LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikka

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

ENNEN POLTTOA TAPAHTUVA HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO

Mikko Kousa

0278844

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO 4
1 JOHDANTO 5
2 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTOMENETELMÄT 7
3 IGCC JA NGCC LAITOKSET 9
3.1 NGCC 10
3.2 IGCC 12
4 IGCC JA NGCC TALTEENOTOLLA 13
4.1 NGCC 14
4.2 IGCC 16
5 TALTEENOTTOTEKNIIKAN ERI OSA-ALUEET 16
5.1 Hapen valmistus 18
5.2 Polttoaineen esikäsittely 19
5.3 Kaasutus/reformointi 20
5.4 Savukaasujen puhdistus 20
5.5 Hiilimonoksidin muunto hiilidioksidiksi 20
5.6 Rikin poisto ja hiilidioksidin talteenotto 21
5.7 Vedyn käsittely ennen polttokammioon syöttöä 21
5.8 Kaasuturbiini 21
5.9 Hiilidioksidin puhdistus ja kompressointi 22
5.10 Prosessi integrointi 22
6 REFORMOINTI/KAASUTUS 22
6.1 Höyryreformointi 22
6.2 Kaasutus 25
6.3 ATR 27
7 HIILIMONOKSIDIN MUUNTO HIILIDIOKSIDIKSI 28
8 HIILIDIOKSIDIN JA VEDYN EROTUS 29
8.1 Fysikaalinen absorptio 29
8.2 Kemiallinen absorptio 31

8.3 Adsorptio ... 33
8.4 Membraanit/membraanireaktorit ... 36
8.4.1 Membraanit ... 36
8.4.2 Membraanireaktorit ... 36
8.5 Muut menetelmät ... 39
9 KUSTANNUKSET JA VAIKUTUS HYÖTYSUHTEESEEN ... 39
9.1 KUSTANNUSTEN JAKAUTUMINEN ... 40
10 TUTKIMUSPROJEKTEJA ... 46
10.1 ENCAP ... 47
10.1.1 Laitostyypit ... 48
10.1.2 Projektin tulokset ... 53
11 TULEVAISUUDENNÄKYMIÄ ... 57
11.1 Talteenoton yleisnäkymät ... 57
11.2 Ennen polttoa tapahtuvan talteenoton näkymät ... 59
12 YHTEENVETO ... 61
LÄHDELUETTELO ... 63

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

ASU	Air Separation Unit
COS	Karbonyylisulfidi
CO_2	Hiilidioksidi
ESA	Electrical Swing Adsorption
H_2S	Rikkivety
H_2	Vety
IEA	International Energy Agency
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IRCC	Integrated Reforming Combined Cycle
MEA	Monoethanolamine
MDEA	Methyldiethylamine
NGCC	Natural Gas Combined Cycle
PSA	Pressure Swing Adsorption
SER	Sorption Enhanced Reaction
SMR	Steam Methane Reforming
TSA	Temperature Swing Adsorption
x	Tapauskohtaisesti määräytyvä kerroin
y	Tapauskohtaisesti määräytyvä kerroin

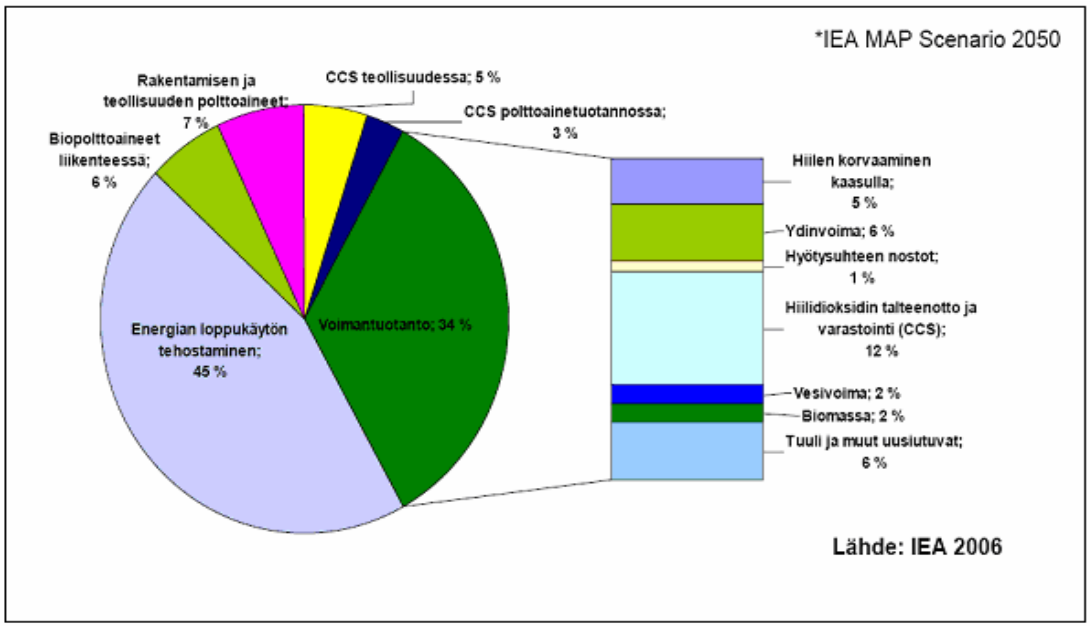
Alaindeksit

x	Tapauskohtaisesti määräytyvä kerroin
y	Tapauskohtaisesti määräytyvä kerroin

1 JOHDANTO

Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on ollut uutisten vakioaiheena jo pitkään, ja syystäkin, sillä seuraukset ovat vakavat jos jotain ei tehdä. Toimiin on ryhdytty, ja Suomi sitoutui EU:n asettamien tavoitteiden mukaisesti vähentämään päästöjään vuoden 1990 tasosta 20-30%:a vuoteen 2020 mennessä. Pitkän aikavälin tavoitteeksi asetettiin päästöjen vähentäminen 60-80%:lla vuoteen 2050 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2008)

Yli puolet suomen kokonaispäästöistä aiheutuu energian tuotannosta ja muusta teollisuudesta, ja tästä energiateollisuuden osuus on ylivoimaisesti suurin. Keinoja, joilla päästöjen vähentämiseen energiateollisuudessa pyritään, ovat muun muassa uusiutuvan energian ja ydinvoiman lisääminen, sekä energiatehokkuuden parantaminen. Asia, joka on vähemmän ollut esillä, on hiilidioksidipäästöjen talteenotto. Kuvassa 1 on esitettynä eri menetelmien arvioidut mahdollisuudet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Suomen mittakaavassa päästöjen pienentäminen uusiutuvan energian, ydinvoiman ja energian käytön tehostamisen keinoin on vielä saavutettavissa, mutta vähemmän kehittyneissä maissa riippuvuus kivihiilestä ja muista fossiilisista energianlähteistä tulee kestämään vielä pitkään. (Tekniikka ja talous, 2009)



Kuva 1. Arvio eri menetelmien mahdollisuuksista hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen vuonna 2050. (Hiilitieto, 2008)

Maailmanlaajuisesti kivihiilellä tuotetaan noin 40% kaikesta sähköstä, ja noin neljännes kokonaisenergiantarpeesta, ja tämän määrän korvaaminen päästöttömillä muodoilla ei käy hetkessä. IEA:n mukaan vuonna 2030 hiilellä tuotetaan sähköä jopa kaksi kertaa enemmän kuin vuonna 2005. Kivihiilivarantojen on arveltu riittävän vielä sadoiksi vuosiksi, joten vaikka pitkän tähtäimen päämääränä olisikin päästöttömän energian tuotto, tarjoaa päästöjen talteenotto mahdollisuuden, joka antaa paljon lisäaikaa kehitettäessä uusiutuvia energiamuotoja. Maakaasu on kivihiiltä puhtaampi vaihtoehto, mutta toisaalta maakaasuvarannot ovat huomattavasti pienemmät kuin kivihiilivarannot. Nykyisen kulutuksen perusteella maakaasuvarantojen riittävyydeksi on arvioitu n.50 vuotta. (Euroopan komissio)

Hiilidioksidin erotus ei ole ajatuksena uusi, vaan se on ollut käytössä jo yli 80 vuotta sitten. Nykyisin tekniikkaa sovelletaan mm. valmistettaessa ammoniakkia, alkoholeja ja synteettisiä nestemäisiä polttoaineita. Täytyy huomata, että näissä prosesseissa on keskitytty vetypitoisen kaasun tuottamiseen, eikä niinkään hiilidioksidin talteenottoon, ja suurin osa hiilidioksidista onkin näissä laitoksissa vapautunut taivaan tuuliin. Vetypitoisen

kaasun tuottaminen ja hiilidioksidin talteenotto liittyvät olennaisesti toisiinsa, kuten myöhempänä työssä tulee ilmi. Voimalaitosmittakaavassa tekniikkaa on alettu kehittää enemmän vasta viime vuosikymmeninä, ja ilmastonmuutoksen aiheuttamien uhkien tajuaminen on antanut viimeisen sykäyksen tekniikan kehittämiselle. Tällä hetkellä asian parissa työskentelee useita eri tahoja eri puolilla maailmaa enenevissä määrin, ja yhteisenä tavoitteena on kehittää talteenottotekniikasta varteenotettava vaihtoehto päästöjen vähentämiseen. (IPCC, 2005)

