor, stabil kraftproduserende enhet for å løse den underskuddsituasjonen en er i når det gjelder energi- og effektbalansen generelt i Norge. Både gass- og kullkraftverk ble i denne forbindelsen vurdert, men på grunn av prisnivået på gass ble det alternativet tidlig eliminert. Dermed ble det gjennomført en mulighetsstudie hvor tekniske, økonomiske og miljømessige perspektiver ved gjennomføring av et kullkraftverk ble vurdert. Resultatet av denne mulighetsstudien var en anbefaling om videreføring av prosjektet[3].

1.3 Problemstilling og målsetting

Den 15.2.2007 sendte Haugaland Kraft en forhåndsmelding til Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) om planlegging av et kullkraftverk på Haugalandet. På bakgrunn av dette utformet NVE et utredningsprogram for Haugaland Kraft. Under et av utredningspunktene i denne rapporten står det:

”... eventuelt også muligheter for delvis bruk av andre brensler.”[11]

Dette utredningspunktet er utgangspunktet for denne oppgaven. Målet med oppgaven vil være å gi en vurdering av om det vil være mulig å innblande biomasse i et kullkraftverk som planlegges i Haugaland Næringspark.

1.4 Begrensning av oppgaven

Et kullkraftverk vil av mange ulike årsaker være omstridt, spesielt med tanke på den miljøpåvirkningen som bruk av fossilt brensel har. Det vil av den grunn være en forutsetning for hele prosjektet at det blir gjennomført med rensing av karbondioksid (CO₂). Mulige teknologier for CO₂-rensing vil dermed også bli gjennomgått selv om det ikke har noen direkte innvirkning på oppgaven.



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND



I Haugaland Kraft sin forhåndsmelding til NVE ble det skissert to mulige lokasjoner for kullkraftverket. I denne oppgaven blir det forutsatt at lokasjonen er i Haugaland Næringspark på Gismarvik i Tysvær.

Det er viktig å presisere at alle kostnader og økonomiske beregninger fremsatt her er estimater som bare skal brukes i denne rapporten. Haugaland Kraft sitt kullkraftprosjekt er tidlig i etableringsfasen og det er sikkert at prisbildet for blant annet investeringskostnader og brensel vil endre seg i fremtiden.

1.5 Oppbygging av oppgaven

Oppgaven er delt opp i følgende fire deler:

- **Kullkraftteknologi**
Her vil en få en overordnet gjennomgang av kullkraftteknologier med forskjellig grad av modenhet. Prinsippene for CO₂-rensing for hver teknologi vil også kort bli beskrevet.
- **Bruk av kull og biomasse**
Her vil en få en oversikt over noen av kull og biomasse sine egenskaper hver for seg. Så vil en se på hva som er forskjellen mellom kull og biomasse før en får en gjennomgang av aktuelle temaer rundt innblanding av biomassen i et kullkraftverk.
- **Resultater**
Her vil en få en presentasjon av enkle økonomiske betraktninger for sammenligning av et tilfelle uten innblanding av biomasse med to tilfeller av innblanding. I tillegg vil en få en vurdering av hvilken innvirkning innblanding av biomasse vil ha på et miljøregnskap.
- **Diskusjon og konklusjon**
Her vil forskjellige temaer fra de foregående kapitlene bli vurdert/diskutert. Til slutt vil det trekkes noen konklusjoner.

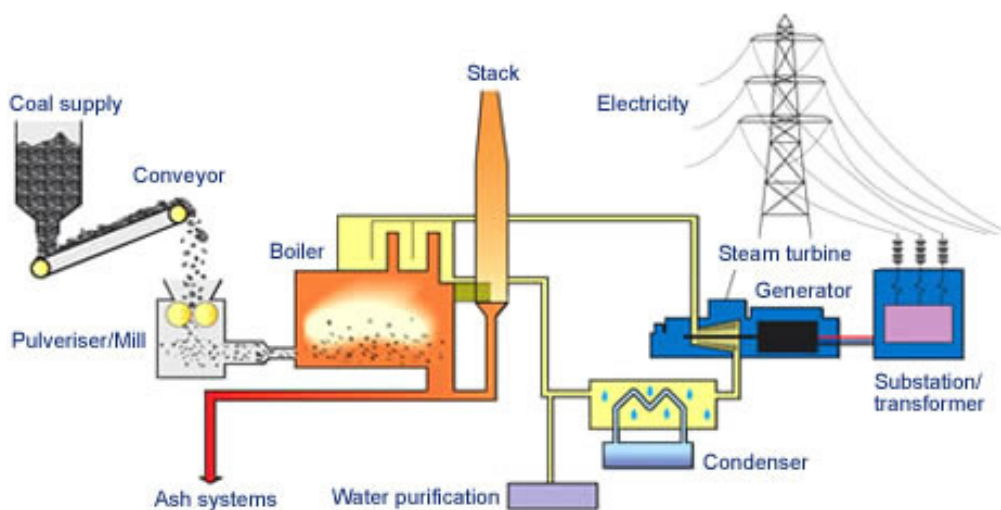
2 Kullkraftteknologi

I dette kapitlet vil en få en gjennomgang av de tre hovedteknologiene for kullkraftverk som er tilgjengelig. Disse ulike teknologiene gir også ulike muligheter for rensing av CO₂ som det vil bli redegjort for under hver hovedteknologi. I tillegg vil en også kort se på modenhet for både teknologi og renseteknologi. Grad av modenhet deles her inn i moden – kommersielt tilgjengelig og ikke moden – ikke kommersielt tilgjengelig. Til slutt vil det være en kort fremstilling av virkningsgrad for de omtalte teknologiene.

2.1 PCC – Pulverized Coal Combustion

Det finnes mange underkategorier av PCC når det gjelder forbrenningsprosessen, men de overordnede prinsippene er de samme.

2.1.1 Teknologi

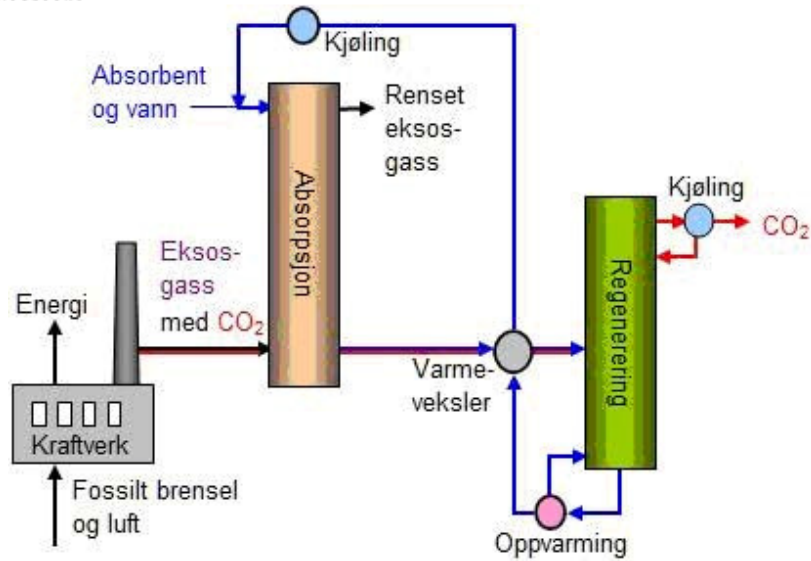


Figur 1: Prinsippskisse PCC, Kilde: [31]

Kullet blir først knust til fint pulver. Dette øker overflatearealet slik at forbrenningen blir mer effektiv. Deretter blir kullet ført inn i forbrenningskammeret sammen med luft. Alt etter kullets kvalitet vil forbrenningstemperaturen ligge mellom 1300-1700°C[8]. Aske blir dannet under forbrenningen og tas ut i bunn av kammeret. Røygassen som kommer ut fra kjelen vil bli rensed for partikler og giftige gasser før den blir sluppet ut i atmosfæren. Teknologien til selve kraftverket baserer seg på en Rankine sirkelprosess hvor varmeenergien fra forbrenningen av kullet fordamer vannet i kjelen. Den produserte høytrykksdampen blir ført videre til turbinen hvor den termiske energien i dampen blir omgjort til rotasjonsenergi for turbinen. I enden av turbinen er det en generator som omdanner rotasjonsenergien til elektrisk energi. Etter at dampen har passert gjennom turbinen blir den kondensert og ført tilbake til kjelen for gjenbruk.

2.1.2 CO₂-renseteknologi

Teknologien for rensing av CO₂ for denne typen kullkraftverk vil være post-combustion.



Figur 2: Post-combustion, Kilde: [13]

Post-combustion prosessen foregår i en absorpsjonskolonne hvor røykgass og vann med ren absorbent strømmer inn. I denne sammenhengen er absorbenten en kjemisk forbindelse som har stor evne til å binde til seg CO_2 . Typiske absorbenter er aminer og karbonater. Inni absorpsjonskolonnen er det god kontakt mellom røykgassen og absorbenten. Dette gjør at CO_2 blir overført fra røykgassen til absorbenten. Ut av absorpsjonskolonnen har en da to strømmer. Den ene er en gasstrøm med rensed eksos som slippes ut i toppen av kolonnen, den andre en væskestrøm med vann, absorbent og CO_2 som tas ut i bunn av kolonnen. Væskestrømmen går videre til en regenereringskolonne. Her blir væsken oppvarmet slik at absorbentens evne til å holde på CO_2 reduseres. En får da en gasstrøm med høyt CO_2 innhold som stiger opp og tas ut av kolonnen. CO_2 kan da sendes videre til deponering, mens absorbenten synker ned. Den er da blitt regenerert og kan brukes på nytt. På grunn av temperaturforskjellen mellom absorpsjonskolonnen og regenereringskolonnen kreves det tilførsel av energi, dette gjør at virkningsgraden til kraftverket vil bli noe redusert. Selve kraftverket skal i liten grad påvirkes av aminanlegget. Dette vil gi en mindre økonomisk risiko for driftstans i produksjonsanlegget hvis det oppstår driftstans i renseanlegget.

Ved denne typen rensing vil typisk 80-90 % av CO_2 i røykgassen bli fjernet[13].

Denne metoden å fange CO_2 på er relativ enkel teknologisk, men den er kostbar. Det medfører høye kapitalkostnader å installere et absorpsjonsanlegg, som krever et stort areal, for å prosessere et stort volum røykgass med lavt innhold av CO_2 (10-14 %)[14]. Teknologien er energiintensiv på grunn av regenerering av absorbent. Dette vil medføre store driftsutgifter og påfølgende reduksjon av virkningsgrad. En vil også få noe utslipp av absorbentrester og forbindelser fra nedbrutt absorbent i røykgassen[12]. Fordelen med denne metoden er at den kan tilpasses til eksisterende kraftverk uten modifikasjoner av det opprinnelige anlegget.

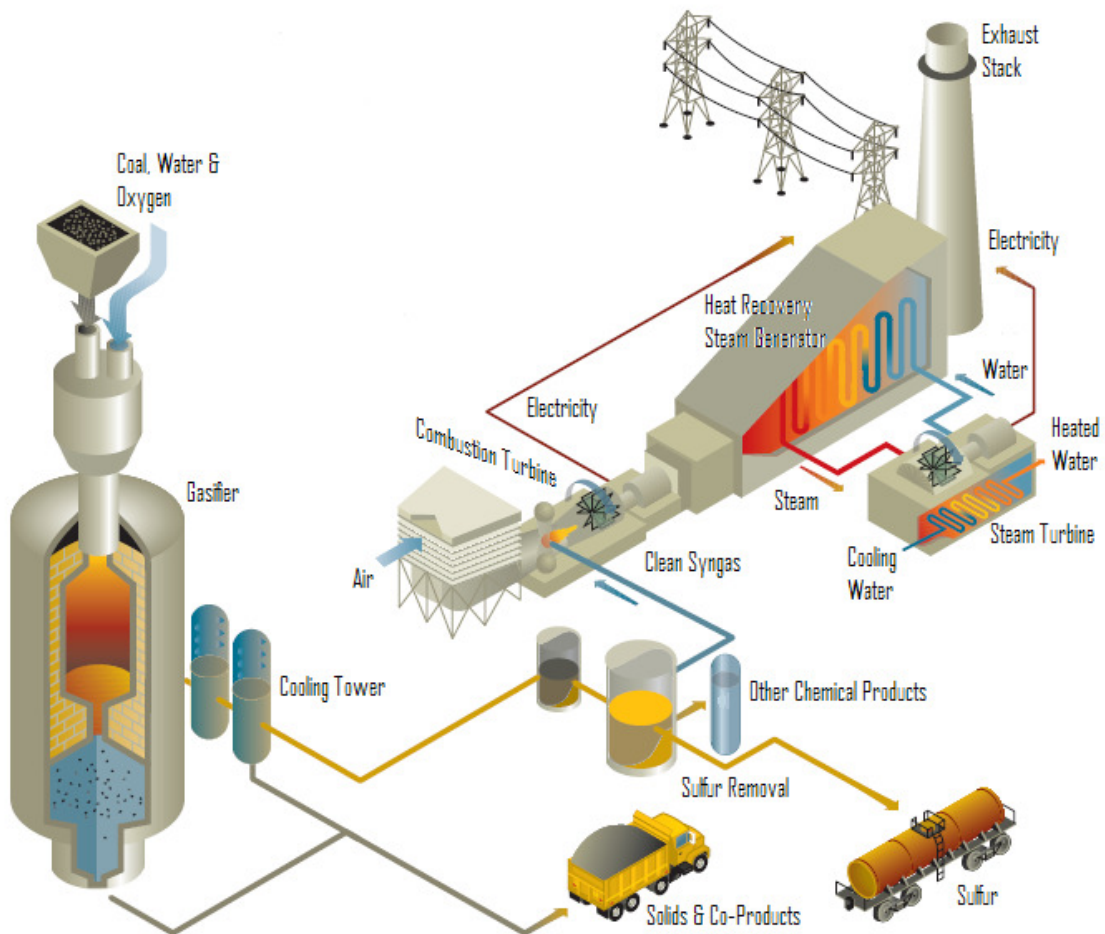
2.1.3 Modenhet

PCC er den mest konvensjonelle måten å forbrenne kull på. Teknologien regnes som velkjent og moden. Over 90 % [8] av verdens kullkraftverk baserer seg på denne teknologien og de fleste enhetene er på over 300 MW[2].

Absorpsjon av CO₂ med aminer er en velkjent og moden teknologi som har blitt brukt i mange år til produksjon av CO₂ til for eksempel EOR (økt oljeutvinning) og næringsmiddelformål, men er ennå ikke utprøvd som fullskala renseanlegg.

2.2 IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle

Denne teknologien integrerer tre allerede kjente teknologier: bruk av dampturbin, gassturbin og gassifisering.

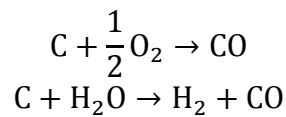


Figur 3:Prinsippkisse IGCC, Kilde:[32], redigert

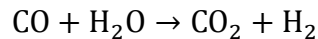
2.2.1 Teknologi

Gassifiseringen foregår i en kjele hvor kull, luft eller oksygen og damp blir tilsatt i en kontrollert blanding. Ved hjelp av høy temperatur, høyt trykk og den kontrollerte mengden luft eller oksygen bli kullet delvis oksidert til en brennbar syntetisk gass kalt syngass. Dette

skjer ved at molekylene i kullet blir brutt og en får kjemiske reaksjoner som danner syngassen. Syngassen består hovedsakelig av karbonmonoksid (CO) og hydrogen (H₂).



Syngassen gjennomgår så en vannskiftereaksjon hvor karbonmonoksidet reagerer med mer vanddamp slik at en får mer hydrogen og karbondioksid (CO₂).

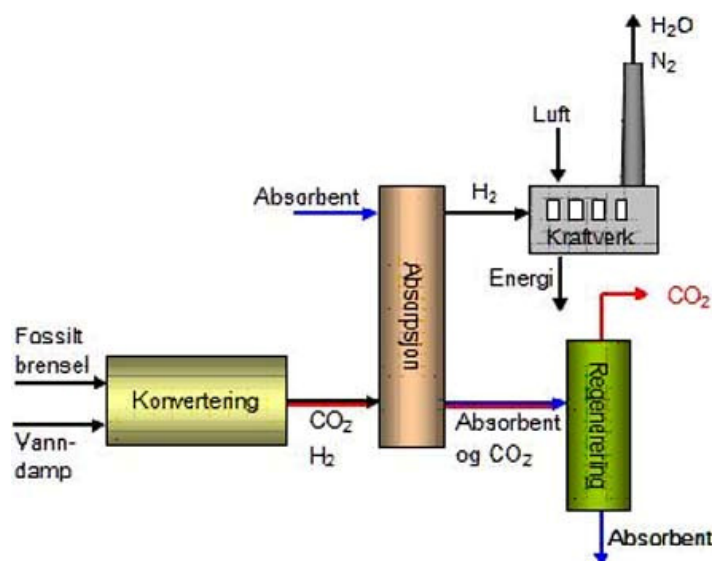


Urenheter i brenselet blir skilt ut og kommer ut i bunn av kjelen. Svovel blir konvertert til hydrogensulfid (H₂S) og kabonylsulfid (H₃S) i gassifiseringsprosessen. Nitrogenoksider (NO_x) blir ikke dannet, i stede får en ammoniakk (NH₃). Videre blir syngassen nedkjølt og renses for urenheter og andre organiske småpartikler slik at den er klar for gassturbinen. I gassturbinen blir syngassen forbrent sammen med komprimert luft i forbrenningskammeret. De varme avgassene etter forbrenningen driver turbinen som igjen driver en elektrisk generator. Varm damp generert fra varmeveksling med avgassene fra gassturbinen driver dampturbinen som produserer mer elektrisk energi. Dette kalles en kombinert syklus. Typisk vil 65 % av den produserte elektriske energien komme fra gassturbinen, mens de resterende 35 % kommer fra dampturbinen[17].

En av fordelene med IGCC er produktfleksibiliteten. Teknologien kan ikke bare brukes til kraftproduksjon, men også til for eksempel produksjon av hydrogen. Hydrogen anses som en viktig brikke i forsøket på å gjøre transportsektoren klimanøytral. Rent hydrogen har også flere andre industrielle bruksområder.

2.2.2 CO₂-renseteknologi

CO₂-renseteknologien for denne typen kullkraftverk vil være pre-combustion.



Figur 4: Pre-combustion, Kilde: [13]

Pre-combustion baserer seg på at CO₂ blir fanget fra syngassen før den blir forbrent. Syngassen vil, etter utskilling av CO₂, inneholde nesten bare hydrogen. Forbrenningen av hydrogenet i gassturbinen gir da ingen CO₂, bare vanndamp. Selve utskillingen av CO₂ kan gjøres etter samme metode som for post-combustion, men dette vil kreve et mindre anlegg siden konsentrasjonen av CO₂ i syngassen er høyere enn det den er i røykgassen ved PCC. Konsentrasjonen av CO₂ i syngassen vil være rundt 50 % [28]. Hvis oksygen brukes i stede for luft som oksidant vil konsentrasjonen av CO₂ være noe høyere. Etter utskilling er karbondioksidet ved høyt trykk, dette gjør at den ikke trenger kompresjon før videre frakt.

Ved denne typen rensing vil ca 90 % CO₂ fanges opp[13].