Tässä työssä keskitytään hiilidioksidin talteenottomenetelmään, jossa talteenotto suoritetaan ennen polttoaineen polttoa. Tarkoituksena on selvittää tätä tekniikkaa käyttävien laitosten toimintaa yleisesti, sekä perehtyä tarkemmin prosessin tärkeimpiin vaiheisiin. Tavoitteena on valottaa kuinka tekniikka toimii, mitä muutoksia normaaliin laitoskokoonpanoon verrattuna hiilidioksidin talteenotto vaatii, ja onko sillä mahdollisuutta nousta potentiaaliseksi keinoksi vähentää päästöjä. Lisäksi työssä selvitetään, kuinka hiilidioksidin talteenotto vaikuttaa taloudellisiin kustannuksiin ja laitoksen hyötysuhteeseen. Työn loppupuolella kerrotaan tämän hetkisestä tutkimuksesta, ja etenkin Encap-projektista. Osa sinänsä tärkeistä hiilidioksidin talteenoton osa-alueista kuten hiilidioksidin kompressointi, kuljetus ja varastointi, jätetään lähes huomiotta työn rajallisen pituuden vuoksi. Tavoitteena on, että työstä hyötyisi niin asiaan ensi kertaa perehtyvä kuin hieman tarkempaakin tietoa haluava.

2 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTOMENETELMÄT

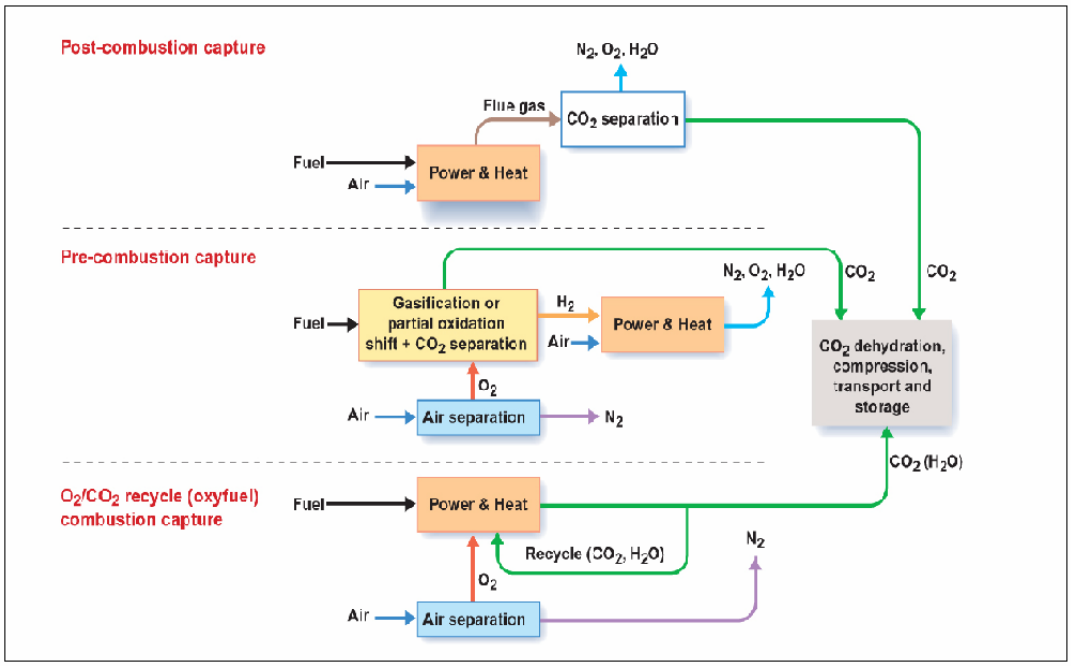
Hiilidioksidin talteenottotekniikat voimalaitoksissa voidaan jaotella kolmeen pääryhmään, jotka ovat talteenotto ennen polttoa, happipoltto ja polton jälkeinen talteenotto. Tässä työssä perehdytään ennen polttoa tapahtuvaan talteenottoon. Seuraavaksi esitellään näiden kolmen käytössä olevan tekniikan periaatteet. Periaatteet on esitetty myös kuvassa 2.

Ennen polttoa tapahtuvassa talteenotossa hiilidioksidi otetaan talteen tekniikan nimen mukaisesti ennen polttoaineen polttoa. Polttoaineesta muodostetaan vetyä ja

hiilimonoksidia sisältävä seos käsittelemällä polttoainetta hapella tai/ja vesihöyryllä. Tämän jälkeen hiilimonoksidi reagoi vesihöyryn kanssa, jolloin tuloksena saadaan hiilidioksidia. Täten on saatu tuotekaasuksi vedyn ja hiilidioksidin seos, josta vety käytetään polttoaineena, ja hiilidioksidi otetaan talteen. Vedyn ja hiilidioksidin erotukseen on käytössä useita vaihtoehtoja, joista fysikaalinen absorptio on tällä hetkellä yleisin vaihtoehto. Talteenotettu kaasumaisessa muodossa oleva hiilidioksidi muutetaan nestemäiseen muotoon painetta nostamalla, jonka jälkeen se on valmis varastoitavaksi. (IPCC, 2005)

Happipoltossa CO_2 saadaan otettua talteen käyttämällä poltossa puhdasta happea perinteisen ilman sijaan. Tällöin polton seurauksena saadaan pääosin hiilidioksidista ja vesihöyrystä koostuva seos. Tuotekaasu jäähdytetään, jolloin vesihöyry kondensoituu vedeksi, ja jäljelle jää seos, joka koostuu pääosin hiilidioksidista. Hiilidioksidin jatkokäsittely tapahtuu kuten ennen polttoa tapahtuvassa talteenotossa.(IPCC, 2005)

Polton jälkeisessä talteenotossa periaatteena on ottaa hiilidioksidi talteen polton jälkeisistä savukaasuista. Polttoaineen esikäsittely ja polttoprosessi hoituvat kuten perinteisissäkin voimalaitoksissa. Poltossa syntyvät savukaasut johdetaan erotuslaitteiston läpi, jossa hiilidioksidi saadaan erotettua. Erotusmenetelmiä on kehitteillä useita, ja näistä yleisimmin käytetty on kemiallinen absorptio. Tässä menetelmässä savukaasut saatetaan kontaktiin liuoksen kanssa, johon hiilidioksidi sitten liukenee. Hiilidioksidi erotetaan liuoksesta, kompressoidaan ja siirretään varastoitavaksi.
(IPCC, 2005)



Kuva 2. Eri talteenottomenetelmien periaatteet. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

3 IGCC JA NGCC LAITOKSET

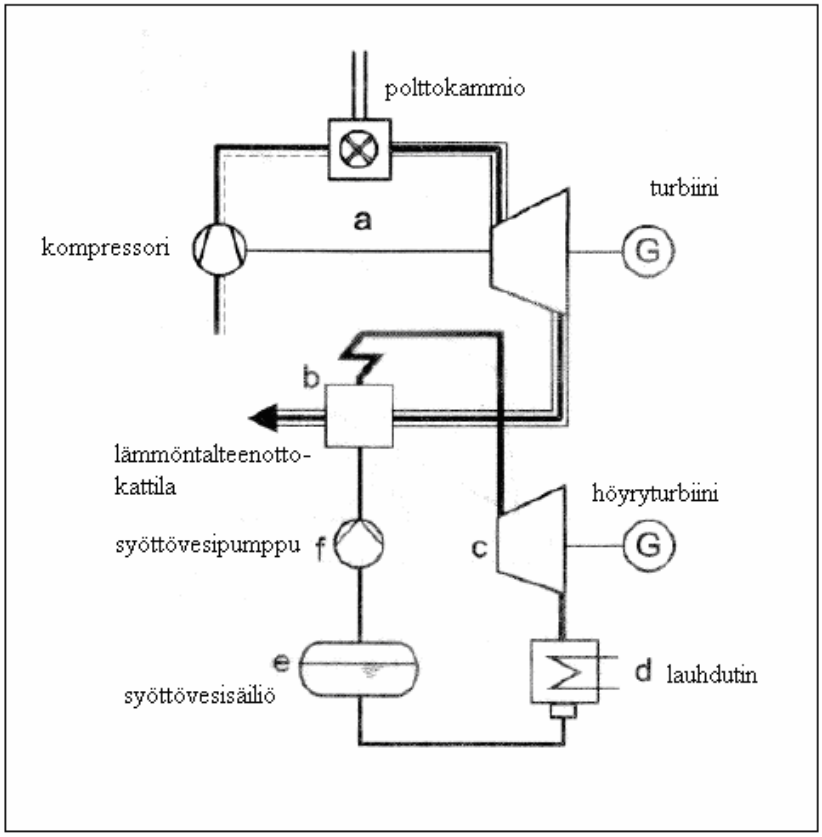
Ennen polttoa tapahtuvaa talteenottoa käyttävät voimalaitokset ovat kombivoimalaitoksia, eli joko IGCC- tai NGCC-laitoksia. Kombivoimalaitos tarkoittaa laitostyyppiä, joka koostuu yhdistetystä kaasu- ja höyrykierrosta. Perinteistä maakaasua polttoaineenaan käyttävää laitosta kutsutaan NGCC:ksi (Natural Gas Combined Cycle) ja kaasutettua kiinteää polttoainetta käyttävää laitosta kutsutaan IGCC:ksi (Integrated Gasification Combined Cycle). Kombivoimalaitoksia on ollut käytössä jo kauan. Ensimmäiset NGCC-laitokset otettiin käyttöön 1970 luvun alussa, ja nykyisin ne ovat jo laajassa käytössä. Ensimmäiset IGCC-demolaitokset aloittivat toimintansa 1990 luvun alussa, ja ensimmäinen kaupallisen mittakaavan laitos otettiin käyttöön 1990-luvun loppupuolella. Tällä hetkellä kivihiiltä polttoaineenaan käyttäviä IGCC-laitoksia on toiminnassa 5 kappaletta. Näistä kaksi sijaitsee USA:ssa, kaksi Euroopassa ja yksi Japanissa. Lisäksi Italiassa otettiin 2000-

luvun alussa käyttöön kolme öljyjalostamoiden pohjaöljyjä polttoaineenaan käyttävää laitosta. (Raiko ym. 2002)