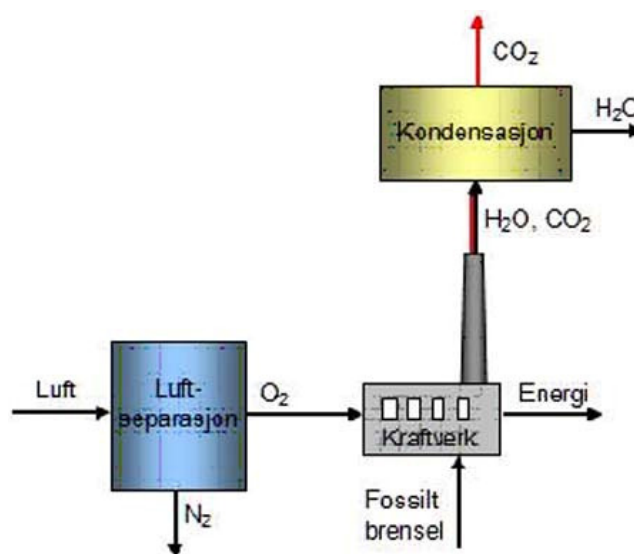
2.2.3 Modenhet

Gassifiseringsteknologien som ligger bak IGCC er velkjent og tilgjengelig, den brukes i dag til blant annet produksjon av kunstgjødsel. Utfordringen har vært å få til en stabil og pålitelig drift av gassifiseringsprosessen sammen med kraftverket[5]. Selve IGCC-teknologien er relativt ny og finnes på demonstrasjonsnivå. Det finnes i dag fire IGCC-anlegg i verden.

Bruk av kjemisk absorpsjon ved hjelp av amin er, som nevnt under avsnitt 2.1.3, en velkjent og kommersielt tilgjengelig teknologi som enda ikke er utprøvd med fullskala rensing. Andre typer renseteknologi, som bruk av faste absorbenter og membraner regnes som umodne og brukes i dag ikke til kommersielle formål. IGCC-teknologien med pre-combustion CO₂-fangst vil bli aktuelt for nye kraftverk etter hvert som den teknologiske utviklingen vil redusere investerings- og driftskostnader[13]. Krav om CO₂-rensing kan også være med på å gjøre denne typen kraftverk mer lønnsomme.

2.3 Oxyfuel

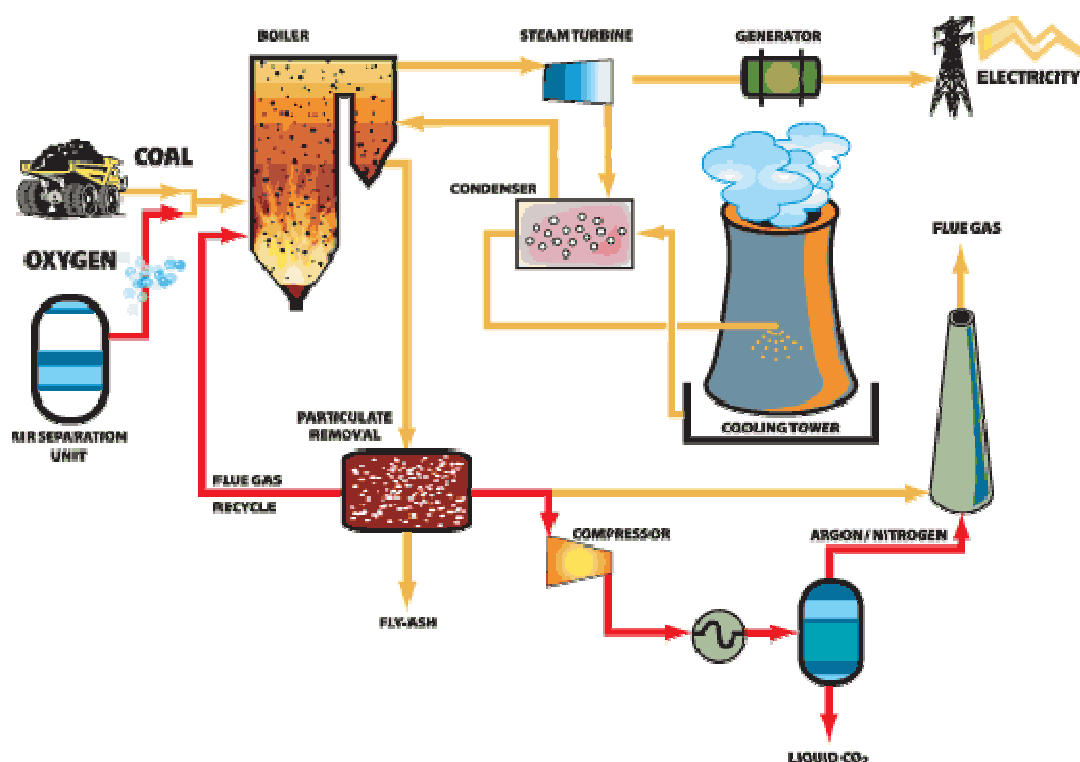
Oxyfuelprosessen består ikke av to separate prosesser, en for forbrenning og en for rensing, men er en teknologi som har som hovedformål å skape en tilnærmet ren strøm av CO₂ som kan brukes videre i en CO₂-verdikjede (se avsnitt 4.2.2).



Figur 5: Oxyfuel, Kilde: [13]

2.3.1 Teknologi

Konvensjonell kullforbrenning foregår med tilførsel av luft som hovedsakelig består av nitrogen og oksygen. Dette resulterer i utslipp av blant annet karbondioksid (CO_2) og nitrogenoksider (NO_x). Prinsippet bak oxyfuelprosessen er å fjerne nitrogenet fra forbrenningslufta slik at forbrenningen av kull skjer med tilnærmet ren oksygen. Etter forbrenning har en da produsert en røykgass som stort sett består av CO_2 og vandamp. Å rense røykgassen for CO_2 blir da enkelt. En kjøler ned røykgassen slik at vandampen kondenserer (går over til væskeform), mens CO_2 forblir i gassform. Siden nitrogenet i lufta er fjernet skal selve forbrenningen ikke gi NO_x -utslipp, men på grunn av små mengder nitrogen i brenselet vil en i praksis få noe NO_x -dannelse. Teknologien for resten av kraftverket blir som for konvensjonell PCC (Rankine sirkelprosess).



Figur 6: Prinsippsskisse for oxyfuel, Kilde: [16]

Når en forbrenner med ren oksygen vil flammtemperaturer i forbrenningskammeret bli veldig høy. Årsaken til dette er at det meste av oksygenet blir brukt i forbrenningsprosessen og dermed er det lite oksygen som inertgass til stede som kan redusere temperaturutviklingen. For å unngå dette blir deler av røykgassen, som hovedsakelig består av CO_2 , resirkulert og ført inn i forbrenningskammeret igjen. Resirkulering av røykgassen gjør at flammtemperaturer blir redusert, dette fører blant annet til redusert NO_x -dannelse. Etter at røykgassen er renset for komponenter som vandamp, inerte gasser og svoveloksider (SO_x) ved bruk av kondensering, skrubbing og fase-separasjon er det mulig å oppnå en CO_2 konsentrasjon på over 90 % [18]. Når karbondioksidet så er komprimert er den klar for transport og lagring.

Oxyfuelteknologien gjør at en slipper den kostbare og energiintensive teknologien for rensing av selve røykgassen siden separasjon av CO₂ fra røykgassen er enkelt og lite energikrevende. I tillegg er utslippsnivået lavt, men separering av luft er veldig energikrevende og medfører en betraktelig nedgang i virkningsgraden.

Hvis det er mulig å finne industrielle bruksområder for de store mengdene nitrogen som er igjen etter luftseparasjonen kan det være med på å forbedre økonomien til oxyfuelprosessen.

2.3.2 Modenhet

Oxyfuelteknologien er fremdeles tidlig i utviklingen og det finnes ingen kommersielle fullskala anlegg. Diverse kilder spår at teknologien først vil være kommersielt tilgjengelig rundt 2020[33]. Forståelsen for oxyfuelteknologien har først og fremst blitt etablert gjennom pilotprosjekter.

Teknologien som er tilgjengelig i dag for produksjon av rent oksygen baserer seg på kryogenisk separasjon av luft, det vil si at luften kjøles ned til rundt den kritiske temperaturen for oksygen slik at nitrogen og argon skilles ut. Denne måten å separere luft på er velkjent, men den er både dyr og energikrevende. Det forsøkes på å utvikle membraner som kan separere oksygen fra luft mer effektivt og det regnes som en nødvendighet med nye teknologier for luftseparasjon for å kunne redusere energiforbruket og dermed gjøre oxyfuel til et ettertraktet alternativ.

2.4 Virkningsgrader

PCC med post-combustion rensing gir en relativt høy virkningsgrad sammenlignet med andre konsepter som kan gjennomføres på kort sikt. Som nevnt tidligere er dette i dag den dominerende teknologien. Det forventes at CO₂-fangst vil redusere virkningsgraden med 5-10 % [3].

Gassifisering av kullet for IGCC skjer ved høy temperatur og høyt trykk og krever dermed mye energi. Dette medfører en reduksjon i virkningsgraden. Samtidig vil den kombinerte prosessen med bruk av en gassturbin i tillegg til en dampturbin øke virkningsgraden til kullkraftverket og gi en virkningsgrad som er høyere enn for PCC. I tillegg er CO₂-rensing mindre energikrevende for IGCC.

Virkningsgraden til et kullkraftverk som baserer seg på oxyfuelteknologien vil i prinsippet kunne være høyere enn konvensjonelle kullkraftverk, men separering av luft er så energikrevende at det vil medføre en betraktelig nedgang i virkningsgraden (6-7 %)[3]. Dette gjør at virkningsgraden før CO₂-fangst er lavere enn for de to andre teknologiene. På grunn av den lite energikrevende CO₂-rensingen vil denne typen anlegg allikevel kunne konkurrere med PCC og IGCC når den blir moden.