Kombivoimalaitoksilla saavutettavia hyötyjä ovat mm. korkea hyötysuhde sekä rakennussuhteen (sähkön osuus kokonaisenergiasta) kasvaminen yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Laitostyypit soveltuvat myös hyvin hiilidioksidin talteenottoon, mutta tämä huomattiin vasta jälkikäteen, joten niitä ei siis alun perin suunniteltu hiilidioksidin talteenottoa ajatellen. Kaikki tällä hetkellä toimivat kaupallisen mittakaavan kombilaitokset toimivat ilman hiilidioksidin talteenottoa, mutta useita koelaitoksia ja laajamittaista tutkimusta on kuitenkin asiaan liittyen meneillään tällä hetkellä. (Raiko ym. 2002)

3.1 NGCC

NGCC-laitos ilman hiilidioksidin talteenottoa on perinteinen kombivoimalaitos. Kombiprosessi koostuu kaasu- ja höyrykierrosta (kuva 3). Yksinkertaistettuna kaasuturbiinikierto koostuu kompressorista, polttokammiosta, turbiinista ja generaattorista, ja höyrykierto syöttövesisäiliöstä, syöttövesipumpusta, lämmön talteenottokattilasta, höyryturbiinista, lauhduttimesta sekä generaattorista.

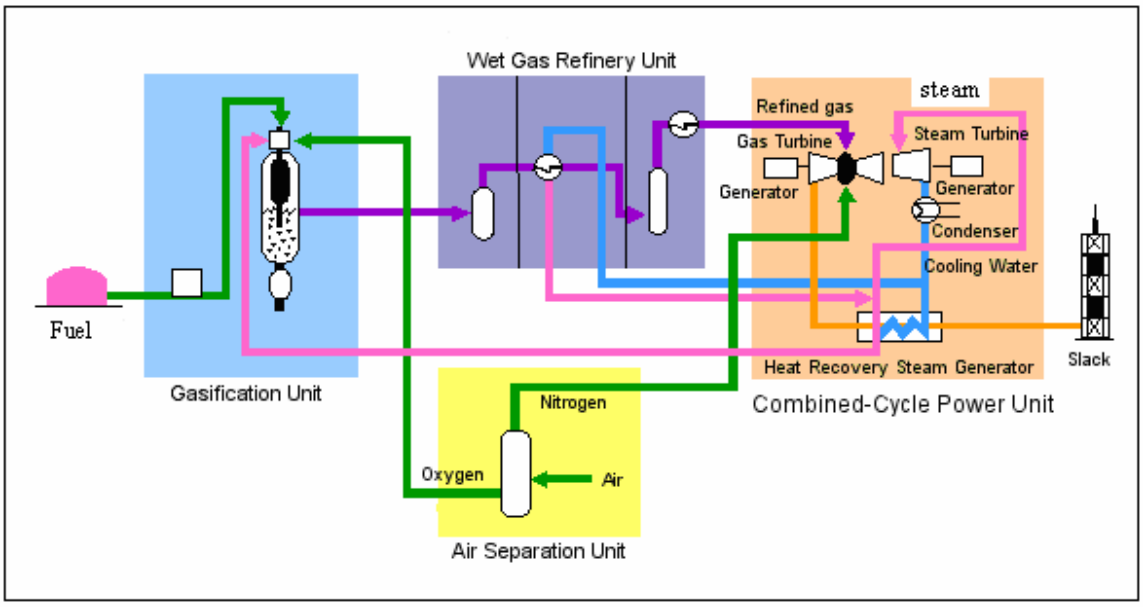


Kuva 3. Kombilaitoksen periaate. (Voimalaitosoppi, 2008)

Aluksi ilman painetta nostetaan kompressorissa, jonka jälkeen se johdetaan polttokammioon lämmitettäväksi. Polttokammiossa maakaasua poltetaan ilmavirrassa ja syntyvät, korkeassa lämpötilassa ja paineessa olevat savukaasut johdetaan turbiiniin. Turbiinissa savukaasut paisuvat, jolloin turbiini saadaan pyörimään ja saadaan tuotettua tehoa. Tällä tuotetulla teholla pyöritetään kompressoria ja generaattoria. Kaasuturbiinista poistuvat savukaasut johdetaan lämmön talteenottokattilaan, jossa savukaasuista vapautuvalla lämmöllä höyrystetään vettä. Tämän jälkeen savukaasut päästetään piipusta ulos, ja höyrystynyt vesi johdetaan höyryturbiinin läpi, jolloin saadaan tuotettua sähköä. Höyryturbiinista poistuva höyry lauhdutetaan lauhduttimessa vedeksi, ja pumpataan takaisin lämmön talteenottokattilaan uutta kiertoa varten. (Mroueh ja Loikkanen, 1998)

3.2 IGCC

IGCC-laitos on periaatteeltaan pitkälti NGCC:n kaltainen. Suurin ero laitosten välillä on IGCC:ssä vaadittava polttoaineen kaasutus. IGCC-laitoksessa käytettävä kiinteä polttoaine on aluksi kaasutettava jotta sen käyttö kaasuturbiinissa olisi mahdollista. Kuvassa 4 on esitetty tyypillinen IGCC-laitos, jossa on käytössä happikaasutus ja kaasujen märkäpuhdistustekniikka, kuten kaikissa käytössä olevissa suuremman mittaluokan (yli 235MW) laitoksissa. Lisäksi kuvasta näkyy typen kierrätys, joka on varsin tyypillinen ratkaisu poltettaessa vetypitoista kaasua. Hapen kaasutuksessa jäännöstuotteena syntynyt typpi johdetaan kaasuturbiiniin palamislämpötilan alentamiseksi.



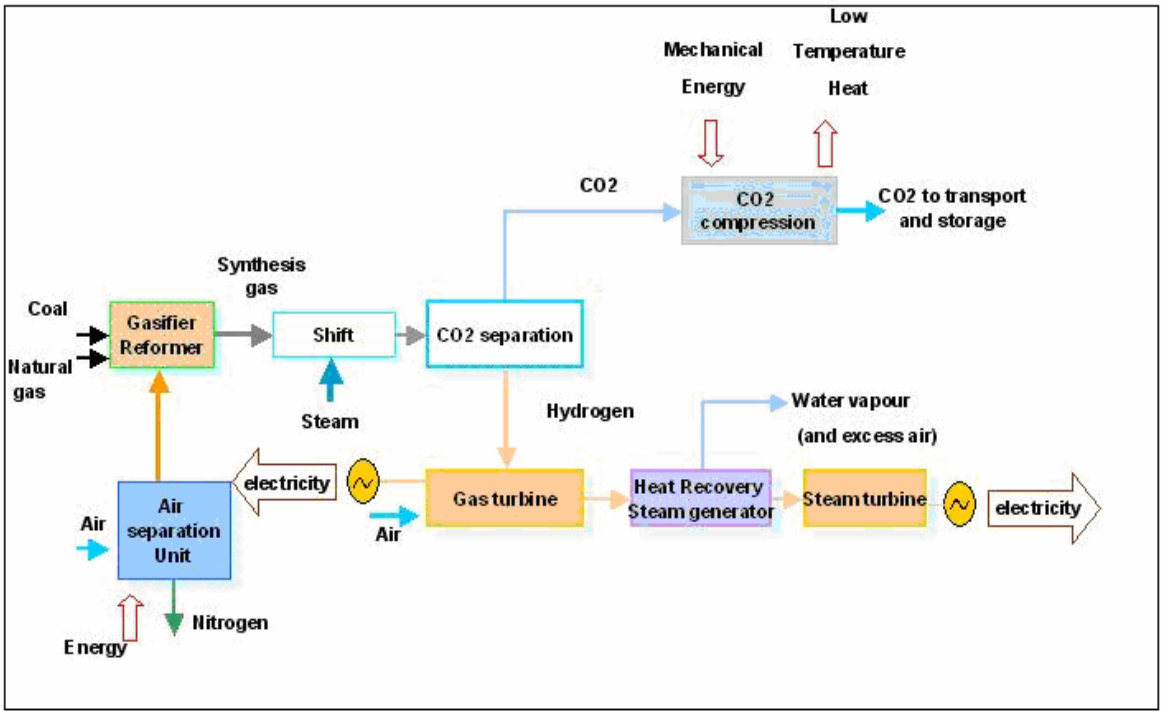
Kuva 4. IGCC laitos, jossa ei CO2 talteenottoa. (Toshiba)