Tabellen nedenfor viser en sammensetning av virkningsgradene. Dette er referanseverdier som kun skal gi et bilde av forskjellen mellom de ulike teknologiene:



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Teknologi	Virkningsgrad uten CO ₂ -rensing(%)	Virkningsgrad med CO ₂ -rensing(%)
PCC	40-47	35-40
IGCC	45-50	40-45
Oxyfuel	36-38	34-36

Tabell 1: Virkningsgrader



3 Bruk av kull og biomasse

I dette kapitlet vil en få en oversikt over noen av de viktigste egenskapene til kull og biomasse slik at de to typene brensel kan sammenlignes. Videre blir viktige temaer som kan oppstå ved innblanding av biomasse i et kullkraftverk gjennomgått.

3.1 Kull

3.1.1 Generelt

Kull er dannet av død biomasse (fortrinnsvis trær) som har blitt dekket av andre sedimenter. Dette har forhindret forråtnelse og nedbryting. I stede har biomassen blitt utsatt for høy temperatur og høyt trykk over lang tid (ca 300 millioner år[36]) slik at store deler vann, hydrogen og nitrogen er blitt fjernet og man sitter igjen med kull som er rikt på karbon. Selv om hovedbestanddelen i kull er karbon vil det også inneholde mindre deler hydrogen, oksygen, nitrogen, svovel og sporstoffer av tungmetaller som kvikksølv. Kull klassifiseres etter innhold av karbon og fuktighet og deles inn i følgende tre typer: [7]

- Brunkull (lignitt)
Karboninnholdet er 55-70 % og brennverdien er 3.500 til 4.500 kcal/kg. Brunkull har lav kullkvalitet og avgir mer forurensing ved forbrenning enn de mer høyverdige kullsortene. Det blir også mye aske ved forbrenning.
- Steinkull
Har et høyere karboninnhold (70-85 %) og mindre fuktighet. Brennverdien ligger mellom 5.700 og 8.600 kcal/kg. Steinkullene deles i to kategorier, subbituminøst og bituminøst kull, hvor bituminøst er den mest høyverdige kategorien. Subbituminøst kull har egenskaper som er en mellomting mellom brunkull og bituminøst kull.
- Antrasitt
Har mer enn 90 % karbon. Dette er den eldste typen kull og har høyest brennverdi (8600 kcal/kg).

På grunn av at kull er blitt dannet under meget høyt trykk og høye temperaturer inneholder denne energiresursen langt mer kjemisk energi per vekt- og volumenhet enn den biomassen det opprinnelig ble dannet fra.

Fordelen med kull er at det fremdeles finnes store kullreserver. Med dagens utvinningstakt tilsvarer påviste utvinnbare reserver 220-230 år med kull[19]. Hvis en sammenligner kull med andre energikilder, som for eksempel olje og naturgass, er kull både billig og lett tilgjengelig for de fleste land.



3.1.2 Forbrenning av kull

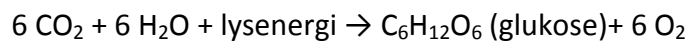
Forbrenning av kull gir utslipp av nitrogenoksider (NO_x), svoveloksider (SO_x), karbondioksid (CO₂), vandamp, småpartikler, svevestøv, tungmetaller (for eksempel kvikksølv) og sporstoffer.

3.2 Biomasse

Biomasse brukes her som et samlebegrep på organisk materiale som kan brukes til energiformål.

3.2.1 Generelt

Biomasse blir dannet ved at planter og trær utnytter energien fra sollyset gjennom fotosyntesen ved å produsere plantemateriale fra vann og CO₂ absorbert fra atmosfæren. En forenklet, balansert reaksjonslikning for fotosyntesen ser slik ut:



Biomassen består av karbon, hydrogen og oksygen. I tillegg vil de fleste typer biomasse også inneholde mindre deler nitrogen, fosfor, kalium, silisium og svovel. Sporstoffer av tungmetaller, som for eksempel kvikksølv, kan også forekomme. Noen typer biomasse inneholder også klor.

Karbonet fra biomassen blir ført tilbake til atmosfæren enten som CO₂ eller metan (CH₄) ved nedbryting av mikroorganismer eller som CO₂ ved forbrenning. Det er dette som kalles karbonkretsløpet.

Biomasse for energiformål kan være forskjellige materialer delt i fem kategorier:

- Trevirke
- Energiavling (avling med høyt utbytte som blir dyrket for energiformål)
- Landbruksavfall
- Matavfall (privat og fra industri)
- Industrielt avfall og biprodukter

Kategorien energiavling krever store landbruksarealer for å kunne levere stabilt store mengder biomasse til kraftverket. Dette er ikke tilgjengelig i distriktet. Det er heller ikke store nok landbruksenheter som kan levere avfall til kraftverket. Forbrenning av avfall (matavfall og fra industrien) er underlagt egne regler. Forutsetter dermed videre at en ser på kategorien trevirke.

Trevirket kan komme direkte fra skogbruk hvor det bli hogget for energiformål eller det kan være biprodukter fra for eksempel treforedlingsindustrien. I tillegg kan det også være utsortert avfall fra renovasjonsbedrifter. Trevirket kan leveres uforedlet som ved eller flis.

3.2.2 Forbrenning av biomasse

Forbrenning av biomasse vil gi mange av de samme utslippene som forbrenning av fossilt brensel. Mange av bestanddelene i kull og biomasse er de samme, men mengdene i hver brenseltype vil variere, eksempel på dette er innhold av blant annet nitrogen og svovel. Sammenligner en forbrenning av ved og kull på energibasis produseres det like mye CO₂:

Brensel	Brennverdi [GJ/t]	Avgitt CO ₂ [kg/GJ]
Kull	~ 30	~ 80
Ved	~ 15	~ 80

Verdiene i tabellen er omtrentlige siden både kull og biomasse kan ha forskjellig brennverdi og forskjellig innhold av karbon, alt etter type.

Tabell 2: Brennverdi og CO₂-forurensing, Kilde:[2]

GJ/t er det samme som MJ/kg og 80 kg/GJ er det samme som 0,08 kg/MJ.

$$\text{For kull: } 30 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 0,08 \frac{\text{kg}}{\text{MJ}} = 2,4 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg kull}}$$

$$\text{For ved: } 15 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 0,08 \frac{\text{kg}}{\text{MJ}} = 1,2 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg ved}}$$

Det vil si at forbrenning av 1 kg kull gir 2,4 kg CO₂ mens det blir produsert 30 MJ varme og forbrenning av 1 kg ved gir 1,2 kg CO₂ mens det blir produsert 15 MJ varme. Ved produksjon av 30 MJ varme må en forbrenne 2 kg ved og avgitt CO₂ blir da 2,4 kg som for kull.

Hvis en sammenligner biomasse- og kullkraftverk ser en at begge baserer seg på den samme energioverføringsteknologien, men kullkraftverk har mye større enhetskapasitet (kan overstige 1000 MW[20]) i forhold til et rent biomassekraftverk som vanligvis vil være under 50 MW[20]. På grunn av denne kapasiteten kan kullkraftverk oppnå høyere effektivitet til lavere kostnad. Ved å kombinere biomasse og kull i det samme kraftverket gjør en det mulig å unngå mange av de problemene en har ved et biomassekraftverk (som for eksempel spredtliggende råmateriale, kostbar bearbeiding, biomassens lave brennverdi og høyt innhold av fuktighet) samtidig som en utnytter kullkraftverkets energikapasitet. I mange tilfeller kan innblanding av biomasse i et kullkraftverk være den mest økonomiske måten å redusere CO₂-utslipp på, teknologisk sett.

3.3 Forskjellen mellom kull og biomasse

Den vesentlige forskjellen mellom kull og biomasse er tidsperspektivet. Både kull og biomasse er foredlet solenergi, men plantematerialet som kullet kommer fra absorberte CO₂ fra atmosfæren for millioner av år siden mens biomassen som blir forbrent rett etter høsting avgir CO₂ til atmosfæren som er blitt tatt opp mens den vokste. Dermed vil biomassen, hvis en kun utnytter tilveksten, gi null nettoutslipp av CO₂. En sier da at biomassen er CO₂-nøytral. Kull er derimot et CO₂ intensivt brensel (se avsnitt 3.2.2). Forbrenningen av kull vil øke konsentrasjonen av CO₂ i atmosfæren og dermed bidra til å forsterke drivhuseffekten.

Egenskapene til biomasse skiller seg betydelig fra kull. I tillegg er det stor variasjon for forskjellige typer biomasse. Temaer angående levering, lagring og klargjøring av biomassen er også forskjellig fra kull. Brennverdien og massetettheten til biomassen er generelt halvparten av hva kull er. I tillegg er kull sprøtt i forhold til biomasse.