Aluksi polttoaine esikäsitellään, joka käsittää yleensä kuivauksen ja pölyksi jauhamisen. Tämän jälkeen hienojakoinen pöly paineistetaan ja syötetään kaasuttimeen yhdessä hapen kanssa. Usein kaasutusprosessia käytetään mukana myös höyryä. Tuloksena saadaan kaasuseos, joka koostuu hiilimonoksidista ja vedystä. Kaasutuksessa hiilen tuhka sulaa, ja tämä tuhka jäähdytetään, ja poistetaan kuonana kaasuttimen alakautta. Syntyneestä tuotekaasusta poistetaan tuhkapartikkelit. Tämän jälkeen kaasuseos jäähdytetään ja

puhdistetaan, jonka jälkeen se on valmis poltettavaksi polttokammiossa. Loppuosa kierrosta on hyvin pitkälti NGCC:n kaltainen. (Raiko ym. 2002)

4 IGCC JA NGCC TALTEENOTOLLA

Hiilidioksidin talteenoton lisääminen IGCC- tai NGCC-laitoksiin vaatii monia muutoksia perinteiseen laitoskokoonpanoon. Seuraavaksi kerrotaan mitä nämä muutokset ovat pääpiirteittäin, ja kuinka talteenotto käyttävät laitokset toimivat. Myöhempänä työssä perehdytään vielä tarkemmin talteenoton eri osa-alueisiin.



Kuva 5. Hiilidioksidin talteenotolla varustettu IGCC/NGCC laitos. (Encapco2)

4.1 NGCC

Hiilidioksidin talteenoton lisääminen NGCC-laitokseen tuo mukanaan seuraavat lisävaiheet:

- Epäpuhtauksien poisto maakaasusta ennen reformointia
- Reformointi
- Hiilimonoksidin muunto hiilidioksidiksi
- Hiilidioksidin ja vedyn erotus
- Hiilidioksidin kompressointi ja puhdistus
- Hiilidioksidin siirtolinjasto ja mahdolliset väliaikaiset varastointitilat

Viimeksi mainittu on sinänsä tärkeä osa-alue hiilidioksidin talteenotossa, mutta sitä ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä. Myös hiilidioksidin kompressointi ja puhdistus jätetään vähemmälle huomiolle.
(ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

NGCC:ssä maakaasu on aluksi reformoitava, jotta saadaan muodostettua vetyä ja hiilimonoksidia sisältävä kaasuseos. Reformointi on IGCC:ssä käytettävää kaasutusta muistuttava reaktio. Reformoinnissa maakaasua käsitellään vesihöyryllä, jolloin muodostuu vedyn ja hiilimonoksidin seos. Ennen reformointia maakaasusta on kuitenkin poistettava sellaiset epäpuhtaudet, kuten rikki ja kloori, koska nämä aiheuttavat ongelmia reformoinnissa käytetyille katalyyteille. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Reformoinnin tuloksena syntyneen kaasuseoksen sisältämä hiilimonoksidi on muutettava hiilidioksidiksi talteenoton mahdollistamiseksi. Tämä muunto-operaatio tapahtuu käsittelemällä kaasuseosta vesihöyryllä. Seuraavaksi on vuorossa vedyn ja hiilidioksidin erotus. Tässä yhteydessä poistetaan myös kaasuseoksen sisältämä rikki. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Vedyn ja hiilidioksidin erotukseen on olemassa useita vaihtoehtoja, kuten fysikaalinen ja kemiallinen absorptio, adsorptio ja membraanit. Periaatteena on kaikissa se, että kaasuseos johdetaan erotuslaitteiston läpi, jolloin tuloksena saadaan vetyä ja hiilidioksidia. Rikki poistetaan usein tässä samassa yhteydessä samalla menetelmällä kuin millä vety ja hiilidioksidi erotetaan. Menetelmien tarkemmat kuvaukset löytyvät kappaleesta kahdeksan. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Hiilidioksidin jatkokäsittely vaatii kompressorin, puhdistusyksikön, siirtolinjaston sekä mahdollisen väliaikaisen varastointitilan. Kompressorilla kaasumaisessa olomuodossa olevan hiilidioksidin painetta nostetaan, jolloin hiilidioksidi muuttuu nestemäiseksi. Tuotetussa hiilidioksidissa on aina jonkun verran epäpuhtauksia mukana, jonka takia hiilidioksidi puhdistetaan vielä lopuksi. Tämän jälkeen CO_2 siirretään joko putkilinjoja pitkin tai kuljetetaan autolla/laivalla varastoitavaksi. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Erotuksen tuloksena saatu vety poltetaan polttokammiossa. Vetypitoisen kaasun palaminen vaatii kaasuturbiiniltakin muutoksia perinteisissä laitoksissa käytettyihin kaasuturbiineihin verrattuna. Palamislämpötilat ovat korkeammat kuin normaalisti, ja usein vedyn sekaan sekoitetaankin typpeä palamislämpötilan alentamiseksi materiaalikestävyyden takaamiseksi. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Kaasuturbiinin jälkeinen osa on pitkälti perinteisen ilman talteenottoa toimivan IGCC:n/NGCC:n kaltainen. Polttokammiossa poltetaan tuotettua vetypitoista kaasua ja syntyvät, korkeassa lämpötilassa ja paineessa olevat savukaasut johdetaan turbiinin läpi. Turbiinin tuottamalla teholla pyöritetään kompressoria ja generaattoria. Savukaasujen lämpö otetaan talteen jätelämpökattilassa, ja tällä lämmöllä höyrystetään vettä, jonka avulla pyöritetään höyryturbiinia. Höyryturbiinin tuottamalla teholla pyöritetään tuttuun tapaan generaattoria, jonka avulla saadaan tuotettua sähköä. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

4.2 IGCC

Hiilidioksidin talteenoton lisääminen IGCC-laitokseen vaikuttaa lähinnä kaasutuksessa syntyvän tuotekaasun jatkokäsittelyyn. Nämä vaadittavat jatkokäsittelyvaiheet ovat hiilimonoksidin muunto hiilimonoksidiksi, sekä hiilidioksidin ja vedyn erotus, jotka ovat tuttuja NGCC:nkin yhteydestä.

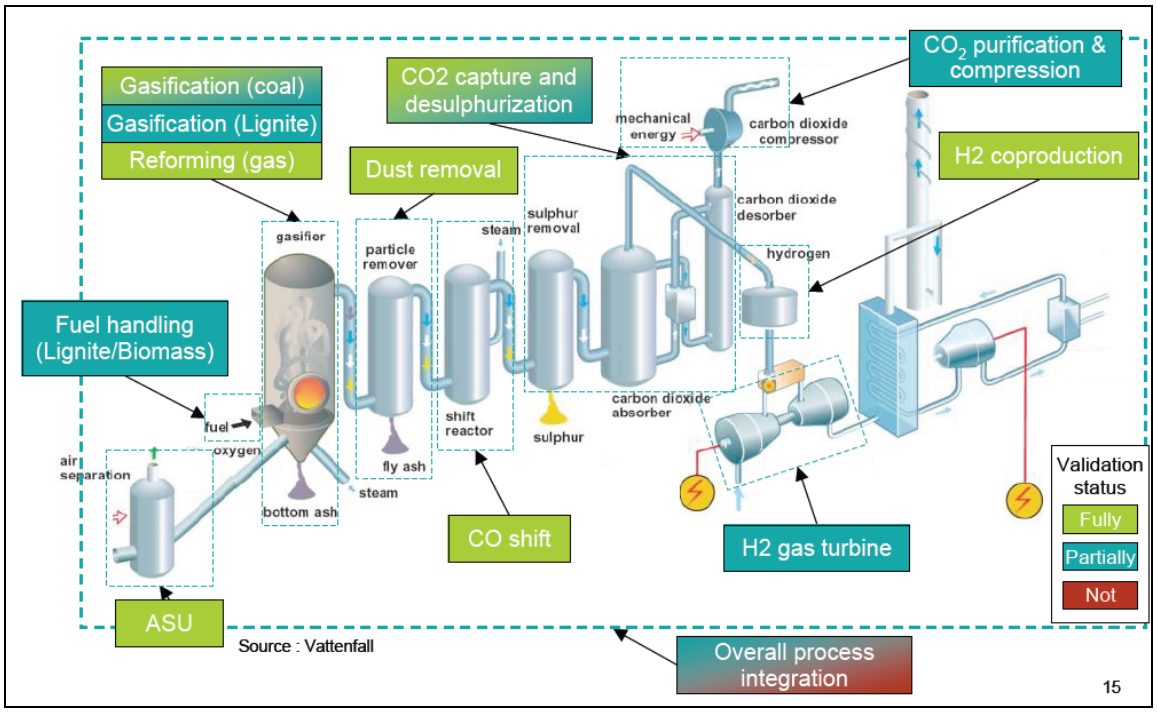
Kaasuseoksen jatkokäsittelyvaiheet ovat hyvin samankaltaisia kuin NGCC-laitoksessakin. Muutama eroavaisuuskin tosin löytyy. IGCC-laitos vaatii tuhkapartikkeleiden erotusyksikön kaasuttimen jälkeen. NGCC:ssä käytettävää maakaasua poltettaessa tuhkaa ei synny, joten siinä tätä vaihetta ei tarvita. Toisaalta tuhkapartikkeleiden poisto sisältyy ilman talteenottoakin toimivan IGCC:n kokoonpanoon. Toinen eroavaisuus on rikinpoisto. IGCC-laitoksessa rikinpoisto suoritetaan yleensä hiilidioksidin talteenoton yhteydessä, kun taas NGCC-laitoksessa rikinpoisto suoritetaan jo ennen reformointia. IGCC-laitoksessa rikinpoisto suoritetaan yleensä samalla menetelmällä kuin millä hiilidioksidi talteenotetaan. Tätä prosessia varten voi olla oma erillinen kierto, tai sitten rikinpoisto voidaan suorittaa samassa yhteydessä kun hiilidioksidin talteenotto. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Muutoin IGCC-laitos ei juurikaan eroa NGCC-laitoksesta. Vedyn ja hiilidioksidin erotukseen käytetyt menetelmät poikkeavat ehkä hieman riippuen siitä kummasta laitostyypistä on kyse. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

5 TALTEENOTTOTEKNIIKAN ERI OSA-ALUEET

Hiilidioksidin talteenottotekniikka voidaan jaotella pienempiin osa-alueisiin, jolloin kokonaisuuden ymmärtäminen on helpompaa. Tässä yhteydessä käsitellään niitä osa-alueita, joihin talteenottotekniikka vaikuttaa, ja tämän takia esim. höyrykierto jätetään huomiotta. Nämä osa-alueet ovat tekniikkana pääsääntöisesti tuttuja muistakin yhteyksistä, mutta niiden soveltaminen voimalaitosmittakaavassa, ja varsinkin eri osa-alueiden yhdistäminen ja optimointi onkin kokonaan uusi haaste. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Kuvassa 6 on eritelty talteenottotekniikan eri osa-alueet. Kuvasta huomataan, että varsinainen hiilidioksidin talteenottovaihe, eli hiilidioksidin erotus vedystä, on vain pieni osa koko prosessia. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)



Kuva 6. CO2:n talteenotolla varustetun IGCC/NGCC laitoksen eri osa-alueet. (CO2 Capture and Storage (CCS) - Matrix of Technologies, 2008)

Kuvan oikeassa alanurkassa näkyvä ”validation status” kertoo kunkin osa-alueen kehitysvaiheen.

Eri kehitysvaiheiden selvennykset:

Fully: Laajempaa kaupallista kokemusta
Partially: Valmis isoon demoprojektiin
Not: Ei testattu / vain pienen mittakaavan testausta

Eri osa-alueet:

ASU (Air Separation Unit) = hapen valmistus
Fuel Handling = polttoaineen käsittely
Gasification/Reformation = kaasutus/reformointi
Dust removal = savukaasun puhdistus
CO Shift = hiilimonoksidin muuntaminen hiilidioksidiksi
CO2 capture and desulphurizatioin = rikin ja hiilidioksidin poisto
H2 Coproduction = vedyn käsittely ennen polttokammioon syöttöä
H2 Gas turbine = kaasuturbiini
Overall process intergration = prosessi integrointi
CO2 purification and compression = hiilidioksidin puhdistus ja kompressointi

(ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Seuraavaksi annetaan tarkempi kuvaus prosessin päävaiheista. Myöhempänä työssä perehdytään vielä syvällisemmin joihinkin prosessin pääkohtiin

5.1 Hapen valmistus

Happea tarvitaan kaasutettaessa kiinteitä polttoaineita. Aikaisemmin on ollut käytössä myös ilmakaasutukseen perustuvia prosesseja, mutta kaikki nykyiset IGCC-laitokset perustuvat happikaasutukseen. Hapen valmistus on nykytekniikalla kallista, mutta toisaalta hapella kaasutettaessa saavutetaan korkeampi hyötysuhde, joka osaltaan kompensoi hapen valmistuksen kuluja.

Happea käyttävissä laitoksissa laitoksen yhteydessä on oma erillinen hapen valmistusyksikkö. Tällä hetkellä eniten käytetty tekniikka hapen valmistuksessa on kryogeeninen menetelmä. Kryogeeninen menetelmä perustuu typen ja hapen, joista ilma siis pääosin koostuu, eri kiehumispisteisiin. Menetelmässä ilma aluksi kompressoidaan ja jäähdytetään. Tämän jälkeen pääasiassa nestemäisessä muodossa oleva ilma syötetään tislausastiaan, jossa happi ja typpi erotetaan. Typen ja hapen kiehumispisteet eroavat toisistaan, jolloin sopivassa lämpötilassa typpi saadaan kiehumaan ja muuttumaan höyrymäiseksi hapen pysyessä nestemäisenä. Happi poistetaan nestemäisenä, ja pumpataan jatkokäyttöön, ja typpi poistetaan kaasumaisessa muodossa. Menetelmää soveltuu erityisesti silloin, kun on tarkoitus tuottaa happea suuressa mittakaavassa, ja vaadittava puhtausaste on suuri. Menetelmällä päästään yli 99%:n puhtausasteeseen, kun taas muilla tekniikoilla saavutettava puhtausaste on n.50-95%. Lisäksi menetelmän etuna on mahdollisuus tuottaa happi joko kaasumaisessa tai nestemäisessä muodossa. Muilla kilpailevilla teknologioilla, kuten adsorptiolla ja membraaneilla, tuotto rajoittuu yleensä kaasumaiseen muotoon.
(Raiko ym. 2002; Grasys; Universal Industrial Plants Mfg. Co)

5.2 Polttoaineen esikäsittely

Polttoaineen käsittely riippuu paljon käytettävästä polttoaineesta. Kivihiili kuivataan ja jauhetaan pölyksi ennen kaasutusreaktoriin syöttämistä. Lisäksi pölyn sekaan lisätään kalkkia tuhkan sulamiskäyttäytymisen parantamiseksi. Lopuksi pölytetty hiili paineistetaan ja syötetään kaasutusreaktoriin. Maakaasua käytettäessä ennen reformointia on suoritettava maakaasun puhdistus, jotta reformerissa olevat

reformointia nopeuttavat katalyytit kestäisivät pidempään. Puhdistus koostuu pääosin rikin ja kloorin poistosta. Raiko ym. 2002; Get Energy Smart)

5.3 Kaasutus/reformointi

Kaasutuksessa/reformoinnissa polttoainetta käsitellään hapen ja/tai vesihöyryn avulla. Tällöin saadaan tuotettua pääosin vedystä ja hiilimonoksidista koostuva seos. Prosessin tarkempi kuvaus esitetään myöhempänä työssä. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

5.4 Savukaasujen puhdistus

Savukaasujen puhdistus on tärkeää, jotta päästäisiin mahdollisimman hyvään puhtausasteeseen niin vedyn kuin hiilidioksidin osalta. Puhdistusmenetelmät jaetaan kylmäpuhdistusmenetelmiin (märkäpuhdistus) ja kuumapuhdistusmenetelmiin (kuivapuhdistus). Kaikissa tällä hetkellä käytössä olevissa IGCC-laitoksissa on käytössä märkäpuhdistus. Käytettävät menetelmät riippuvat käytettävästä polttoaineesta ja vaadittavasta puhtausasteesta. Tyypillisiä suodatusmenetelmiä ovat mm. märkä ja kuiva sähköstaattinen suodatus, kangassuodatin sekä syklonierotus. Maakaasua käytettäessä tuhkapartikkeleita ei synny, joten erillistä pölynpoistoyksikköä ei tällöin tarvita. (Raiko ym. 2002)

5.5 Hiilimonoksidin muunto hiilidioksidiksi

Koska hiilimonoksidin poisto suoraan vetyä ja hiilimonoksidia sisältävästä kaasuseoksesta on ongelmallista, täytyy hiilimonoksidi muuttaa hiilidioksidiksi. Tämä tapahtuu käsittelemällä tuotekaasua vesihöyryllä, jolloin hiilimonoksidi muuttuu hiilidioksidiksi. Menetelmän tarkempi kuvaus esitellään myöhempänä työssä. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

5.6 Rikin poisto ja hiilidioksidin talteenotto

Monissa nykyisissä sovelluksissa rikinpoisto tapahtuu hiilidioksidin poiston yhteydessä. Toinen vaihtoehto on asettaa laitokseen erillinen rikinpoisto yksikkö. Maakaasua käytettäessä rikinpoisto suoritetaan jo ennen reformointia, sillä rikki aiheuttaa ongelmia reagoidessaan reformointiastiassa olevien katalyyttien kanssa. Hiilidioksidin erottamiseen käytetään tällä hetkellä useimmiten joko fysikaalista tai kemiallista absorptiota. Talteenotettu hiilidioksidi siirretään putkilinjoja pitkin jatkokäsiteltäväksi. Hiilidioksidin talteenoton tarkempi kuvaus esitellään myöhempänä työssä. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