3.3.1 Forskjell i brennverdi

Hvis en tar utgangspunkt i høyverdig steinkull (bituminøst kull), som er den kulltypen Store Norske Spitsbergen Kullkompani utvinner, og antar en brennverdi på 7000 kcal/kg. Benytter så følgende omregningstall: 1 kWh = 859,8 kcal:

$$7000 \text{ kcal/kg} \cdot \frac{1}{859,8} \text{ kWh/kcal} \approx 8,14 \text{ kWh/kg}$$

Brennverdien til trevirke varierer veldig, derfor er det tatt et gjennomsnitt fra utvalgte tresorter og antatt en brennverdi for trevirke på 2500 kWh/fm³. Eksempler på brennverdi for forskjellige tresorter:

Treslag	Nedre brennverdi kWh/fm ³	Effektiv brennverdi 20 % fuktighet (tørt virke) kWh/fm ³	Effektiv brennverdi 50 % fuktighet (ferskt virke) kWh/fm ³
Bøk	3 032	2 930	2 640
Eik	2 926	2 830	2 540
Ask	2 926	2 830	2 540
Lønn	2 820	2 730	2 450
Bjørk	2 660	2 570	2 310
Furu	2 341	2 260	2 030
Gran	2 022	1 950	1 760

Tabell 3: Brennverdier for utvalgte tresorter, Kilde:[29]

Volum av trevirke angis i fastvolum (fm³), det vil si nettovolum av virke i stabel eller haug uten luftvolum. Antar tetthet for trevirke på 650 kg/m³ [22]. Beregner så brennverdi for trevirke:

$$2500 \text{ kWh/m}^3 \cdot \frac{1}{650} \text{ m}^3/\text{kg} \approx 3,85 \text{ kWh/kg}$$

3.3.2 Forskjell i pris

Prognose fra mars 2008 for kullpris i 2011 er CIF 114 \$/tonn[30]. CIF betyr pris levert Haugaland Næringspark (inkludert laste- og lossekostnader, forsikring og frakt). Hvis en benytter en omvekslingskurs på 5,1[25] vil dette gi en pris på 581,40 kr/tonn som tilsvarer 58,14 øre/kg. Dette gir følgende energipris for kull:

$$\frac{58,14 \text{ øre/kg}}{8,14 \text{ kWh/kg}} \approx 7,14 \text{ øre/kWh}$$



Vestskog BA (regional skogeierforening for Rogaland og Hordaland) har gitt et overslag på at 50 000 tonn trevirke (omtrent 75 000 fm³ ved 40 % fuktighet) kan leveres CIF 420 kroner per fm³. Hvis en så tar utgangspunkt i den tidligere oppgitte brennverdien på 2500 kWh/fm³ for å beregne energiprisen på trevirke:

$$\frac{420 \cdot 10^2 \text{ øre}/\text{fm}^3}{2500 \text{ kWh}/\text{fm}^3} = 16,8 \text{ øre}/\text{kWh}$$

3.4 Innblanding av biomasse i kullkraftverk

3.4.1 Generelt

Innblanding av biomasse i et kullkraftverk kan representere en attraktiv måte å redusere utslipp av drivhusgasser fra kullkraft. Det finnes mange grunner til å undersøke denne muligheten, men det er noen tekniske utfordringer forbundet med bruk av biomasse i kullkraftverk: [6]

- Biomassen må leveres til kraftverket, lagres og klargjøres
Noen av biomassens egenskaper påvirker klargjøring, lagring og levering: den har lav energitetthet, er generelt fuktig, absorberer lett vann og har en ikke-sprø struktur. I tillegg må biomassen bearbejdes for å unngå stor økning i vedlikeholdet.
- Utfelling av aske
Varierer alt etter hvilken biomasse en benytter, dette kan være avgjørende for valg av biomasse og ikke minst kjele. Ved bruk av trevirke vil mengden aske i de fleste tilfeller minke[1].
- Omforming av biomassen
For høy fuktighet og/eller for stor partikkelstørrelse kan føre til problemer som ufullstendig forbrenning samt økte drifts- og vedlikeholdskostnader.
- Forurensning
Dannelse av svoveloksider minker generelt i samsvar med innholdet av svovel i brenselet. Svovel i biomasse er i de fleste tilfeller lavere enn i kull. Dannelsen av nitrogenoksider kan øke, minke eller forbli på samme nivå avhengig av brensel, forbrennings- og driftsforhold. Biomassen inneholder mer fuktighet enn kull, dette fører til minkende maksimum temperatur som igjen kan medføre en nedgang i dannelse av nitrogenoksider, men på den andre side kan for lav forbrenningstemperatur øke faren for ufullstendig forbrenning.
- Korrosjon
Svovel fra kull kan være med å dempe klorbasert korrosjon i kjelen som stammer fra bruk av biomasse.
- Utnyttning av flygeaske
Betongindustrien representerer en viktig ressurs for utnyttning av flygeaske. Men standard spesifikasjoner presiserer at det må være aske utelukkende fra

kullforbrenning. Enkelte land har foretatt nødvendige endringer av standarder for at innblanding av biomasse ikke skal være en hindring[1].

- Påvikning på SCR-system (selektiv katalytisk reduksjon) for kontroll av NO_x-utslipp
Askens egenskaper ved innblanding av biomasse kan ved noen tilfeller ha negativ innvirkning på dette systemet.

3.4.2 Innblandingsmetoder

Innblanding av biomasse kan foregå på to måter, enten ved at biomassen blir blandet sammen med kullet (ved anlegget eller før levering) før det blir pulverisert og tilsatt forbrenningskammeret. Dette gjør at en ikke trenger en egen behandlingslinje for biomassen. Den andre måten er en egen separat behandlingslinje som tar for seg behandling, tørking, pulverisering og injisering. Den siste metoden er mer kostbar å installere, men tillater en mer fleksibel behandling av biomassen som igjen gir mindre risiko for å ha innvirkning på behandlingen av kullet. Biomasse har blant annet andre egenskaper når det blir pulverisert, også har det høyere innhold av flyktige bestanddeler (80 %)[35] i forhold til kull (varierer alt etter type).

3.4.3 Forbehandling av biomassen

Energien som trengs til forbehandling av biomassen gjør at effektiviteten blir noe redusert. I tillegg vil den forbehandlingen som kreves for biomassen også kreve et areal av en viss størrelse.

Hvis en tar utgangspunkt i at biomassen som blir levert til kraftverket enten er ved eller flis. Fersk ved direkte fra hogst vil vanligvis ha et fuktighetsinnhold på over 50 % [1], mens utsortert avfall fra renovasjonsbedrifter ofte vil ha en fuktighet på under 15 % [1]. Alt etter hvilken størrelse veden har ved levering så må den kanskje først deles i mindre emner. Deretter må alt trevirket vaskes for å fjerne urenheter. Så må materialet tørkes for å oppnå en mest mulig jevn fuktighet. Trevirkets egenskaper avhenger av fuktighetsnivået og vil bli bedre jo lavere fuktigheten er. Tørt trevirke vil blant annet være lettere i vekt og lettere å bearbeide. Før biomassen skal brennes må den findeles eller males for å oppnå ønsket partikkelstørrelse.

Et problem kan være partikkelstørrelsen og den generelle uregelmessige størrelsen til biomassen. Størrelsen på biomassepartiklene er flerdimensjonal og uvanlig i forhold til kull. Dette er på grunn av trevirkets fibre naturen. Partiklene er ofte flisformet og kan dermed passere gjennom selv om de er for store. En kan da risikere at det vil finnes uforbrent biomasse i asken. De fleste kverner som maler kull baserer seg på den sprø egenskapen til kull som ikke biomasse har. Hvis ikke biomassen blir pulverisert tilstrekkelig kan innblandingsforholdet bli veldig begrenset. Innblandingsmetoden en velger har mye å si for kravet til partikkelstørrelsen på biomassen. Hvis en velger å blande biomassen sammen med kullet før pulverisering kan biomassen være grovere oppdelt enn hvis en velger å injisere biomassen separat. Hvis en velger det siste må en redusere størrelsen på partiklene til maksimalt 4-5 mm [1].

Det er to overordnede prinsipper for tørking av biomasse, enten naturlig tørking eller tørking ved varmluft. Det finnes mange forskjellige metoder å tørke ved bruk av varmluft, men felles

for dem er at kostnadene og energibehovet er stort. Ved naturlig tørking er værforhold en risikofaktor, i tillegg krever det også lengre tid. Tørking av biomasse påvirker den totale brenselkostnaden betydelig og bør derfor gjøres så enkelt som mulig[1].

Kull og biomasse blir behandlet likt ved at de blir lagret i hauger på stedet før pulverisering og forbrenning. Langtidslagring av fuktig biomasse kan være problematisk på grunn av biologisk aktivitet som oppstår [1].

3.4.4 Forbrenningsprosessen

Biomassens variabler som brennverdi og fuktighetsinnhold har stor innvirkning på forbrenningsprosessen. Ulike treslag har ulik tetthet og derfor ulik brennverdi. Brennverdien avhenger altså av treslaget, men fuktighetsinnholdet er også en viktig faktor. Tetthet er som kjent forholdet mellom vekt og volum (kg/m^3), volumet til trevirke vil endre seg etter hvor mye fuktighet det tar opp. For at tettheten da skal gi noen mening må det angis hvilken fuktighet som gjelder. I tillegg vil det også være variasjoner i tettheten innen samme treslag. Høyere brennverdi gir mer energi per volumenhet, men brennverdien blir bare delvis utnyttet ved forbrenning på grunn av fuktigheten. Dette er fordi en del av energiinnholdet går med til fordamping av vannet. Fuktigheten i biomassen vil fordampe ved lav temperatur ($<100^\circ\text{C}$). Siden fordampingen bruker energi som er blitt frigjort i forbrenningsprosessen, vil temperaturen i forbrenningskammeret falle. Dette reduserer forbrenningsprosessen. Det vil si at økt fuktighetsinnhold i brenselet vil redusere den maksimale mulige forbrenningstemperaturen og øke den nødvendige oppholdstiden i forbrenningskammeret. Dette kan medføre flere uønskede utslipp som følge av ufullstendig forbrenning.