5.7 Vedyn käsittely ennen polttokammioon syöttöä

Polttokammioon syötettävän vedyn käsittely vaatii erikoisratkaisuja. Oleellisinta on, että vedyn sekaan pystytään lisäämään kontrolloidusti typpeä. Lisäksi paineen on oltava sopiva. Vaikka vedylle on saavutettu jopa 99,9%:n puhtausaste, niin nykyisillä kaasuturbiineilla vedyn sekaan sekoitetaan kuitenkin usein typpeä palamislämpötilan alentamiseksi materiaalikestävyyden takaamiseksi. Sopivan palamispaineen takaamiseksi vedyn painetta pitää kyetä tarvittaessa nostamaan ennen polttokammiota. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

5.8 Kaasuturbiini

Kehityksen alla ovat kaasuturbiinit, jotka pystyvät polttamaan korkeassa paineessa vetyä, jonka puhtausaste on lähellä 100%:a. Tällä hetkellä tämä ei vielä onnistu kontrolloidusti, ja vetyä joudutaan laimentamaan typellä. Tavoitteena on tällä hetkellä löytää sopiva tasapaino polttoaineen syöttönopeuden, polttopaineen, palamislämpötilan ja vedyn puhtauden välillä siten, että saadaan aikaan mahdollisimman tehokas, mutta samalla turvallinen palaminen.

5.9 Hiilidioksidin puhdistus ja kompressointi

Talteenotettu hiilidioksidi muutetaan lopuksi nestemäiseksi kompressorin avulla painetta nostamalla. Tämän jälkeen hiilidioksidi puhdistetaan, sillä talteenotetussa hiilidioksidissa on aina jonkun verran epäpuhtauksia mukana. Puhdistuksen jälkeen hiilidioksidi siirretään joko putkilinjoja pitkin tai autolla/laivalla kuljettamalla varastoitavaksi. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

5.10 Prosessi integrointi

Prosessin integrointi koostuu pienten osa-alueiden kasaamisesta toimivaksi kokonaisuudeksi. Kokonaisuuden optimoinnissa on vielä paljon tehtävää, vaikka moni osa-alue yksinään toimiikin. Oleellisimpia kysymyksiä integroinnissa ovat korkea puhtausaste vedyn ja hiilidioksidin tuoton osalta, tekniikan toimimisvarmuus, kustannukset sekä näiden vaikutus hyötysuhteeseen. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

6 REFORMOINTI/KAASUTUS

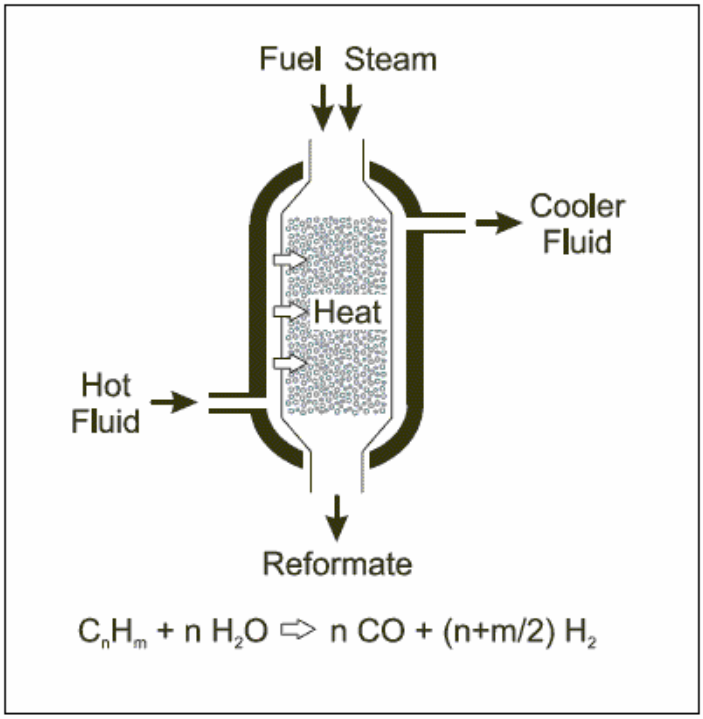
6.1 Höyryreformointi

Höyryreformointi on teollisuudessa tällä hetkellä vallitseva tapa vedyn tuottamiseen. Höyryreformointi tulee kyseeseen useimmiten silloin, kun polttoaineena käytetään maakaasua. Maakaasua käytettäessä prosessista puhutaan nimellä SMR (steam methane reforming), sillä maakaasu koostuu pääosin metaanista. Tekniikka soveltuu myös mm. öljylle, mutta reformoinnin käyttö tässä tarkoituksessa on harvinaisempaa. (IPCC, 2005)

Prosessissa polttoaine reagoi vesihöyryn kanssa, jolloin tuotekaasuna muodostuu pääosin hiilimonoksidia ja vetyä.

$$C_xH_y + xH_2O \leftrightarrow xCO + (x + \frac{y}{2})H_2 \qquad (1)$$

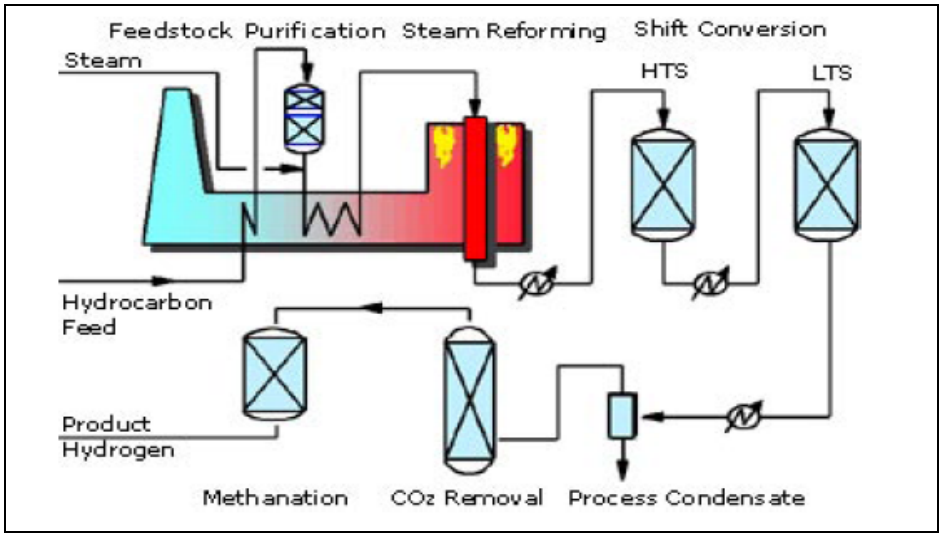
Reaktio on endoterminen, eli vaatii ylimääräistä lämpöä toteutuakseen. Reformointi perustuu siihen, että reformointiastiassa maakaasu reagoi höyryä kanssa katalyytin läsnä ollessa, jolloin metaani hajoaa vedyksi ja hiilimonoksidiksi. Katalyyttina on käytetty perinteisesti nikkelipohjaisia materiaaleja. Kuvassa 7 on esitetty tyypillinen reformointiastia. (IPCC, 2005)



Kuva 7. Tyypillinen reformointiastia. Polttoaine ja höyry tulevat yläkautta ja tuotekaasu poistuu alakautta. (In Genuity Creations, 2008)

Reformointi vaatii n. 800-900 $^{\circ}C$:n lämpötilan ja 20-35 baarin paineen. Reformoinnissa tarvittava lämpö tuotetaan polttamalla osa maakaasusta reformointiastian ulkopuolella. Tuotettu hiilidioksidista ja hiilimonoksidista koostuva kaasuseos on jäähdytettävä jatkokäsittelyvaiheita ajatellen. Tässä jäähdytyksessä vapautuva lämpö otetaan talteen, ja johdetaan reformointiastiaan, jossa tarvitaan korkeaa lämpötilaa. Näin saadaan reformoinnin kokonaishyötysuhde nostettua jopa 85%:iin. Kuvassa 8 on esitettynä reformoinnin periaatekuva. (Get Energy Smart)

Höyryreformointi on varsin ympäristöystävällinen tapa, sillä päästöjä ei juurikaan synny. Muina prosessin etuina voidaan pitää laajaa kaupallista kokemusta prosessista sekä hyvää hyötysuhdetta. Haittapuolena on sen huono soveltuvuus muille polttoaineille. Lisäksi reformointi on kallista, ja ongelmana sen kannattavuuden lisäämisessä on se, että prosessi on jo tällä hetkellä lähellä teoreettista maksimia, eli hyötysuhteen nosto on vaikeaa. (Get Energy Smart)



Kuva 8. Reformoinnin periaatekuva. Kuvassa esitetty reformoinnin lisäksi kaasuseoksen jatkokäsittelyvaiheita. Kuvassa vasemmassa ylänurkassa maakaasun puhdistusyksikkö, jota seuraa varsinainen reformointivaihe. Tämän jälkeen on vuorossa muut CO2:n talteenottoon vaadittavat vaiheet, kuten hiilimonoksidin muunto hiilidioksidiksi (HTS- ja LTS-yksiköt (high temperature shift ja low temperature shift)), sekä hiilidioksidin erotus vedystä. (Get Energy Smart)

6.2 Kaasutus

Kaasutuksessa kiinteä polttoaine on lämpötilassa, joka saisi normaalisti aikaan sen syttymisen, mutta varovaisesti hapen ja/tai höyryn määrää säätelemällä saadaan kiinteä polttoaine sen sijaan kaasuuntumaan. Kaasutuksessa on käytetty myös ilmaa puhtaan hapen sijasta, mutta nykyiset IGCC-laitokset käyttävät kaikki happeen perustuvaa kaasutusta. Kaasutuksesta puhutaan myös nimellä POX (partial oxidation), eli epätäydellinen hapetus. Kaasutusta on tehty myös ilmanpaineisena, mutta kaikki nykyisin käytössä olevat ja laitokset perustuvat paineistettuun kaasutukseen. (Merichem; Raiko ym. 2002)

Kaasutusta käytetään kun halutaan muuttaa kiinteät polttoaineet, kuten hiili tai biopolttoaineet, kaasumaiseen muotoon. Kaasutuksessa polttoaine reagoi puhtaan hapen kanssa, jolloin tuotekaasuksi saadaan höyryreformoinnin tapaan pääosin hiilimonoksidista ja vedystä koostuva seos.

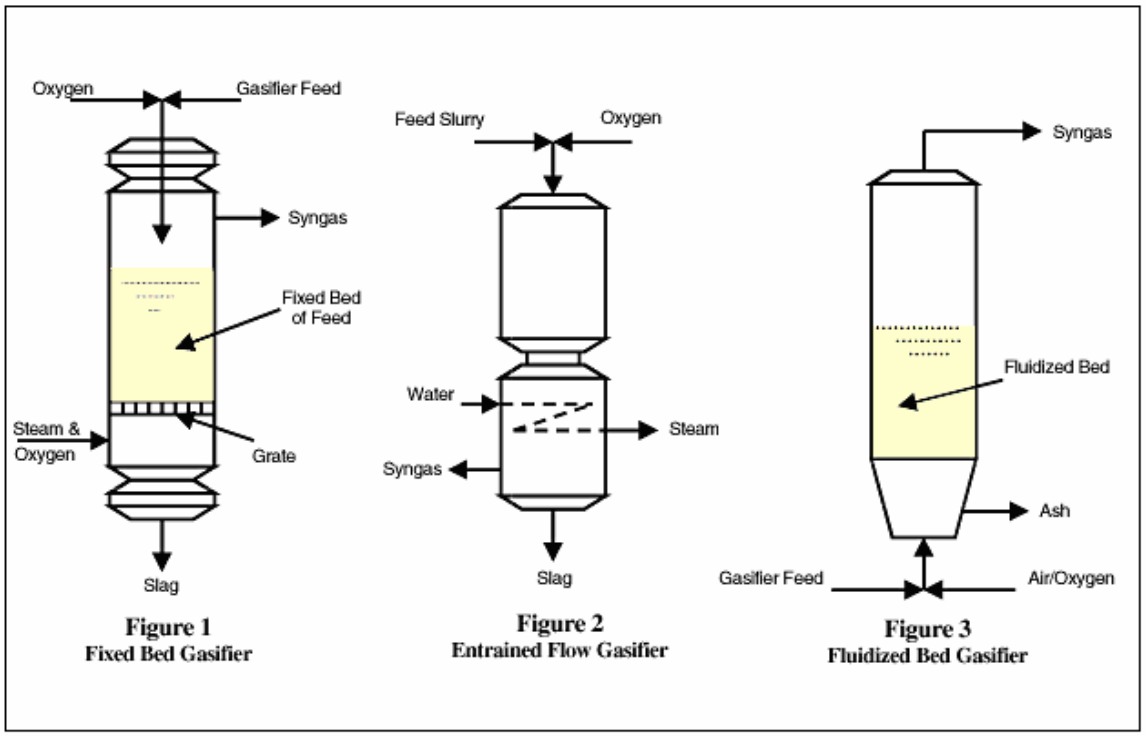
$$C_xH_y + \frac{x}{2}O_2 \leftrightarrow xCO + \frac{y}{2}H_2 \qquad (2)$$

Reaktio on endoterminen eli vaatii ylimääräistä lämpöä toteutuakseen. Useissa nykyisissä sovelluksissa käytetään prosessissa myös höyryä hapen lisäksi. (Merichem)

Nykyisin on käytössä kolme eri kaasutintyyppiä, jotka ovat kiinteäpeti-, leijupeti-, sekä pölykaasutin (kuva 9). Kaasuttimessa on n.1000 – 1500$^\circ C$:n lämpötila paineen ollessa n.20-85 baria. Polttoaine syötetään astiaan, jonka jälkeen astiaan lisätään kontrolloidusti happea ja mahdollisesti myös höyryä. (Merichem)

Kiinteän petin kaasutin toimii tavallisesti vastavirtaperiaatteella. Prosessi koostuu 4 vaiheesta, jotka ovat polttoaineen kuivuminen, pyrolyysi, kaasutus (pelkistys) ja poltto (hapetus). Polttoaine syötetään kaasuttimeen yläosasta ja happi ja höyry alaosasta. Kun polttoaine, happi ja höyry reagoivat, syntyy pääosin vedystä ja hiilimonoksidista koostuva seos, joka poistetaan säiliön yläkautta. Sivutuotteena syntyy lisäksi epäorgaanisesta aineksesta muodostuvaa tuhkaa, joka poistetaan alakautta. Pölykaasuttimessa kaasutettava polttoaine sekoitetaan veteen, ja tämä syntyvä seos syötetään säiliön yläosasta. Lisäksi säiliön yläosasta syötetään kaasuttimeen myös happi. Syntyvä tuotekaasu ja sula tuhka poistetaan alakautta. Leijupetikaasuttimessa polttoaine, happi ja höyry syötetään kaasuttimeen alakautta, ja syntyvä tuotekaasu poistetaan yläkautta ja tuhka alakautta. (Merichem)

Kaasutus on varsin ympäristöystävällinen vaihtoehto. Syntyvät päästöt ovat varsin pienet jopa silloin, kun käytetään polttoaineena paljon rikkiä sisältäviä hiililaatuja. Sivutuotteena syntyvä tuhka on mahdollista käyttää esim. tienrakennuksessa pohjamateriaalina tai muussa rakennusteollisuudessa. (Merichem)



Kuva 9. Eri tyyppisiä kaasuttimia. Kaasutintyypit ovat vasemmalta oikealle mentäessä kiinteäpeti-, pöly- ja leijpetikaasutin. (Merichem)

6.3 ATR

ATR:ää (autothermal reforming) voidaan pitää kaasutuksen ja reformoinnin yhdistelmänä. ATR:ssä prosessin tarvitsema lämpö tuotetaan polttamalla osa maakaasusta reformointiastian sisällä. Tämä polttaminen tapahtuu reaktion (2) mukaisesti käyttäen joko puhdasta happea tai ilmaa. Tämän lisäksi prosessiin syötetään höyryä, jolla varsinainen vedyn muodostus toteutetaan (reaktioyhtälö 1). Höyryn mukanaolo prosessissa mahdollistaa polttoaineen korkean muuntamisasteen vedyksi matalassa lämpötilassa. Lämpötila vaihtelee tapauskohtaisesti 950-1050 $^{\circ}C$ välillä. (IPCC, 2005)

ATR:n etuna SMR:ään verrattuna voidaan pitää hiilidioksidipäästöjen vähäisyyttä, sekä investointikustannusten pienuutta. SMR:n etuna voidaan taas pitää korkeampaa hyötysuhdetta. SMR:ssä prosessin tarvitsema lämpö tuodaan ulkoisesta lähteestä, jolloin

hiilidioksidipäästöjä pääsee syntymään, kun taas ATR:ssä prosessin tarvitsema lämpö tuotetaan reformointiastiassa, ja tästä lämmöntuotosta syntyvät hiilidioksidipäästöt saadaan puhdistettua varsinaisen hiilidioksidin talteenoton yhteydessä. (IPCC, 2005)

7 HIILIMONOKSIDIN MUUNTO HIILIDIOKSIDIKSI

Jotta hiilidioksidin talteenotto olisi mahdollista, on reformoinnissa/kaasutuksessa syntyvä tuotekaasu käsiteltävä höyryllä, jotta kaasuseoksen sisältämä hiilimonoksidi saataisiin muunnettua hiilidioksidiksi.