3.4.5 Biomassens kjemiske egenskaper ved forbrenning

Som nevnt tidligere vil forbrenning av biomasse produsere mange av de samme produktene som forbrenning av kull. Siden både kull og biomasse inneholder karbon, nitrogen, oksygen, hydrogen og svovel er eksempler på dette svoveldioksid, nitrogenoksider, karbondioksid og vanndamp. I tillegg har biomasse enkelte små bestanddeler som kan gi nye utfordringer ved innblanding i et kullkraftverk [1]. Tilstedeværelse og mengde av disse stoffene vil variere for forskjellige typer biomasse:

- Klor (Cl)
Noen typer biomasse inneholder relativt høye klor verdier som gir høy saltsyrekonsentrasjon (HCl) i røykgassen fra kjelen. Dette kan igjen føre til korrosjon og reduksjon av smeltetemperaturen til asken. I tillegg kan en få utslipp av PCDD/PCDF (organiske miljøgifter dioksiner og furaner).
- Fluor (F)
Kan medføre korrosjon og gi utslipp av hydrogenfluorid (HF).
- Kalium (K)
Kan føre til slaggdannelse, begroing og korrosjon i forbrenningssystemet. Reduserer smeltetemperaturen til asken og kan danne aerosoler.
- Natrium (Na)



Kan føre til slaggdannelse, begroing og korrosjon i forbrenningssystemet. Reduserer smeltetemperaturen til asken og kan danne aerosoler.

- Magnesium (Mg)
Øker smeltetemperaturen til asken. Kan ha påvirkning på muligheten for utnytting av asken.
- Kalsium (Ca)
Øker smeltetemperaturen til asken. Kan ha påvirkning på muligheten for utnytting av asken.
- Fosfor (P)
Kan ha påvirkning på muligheten for utnytting av asken
- Tungmetaller
Gir uønskede utslipp, kan danne aerosoler og kan ha påvirkning på muligheten for utnytting av asken.

3.4.6 Bruk av biomasse i nevnte kullkraftteknologier

Erfaring med innblanding av biomasse i PCC kraftverk har vist at bruk av trevirke resulterer i en beskjeden nedgang i kjel effektivitet, men ingen tap av kapasitet i kjel. Derimot var det betydelig reduksjon i utslipp av SO₂, NO_x og kvikksølv. For innblanding av biomasse i PCC bør maksimum størrelse for partiklene være 0,25 in (6,34 mm) og fuktighetsnivået ikke overstige 25 %. For innblanding av små mengder biomasse (<5 %) kan biomassen blandes direkte sammen med kullet før det blir pulverisert og tilsatt forbrenningskammeret. Ved innblanding i størrelsesorden 5-15 % vil et eget injeksjonssystem være påkrevd.[21]

For IGCC og oxyfuel finnes det lite eller ingen erfaringer med innblanding av biomasse. Dette henger selvfølgelig sammen med disse to teknologienes grad av modenhet (se avsnitt 2.2.3 og 2.3.2). Fordelen med IGCC er at den har høy brenselfleksibilitet. I tillegg til petroleumskoks og kull av ulike kvaliteter kan IGCC også bruke biomasse og avfall som brensel. Dette kan være med å gjøre det til en attraktiv teknologi når det gjelder innblanding av biomasse. Oxyfuelteknologien kan ses på som en videreutvikling av PCC teknologien. Hvis en studerer figur 6 under avsnitt 2.3.1 ser en at de røde linjene viser forandringer til et konvensjonelt PCC kraftverk. Dermed kan en si at innblanding av biomasse også kan være aktuelt for denne teknologien når den i fremtiden blir moden.

3.5 Tilgang på biomasse

Trevirket i norske skoger er i dag beregnet til å være på 736 millioner m³[23]. Den årlige tilveksten er 25,5 millioner m³, mens den årlige avvirkningen av trevirke for salg er 7,3 millioner m³[24] (tall fra 2006). Dette betyr at den årlige tilveksten i Norge er mer enn tre ganger så stor som avvirkningen. Ut fra disse tallene kan en generelt si at å finne store nok kvanta med trevirke er ikke et så stort problem som det å få den levert til kraftverket til en konkurransedyktig pris. I tillegg må en også ta i betraktning de miljømessige belastningene med transporten.

Det finnes trevirke ressurser som rester, biprodukt og avfall fra ulike typer industri som potensielt kan bli tilgjengelig når det gjelder mengde og kostnad, eller til og med negativ kostnad hvis en ser på muligheten for å ta betalt for levering av denne typen avfall til



kraftverket. Tall fra Haugaland Interkommunale Miljøverk (HIM) og Sunnhordland Interkommunale Miljøverk (SIM) viser at hver av renovasjonsbedriftene mottar mellom 3000-4000 tonn trevirke i året.

4 Resultater

Dette kapittelet tar for seg overordnede økonomiske beregninger som skal gi et sammenligningsgrunnlag for to tilfeller av innblanding av valgt biomasse i et gitt kullkraftverk med et tilfelle hvor det ikke vil være bruk av biomasse. I tillegg er det en kortfattet gjennomgang av hvilke innvirkninger bruk av biomasse i et kullkraftverk vil ha på et miljøregnskap.

4.1 Økonomi

4.1.1 Generelt

Hvis ikke annet er oppgitt er tall og annen informasjon i dette kapittelet fra NVEs håndbok: "Kostnader ved produksjon av kraft og varme"[34]. Kostnadstallene er referert til januar 2007. Det blir presisert i håndboken at kostnadstallene må betraktes som generelle og veiledende. Omstendigheter rundt spesifikke prosjekter kan medføre til dels betydelige variasjoner, derfor må nøyere studier og analyser omkring enkeltprosjekter gjennomføres.

4.1.2 CO₂-kvoter

Kvoter er betegnelsen på fritt omsettelige tillatelser til utslipp av klimagasser. En kvote tilsvarer utslipp av ett tonn CO₂. Norske myndigheter fastsetter den totale utslippsmengden av klimagasser som virksomheter i kvotesystemet har lov til å slippe ut i en viss periode. Kvoteene tildeles gratis og/eller de auksjoneres ut til virksomhetene. Energianlegg over 20 MW omfattes av kvotesystemet. Det er blitt bestemt at fra 2008 vil kvotesystemet omfatte CO₂-utslipp fra all fossil brensel, også de utslippene som i dag er belagt med CO₂-avgift. Kvoteplikten gjelder likevel ikke utslipp fra forbrenning av biomasse. Nye virksomheter etablert etter 2001 vil ikke bli tildelt kvoter vederlagsfritt. Det vil imidlertid bli avsatt kvoter for vederlagsfri tildeling til nye gasskraftverk som skal basere seg på CO₂-håndtering, og til høyeffektive kraftvarmeverk med konsesjon. Det legges opp til å fjerne CO₂-avgiften for landbasert industri som får kvoteplikt i perioden 2008-2012, men dette må avklares i forhold til EØS-avtalens regelverk om offentlig støtte[16]. Innføring av CO₂-kvoter vil bidra til en fremtidig økning av kraftprisen.

4.1.3 Økonomiske beregninger

Et kullkraftverk av typen PCC med produksjonskapasitet på 600 MW_{el}, virkningsgrad på 40 % og 6700 driftstimer per år vil ha en årlig produksjon på 4,02 TWh_{el} og følgende produksjonskostnader for et tilfelle uten innblanding av biomasse og to tilfeller med innblanding:

	Kullkraftverk	Kullkraftverk med 5 % biomasse	Kullkraftverk med 15 % biomasse	Enheter
Anleggskostnader	11000	11000	12530	kr/kW _{el}
Byggetidsrenter	1616	1616	1841	kr/kW _{el}
Sum investeringskostnader	12616	12616	14371	kr/kW _{el}
Kapitalkostnader	941	941	1071	kr/kW _{el} /år
Faste driftskostnader	247	281	281	kr/kW _{el} /år
Sum faste årskostnader	1188	1222	1352	kr/kW _{el} /år
Faste kostnader	17,7	18,2	20,2	øre/kWh
Energikostnader, kull	17,9	17,0	15,2	øre/kWh _{el}
CO ₂ -kvotepris	14,0	13,3	11,9	øre/kWh _{el}
Energikostnader, biomasse	0	2,1	6,3	øre/kWh _{el}
Variable kostnader eks energi	3,7	3,7	3,7	øre/kWh _{el}
Sum enhetskostnader	53,3	54,3	57,3	øre/kWh _{el}

Tabell 4: Sammenligning enhetskostnader

Tabellen ovenfor er lagd ved hjelp av Excel regneark, hvor variabler som innblandingsrate, kull- og biomassepris og brennverdier kan varieres.

Byggetiden for et kullkraftverk er satt til fem år med en byggetidsrente på 5,5 %. Denne kalkulasjonsrenten blir brukt for å ta høyde for risiko forbundet med et energiprojekt med høye kapitalkostnader. Et varmekraftverk som dette blir antatt å ha en økonomisk levetid på 25 år med en rente på 5,5 %. Brenselpriser varierer innenfor forskjellige regioner i verden, dessuten er prognoser for fremtidige priser belagt med en stor grad av usikkerhet. Her bruker en kull- og trevirkeprisene beregnet tidligere i oppgaven (avsnitt 3.3.2). Brennverdiene for kull og trevirke er også beregnet tidligere i oppgaven (avsnitt 3.3.1).

Følgende beregninger er gjort for å komme frem til de estimerte produksjonskostnadene:

- **Investeringskostnader**
Anleggskostnadene er antatt å være 11 000 kr/kW_{el}. Byggetidsrentene beregnes ved å anta at investeringene fordeles jevnt over byggeperioden. Benytter følgende formel:

$$I \cdot \frac{(1+r)^t - 1}{r \cdot t} \cdot \left(1 + \frac{r}{2}\right) - I$$

Her er I investert beløp (anleggskostnadene), t er byggetiden og r er byggetidsrenten. Investeringskostnadene er da summen av anleggskostnadene og byggetidsrenter. For tilfellet med 5 % innblanding av biomasse er det antatt at anleggskostnadene er de samme som for tilfellet uten innblanding. Dette er fordi ved innblanding av biomasse opptil 5 % kan en blande biomassen direkte sammen med kullet (jamfør avsnitt 3.4.6) og dermed bruke kulletts behandlingslinje for pulverisering og injisering. For tilfellet

med 15 % innblanding av biomasse er tillegget for anleggskostnadene antatt å være 300 \$/kW_{el}[6]. Med en omvekslingskurs på 5,1[25] vil det være 1530 kr/kW_{el}.

- Faste kostnader

For beregning av den årlige kapitalkostnaden må en benytte annuitetsrente for å ta høyde for at investeringskostnadene fordeler seg over anleggets levetid. Benytter følgende formel:

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Her er i renten og n økonomisk levetid til anlegget. Den årlige kapitalkostnaden får en da ved å multiplisere annuitetsrenten med investeringskostnadene. De faste årlige driftskostnadene er antatt å være 247 kr/kW_{el} for tilfellet uten innblanding. For begge tilfellene med innblanding av biomasse er det rimelig å anta at drifts- og vedlikeholdskostnadene vil stige noe. Hvis en antar en lik prosentvis stigning som for anleggskostnadene (for tilfellet med 15 % innblanding) får en 281 kr/kW_{el} for de faste årlige driftskostnadene. De faste årskostnadene får en da ved å summere kapitalkostnadene og driftkostnadene. De faste årskostnadene omgjøres til faste enhetskostnader ved å dividere med anleggets driftstimer per år.

- Energikostnader

For å finne energikostnadene må en multiplisere brennverdiene med anleggets virkningsgrad. Den inverse av svaret gir det spesifikke brenselforbruket per kW_{el}. Energiprisene for kull og biomasse er gitt tidligere i oppgaven. Når en så multipliserer energiprisen med det spesifikke brenselforbruket får en energikostnaden for hvert brensel.

- Variable kostnader

De variable kostnadene som ikke er knyttet til energi er antatt å være 3,7 øre/kWh_{el}.

- CO₂-kvotepris

Kvotepriisen (mars 2008) for CO₂ er 23,40 €/tonn[30]. Hvis en benytter en omvekslingskurs på 8,1[25] vil det gi en pris på tilnærmet 190 kr/tonn. Den spesifikke CO₂-kvoteprisen får en da ved å multiplisere det spesifikke brenselforbruket av kull med 2,4 kg CO₂/kg kull (fra avsnitt 3.2.2) og kvoteprisen per tonn. Forbrenning av biomasse er ikke underlagt CO₂-kvoter, derfor må en i tilfellene med innblanding differensiere mellom andel kull og biomasse.

4.2 Miljø

4.2.1 Biomassens innvirkning på miljøregnskapet

Å innblande biomasse i et kullkraftverk er ikke bare en måte å redusere CO₂-utslipp på, men også en måte å øke bruken av fornybare energiresurser i kraftproduksjonen. Dette er ønskelig fra et miljømessig perspektiv. Hvis en antar at biomassen blir innsamlet på en bærekraftig måte vil innblanding av biomasse i et kullkraftverk ha flere positive miljøeffekter. Biobrenselet kan redusere utslipp av svoveloksid (SO_x), karbondioksid (CO₂), nitrogenoksider (NO_x) og tungmetaller som kvikksølv. Andre bestanddeler i biobrenselet som



har innvirkning på miljøet ved forbrenning er nevnt under avsnitt 3.4.5. I tillegg til dette vil bruken av biomasse forskyve bruken av fossilt brensel. Tar en i betraktning den tidligere nevnte utnyttelsen av tilvekst vil det ha mindre netto påvirkning på miljøet å forbrenne biomasse i forhold til fossilt brensel.

Hvis en benytter seg av trevirke fra renovasjonsbedrifter kan en annen miljømessig fordel være at forbruket av trevirket vil redusere deponeringen i avfallsfyllinger. Ved deponering vil fullt brukende råmateriale blitt nedbrutt. Forholdene ved avfallsdeponiene gjør at nedbrytingen danner deponigass som blant annet inneholder metan, karbonmonoksid og karbondioksid. De fleste norske avfallsdeponier slipper deponigassen rett ut i lufta. Metan er en klimagass som er 21 ganger sterkere enn karbondioksid[15]. Metangassen som siver ut fra norske avfallsfyllinger er en stor bidragsyter til de norske klimagassutslippene. Hvis trevirket blir brukt som brensel i kullkraftverk kan en i prinsippet trekke fra mengden drivhusgass en har spart miljøet for og dermed i noen tilfeller minske nettoutsippet av drivhusgasser selv uten å ta med forskyvingen av det fossile brenselet.

4.2.2 CO₂-verdikjede

Prinsippet bak en CO₂-verdikjede er å fange CO₂ fra industri med høye utslipp for så å transportere gassen i rør eller med båt til oljefelt eller geologiske formasjoner. CO₂ blir så injisert enten for å brukes til økt oljeutvinning eller for permanent lagring.

Når en bruker biomasse i et kullkraftverk som fanger CO₂ for videre lagring kan en komme i den situasjonen at en får en netto negativ utslippsbalanse. Ved å kombinere biomasse med CO₂-håndtering bidrar en altså til å fjerne CO₂ fra atmosfæren.

5 Diskusjon og konklusjon

5.1 Diskusjon

Energiproduksjon fra forbrenning av fossilt brensel gir store utslipp av drivhusgasser. Som følge av økt oppmerksomhet rundt denne problemstillingen har internasjonale initiativer som Kyoto-avtalen og IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ført til retningslinjer for utslippsreduksjon. En reduksjon i utslipp av klimagasser kan en blant annet oppnå ved bruk av alternative energikilder som kjernekraft og fornybar energi. I mange tilfeller er bruk av kjernekraft utelukket og inntil de fornybare energikildene kan levere stabilt store mengder kraft vil dagens økende energibehov bli dekket av konvensjonell kraftproduksjon hvor kullkraft står for ca. 40 % [36] av elektrisitetsproduksjonen i verden. Elektrisitetsproduksjon ved bruk av kullkraftverk har vært den største enkeltkilde til forurensning i verden de siste 30 årene [26]. For å redusere utslipp av klimagasser fra forbrenning av fossilt brensel kan en: [27]

- Øke effektiviteten ved eksisterende kullkraftverk. Høyere effektivitet betyr at en bruker mindre kull til å produsere samme mengde energi.
- Introdusere kombinerte sykluser som kan gi høy termisk effektivitet. IGCC er et eksempel på bruk av kombinerte sykluser (jamfør avsnitt 2.2.1).
- Erstatte fossilt brensel med fornybare ressurser som for eksempel biomasse.
- Erstatte kull med gass som har lavere karboninnhold, men gassprisen er høyere enn kullprisen.

For å gjøre en stor forskjell når det gjelder utslipp av klimagasser må en også fange og lagre CO₂ fra forbrenningen. Utfordringen i dag er på best mulig måte å kombinere ønsket om fortsatt tilgang på billig energi fra fossile kilder med kravene om reduksjon av klimagasser. For å innfri begge er opprettingen av en CO₂-verdikjede en mulighet. For å klare det må en i første omgang sørge for teknologi som kan fange CO₂ på en effektiv måte. Etter fangst må CO₂ mellomlagres før transport og permanent lagring. For å kunne danne en CO₂-verdikjede vil det være mest hensiktsmessig, både praktisk og økonomisk, å fange CO₂ fra store utslippskilder fra kraftverk og industri. Dette er fordi det kreves store mengder CO₂ til økt oljeutvinning eller for lagring i geologiske formasjoner. På grunn av manglende infrastruktur for både fangst, transport og lagring av CO₂ er det foreløpig ikke realisert noen kraftverk med fullskala CO₂-fangst. Både næringsliv og politikere gir CO₂-fangst høy prioritet dermed er det mulig at en i fremtiden kan skape en CO₂-verdikjede uten for stor finansiell risiko.

Uansett hvilken teknologi en velger så vil ønsket om å fange og lagre CO₂ medføre økte kostnader ved produksjon av elektrisitet, noe som dermed vil medføre økt pris for forbruker. Men kostnadene for CO₂-utslipp vil øke i nær fremtid, dette vil gjøre det mer ettertraktet med en CO₂-verdikjede.

Som nevnt innledningsvis vil etableringen av et kullkraftverk i Norge være kontroversielt. Kullkraft har tradisjonelt vært meget forurensende, men den teknologiske utviklingen er med på å gjøre kullkraft mer effektivt og mindre forurensende. Utviklingen i nær fremtid vil mest sannsynlig være en videreutvikling og forbedring av eksisterende teknologier som er



nevnt i denne rapporten. Etter hvert som IGCC og oxyfuel vil modne kan en forvente lavere kostnader for CO₂-fangst, høyere effektivitet for kraftverk med CO₂-rensing og større fleksibilitet med hensyn på kvalitet av brensel. En forutsetning for å få bygge et kullkraftverk i Norge vil være CO₂-håndtering.

De mest hensiktsmessige systemene å tilsette biomasse i vil være de som er designet med tanke på fleksibilitet når det gjelder brensel. Å designe et kraftverk med utgangspunkt i å akseptere en miks av forskjellig brensel vil tillate en å innarbeide biomassen i spesifikasjonene til kjeldesignet, og dermed ivareta høy effektivitet med lave drifts- og vedlikeholdskostnader. Dette er et viktig poeng for dette prosjektet siden en her har mulighet til å ta avgjørelsen om bruk av biomasse tidlig i prosjektarbeidet.

Avgjørelsen om å innblande biomasse i et planlagt kullkraftverk vil ofte ikke nødvendigvis være drevet av de miljømessige interessene. De økonomiske interessene vil gjerne stå sterkere, men de miljømessige fordelene kan skaffe økonomisk drivkraft gjennom politiske reguleringer. Myndighetene kan for eksempel kreve en viss mengde fornybar energi i elektrisitetsproduksjonen. Innblanding av biomasse kan da være en attraktiv og billig nærliggende fornybar mulighet. Det er også en selvfølge at hvis det kommer direktiver for bruk av mer fornybare ressurser så må det også komme subsidier som gjør det lønnsomt å følge opp. Selv om det har skjedd en stor teknologisk utvikling er de fleste biomaseteknologiene ikke kommersielt lønnsomme uten økonomisk støtte.

Et kullkraftverk med innblanding av biomasse kan være med på å gi prosjektet en miljøprofil. Dette kan være med på å forbedre den allmenne formeningen om et kullkraftverk samt være et godt argument i det politiske arbeidet. Flere argumenter som kan brukes i det politiske arbeidet kan være at et kullkraftverk med CO₂-fangst kan være et ledd i elektrifiseringen av norsk sokkel (som er en av Norges største utslippskilder). Et annet argument er muligheten for å opprette en CO₂-hub (CO₂ kondenseringsanlegg og mellomlager) ved næringsparken, dette kan være en utløsende faktor for oppretting av en CO₂-verdikjede i Norge.

For at prosjektet med innblanding av biomasse skal bli vellykket/konkurransedyktig mener jeg at biomassen må hentes så lokalt som mulig siden transport av biomasse på hjul eller med båt vil være veldig lite miljøvennlig og potensielt kostbart. En mulighet kan være at trevirke fra en stabil kilde som Vestskog BA kan være hovedleverandøren, mens levering av trevirke fra lokale renovasjonsselskaper kan være et tilbud for å lette mengden avfall som går til deponi og dermed også potensielt produserer drivhusgass. Kostnaden for denne typen trevirke vil i tillegg være billigere[34].

5.2 Konklusjon

Avgjørelsen om det skal innblendes biomasse i kullkraftverket kan ikke bare tas på bakgrunn av prisforskjellen mellom kull og biomasse, men må ses i sammenheng med de investeringer og kostnader som vil bli aktuelle for prosjektet. I tillegg må en sammenligne enhetskostnadene med et lignende tilfelle uten bruk av biomasse.

Når en utelukkende sammenligner prisen på kull og trevirke (henholdsvis 7,14 øre/kWh og 16,8 øre/kWh) kan en raskt trekke en forhastet konklusjon om at et slik prosjekt ikke vil være lønnsomt. Men for å få et mer helhetlig bilde av et slik prosjekt er en nødt til å trekke inn flere faktorer. En viktig faktor i denne sammenhengen er CO₂-kvoteprisen. Som nevnt tidligere er forbrenning av biomasse ikke underlagt kvoteplikt, dermed vil situasjonen for enhetskostnaden ikke bli så utslagsgivende som først antatt. I avsnitt 4.1.3 er et tilfelle uten innblanding sammenlignet med to tilfeller av innblanding (henholdsvis 5 % og 15 % biomasse). Det er viktig igjen å presisere at kostnadene i disse tre regnskapene er belagt med en stor grad av usikkerhet og en del forutsetninger er blitt gjort. Når en ser bort fra dette mener jeg at differansene mellom de tre forskjellige tilfellene er for små til at en kan avskrive muligheten for å kunne innblande biomasse så tidlig i prosjektet. Dermed vil det være nødvendig å foreta en grundigere økonomisk analyse.

Når det gjelder valg av teknologi som passer best til innblanding av biomasse for kullkraftprosjektet, er det viktig å ta i betraktning tidligere nevnt grad av modenhet for hver av teknologiene. PCC er den teknologien som vil la seg gjennomføre på kortest sikt og teknologien er blitt modernisert og effektivisert gjennom alle de årene slike kullkraftverk har eksistert. For PCC finnes det flere eksempler på vellykkede prosjekter med innblanding av biomasse. Når det gjelder oxyfuel anser jeg den for så umoden at den ikke vil være aktuell i denne sammenhengen, men som nevnt tidligere er det mulig å gjøre tilpasninger til et eksisterende PCC-anlegg slik at det i praksis blir et oxyfuelanlegg (se figur 6 avsnitt 2.3.1). Dette kan kanskje være aktuelt i fremtiden når teknologiutviklingen har gjort separering av luft mindre kostbart. Selv om IGCC foreløpig er på demonstrasjonsnivå er det en veldig interessant teknologi. En av fordelene som utmerker seg med IGCC er brenselfleksibiliteten. Dette er gunstig når det kommer til et prosjekt hvor det kan bli aktuelt å blande inn biomasse, i tillegg har en da også muligheten til senere å vurdere innblanding av andre typer biomasse. IGCC er også interessant siden den bruker kombinerte sykluser som gir høy termisk effektivitet. Effektiviteten til denne teknologien har også potensialet til å bli enda bedre etter hvert som erfaringsgrunnlaget blir bedre og prosessen kan optimaliseres.



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Kilder



- [1] van Loo, S. & Koppejan, J. (red.) *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing* (Earthscan, London, 2008)
- [2] Boyle, G. (red.) *Renewable Energy* (Oxford University Press, Oxford, 2004)
- [3] Hvidsten, B.O. *Kullkraftverk I Haugaland Næringspark* (Haugaland Kraft, Forstudie Fase 1, 2006)
- [4] Norconsult & ESB International *Coal-fired Power plant Haugaland Næringspark Norway* (Haugaland Kraft, Study Phase 2, 2007)
- [5] <http://www.zero.no/fossil/co2/teknologi/fangst/pre/20040813-13>
- [6] Baxter, L. *Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy* (2005) Tilgjengelig fra ScienceDirect
- [7] <http://www.ngu.no/no/hm/Georessurser/Energimineraler/Kull/>
- [8] <http://www.iea-coal.org.uk/content/default.asp?PageId=976>
- [9] Utdannings- og forskningsdepartementet *Rammeplan for ingeniørutdanning*(2005), Tilgjengelig på:
http://www.regjeringen.no/upload/kilde/ufd/pla/2003/0002/ddd/pdfv/193756-offentlig_rammeplan_ingeniørutdanning.pdf
- [10] <http://www.haugaland-kraft.no/category.php?categoryID=66>
- [11] NVE *Kullkraftverk i Haugalandet – Fastsetting av utredningsprogram*(2007) Tilgjengelig fra: http://www.nve.no/admin/FileArchive/311/200700860_18.pdf
- [12] <http://www.zero.no/fossil/co2/teknologi/fangst/post/20040812>
- [13] <http://www.bellona.no/artikler/CO2-fangst>
- [14] <http://www.coal21.com.au/CO2capstore.php>
- [15] Rystad, B. & Lauritzen, O. *Kjemi og Miljøkunnskap* (NKI Forlaget, Bekkestua, 2002)
- [16] <http://www.ccsd.biz/factsheets/oxyfuel.cfm>
- [17] <http://www.ccsd.biz/factsheets/igcc.cfm>
- [18] Kather, A. m.fl. *Oxyfuel Process for Hard Coal Power Plants with CO₂-Removal* (2006) Tilgjengelig fra:
http://www.adecos.de/download/publikationen/060619_ghgt8_paper_tuhh.pdf
- [19]
http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2007/STAGING/local_assets/downloads/pdf/table_of_proved_coal_reserves_2007.pdf
- [20] <http://ebdrenewables.com/sites/renew/biomass.aspx#directfired>
- [21] U.S. DOE *Biomass Cofiring in Coal-Fired Boilers* Tilgjengelig fra:
http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/fta_biomass_cofiring.pdf
- [22] Pedersen, S.E. *Teknisk Formelsamling* (Universitetsforlaget, Oslo, 2005)
- [23] http://www.skogoglandskap.no/fagartikler/2007/norske_skoger_vokser_videre
- [24] <http://www.ssb.no/skog/>
- [25] https://www.dnbnor.no/markets/interaktive_verktoy/valuta/valutakurser.html
- [26] <http://www.energyjustice.net/coal/igcc/factsheet-long.pdf>
- [27] Wall, T.F. *Combustion processes for carbon capture* (2007) Tilgjengelig fra: ScienceDirect
- [28] http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/core_rd/co2capture.html
- [29] <http://www.gronnvarme.no/fast/brennverdier.html>
- [30] www.nordpool.no



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND



[31] <http://www.worldcoal.org/pages/content/index.asp?PageID=108>

[32] <http://www.aep.com/about/igcc/>

[33] Strømberg, L. *CO₂free Power Plant* (Vattenfall, 2006) Tilgjengelig fra:
<http://www.oecd.org/dataoecd/13/38/36746412.pdf>

[34] NVE *Kostnader ved produksjon av kraft og varme*(2007) Tilgjengelig fra:
http://www.nve.no/modules/module_109/publisher_view_product.asp?iEntityId=11124

[35]
http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=75,41182&_dad=portal&_schem=PORTAL

[36] <http://www.energifakta.no/>

Andre kilder:

- Fernando, R. *Fuels for biomass cofiring* (2005) Tilgjengelig fra: http://www.iea-coal.org.uk/publishor/system/component_view.asp?LogDocId=81393
- Mann, M.K. & Spath, P.L. *A life cycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant* (2001) Tilgjengelig fra: <http://www.treepower.org/cofiring/NREL-lifecycle.pdf>
- Valero, A. & Usón, S. *Oxy-co-gasification of coal and biomass in an integrated IGCC power plant* (2005) Tilgjengelig fra ScienceDirect
- Freeman, M.C. *Results of Pilot-Scale Biomass Co-Firing for P.C. Combustors*
Tilgjengelig fra:
http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/97/97ps/ps_pdf/PS3B-3.PDF
- <http://www.bellona.no>
- <http://www.zero.no>
- <http://www.worldcoal.org>
- <http://www.energifakta.no>
- <http://www.clean-energy.us/index.php>
- <http://www.coal21.com.au/>
- <http://www.biomassenergycentre.org.uk>
- <http://www.futuregenalliance.org/>