Reaktioissa (1) ja (2) saatua tuotekaasua käsitellään höyryllä katalyytin läsnä ollessa, jolloin tapahtuu reaktio

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$$

Reaktio on eksoterminen eli siinä vapautuu ympäristöön lämpöä. (IPCC, 2005)
Tämän reaktion toteuttamiseen on käytössä kaksi eri vaihtoehtoa. Toinen näistä vaatii sen, että rikki on poistettu jo aiemmin prosessissa (sweet shift), ja toisessa vaihtoehdossa rikki poistetaan hiilidioksidin poiston yhteydessä (sour shift). Jälkimmäisessä vaihtoehdossa karbonyylisulfidi (COS) hydrolysoidaan (COS reagoi vedyn kanssa) rikkivedyksi (H_2S), ja poistetaan usein samalla menetelmällä kun millä hiilidioksidi talteenotetaan. Maakaasua käytettäessä rikinpoisto suoritetaan yleensä ennen reformointia, jolloin hiilimonoksidin muunnossa käytetään tällöin sweet shift - menetelmää. Muuntoreaktio toteutetaan tarvittaessa useammassa vaiheessa, jolloin on tyypillistä, että eri vaiheet tapahtuvat eri lämpötiloissa. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

8 HIILIDIOKSIDIN JA VEDYN EROTUS

Hiilidioksidin ja vedyn erotukseen on käytössä useita eri vaihtoehtoja: fysikaalinen ja kemiallinen absorptio, adsorptio ja membraanit. Käytettävä menetelmä riippuu vetypitoisuudesta, kaasuseoksen paineesta sekä vaadittavasta puhtausasteesta. Toistaiseksi yleisin menetelmä erotukseen on fysikaalinen absorptio varsinkin suuremmissa paineissa. Kemiallista absorptiota on käytetty kun hiilidioksidin osapaine on alle 15 baaria. (IPCC, 2005)

8.1 Fysikaalinen absorptio

Absorptiolla tarkoitetaan atomien, molekyylien ja ionien imeytyminen nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen**.** Fysikaalinen absorptio on tällä hetkellä kaikista lupaavin ja pisimmälle kehitetty vaihtoehto hiilidioksidin erottamiseen. Fysikaalinen absorptio soveltuu parhaiten silloin, kun CO_2:n osapaine on korkea. (IPCC, 2005)

Fysikaalinen absorptio perustuu hiilidioksidin liukenemiseen liuotinnesteeseen. Tyypillisimpiä liuottimia esitetty taulukossa 1. Liukenemisaste riippuu oleellisesti lämpötilasta ja paineesta. Kaasuseos syötetään absorptiosäiliöön (Kuvassa 10 Selexol Absorber), jossa hiilidioksidi absorpoituu liuottimeen. Vetypitoinen kaasu poistetaan säiliöstä yläkautta. Liuotin ja siihen absorpoitunut hiilidioksidi pumpataan regeneroimisastiaan (Kuvassa 10 Selexol Stripper), jossa hiilidioksidi erotetaan liuottimesta, ja siirretään jatkokäsiteltäväksi. Liuotin pumpataan suodattimen läpi takaisin absorptiosäiliöön uutta kiertoa varten. (Wong ja Bioletti, 2002)

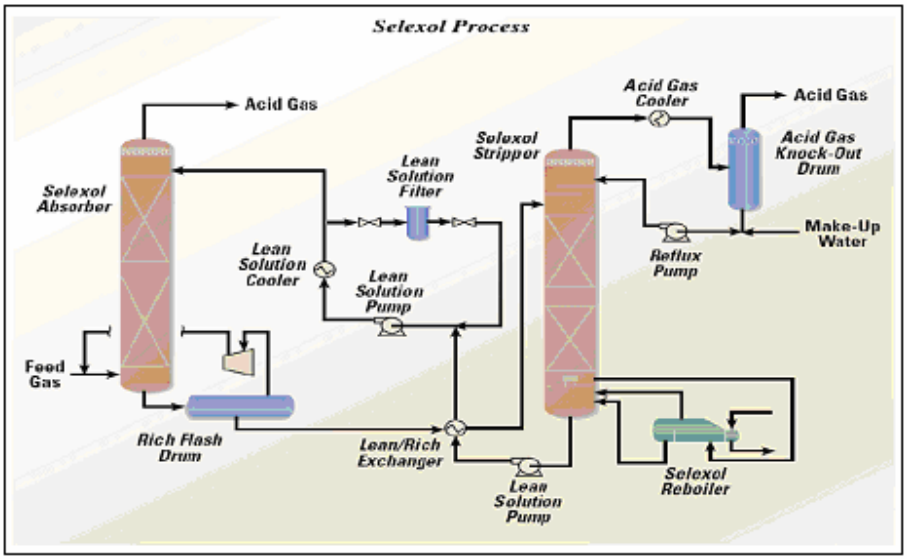
Taulukko 1. Käytetyimpiä liuottimia. (IPCC, 2005)

Solvent name	Type	Chemical name
Rectisol	Physical	Methanol
Purisol	Physical	N-methyl-2-pyrolidone (NMP)
Selexol	Physical	Dimethyl ethers of polyethylene glycol (DMPEG)

Liuottimen regenerointi tapahtuu yleensä painetta laskemalla yhdessä tai useammassa vaiheessa, tai käsittelemällä liuotinta höyryllä tai inertillä kaasulla. Perusteellisempaa puhdistusta vaadittaessa voidaan liuoksen lämpötilaa nostaa, jolloin puhdistusaste paranee. Absorptio tapahtuu matalassa, n.0-5$^{\circ}C$ lämpötilassa, ja tätä varten regeneroitu liuotin on jäähdytettävä ennen absorptiosäiliöön syöttämistä. (Wong ja Bioletti, 2002)

Hiilidioksidin lisäksi tuotekaasusta on poistettava rikki, joka esiintyy kaasuseoksessa yhdisteenä rikkivety (H_2S). Tämä voidaan toteuttaa hiilidioksidin poiston yhteydessä, tai käyttämällä kahta absorptiokiertoa peräkkäin, joista toisessa poistetaan rikkivety ja toisessa hiilidioksidi. (Wong ja Bioletti, 2002; ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Fysikaalisen absorption etuna voidaan pitää sen pientä energiankulutusta, sillä energiaa kuluu ainoastaan liuottimen paineen nostamiseen. Haittapuolena voidaan pitää erotukseen vaadittavaa hiilidioksidin korkeaa osapainetta. Toisaalta IGCC-laitoksissa kaasuttimesta tuleva tuotekaasu on melko korkeassa paineessa, joten ongelma ei nouse ylitsepääsemättömäksi. (IPCC, 2005)



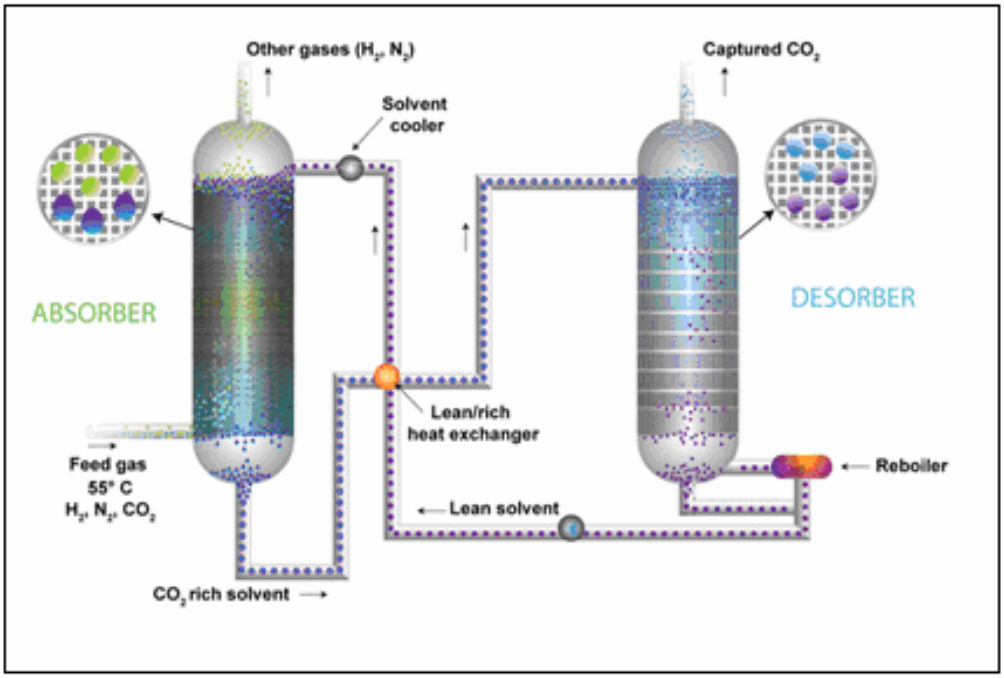
Kuva 10. Selexolia liuottimenaan käyttävän prosessin kaaviokuva. (Kentucky department for energy development & independence, 2008)

Yllä oleva kuva on oikeastaan polton jälkeisestä talteenotosta, mutta periaate kiertoprosessissa on aivan sama ennen polttoakin tapahtuvassa talteenotossa. Ainoastaan absorptiosäiliöstä (Selexol Absorber) lähtevän jäte kaasun (Acid Gas) tilalla on ennen polttoa tapahtuvassa talteenotossa pääosin vedystä koostuva seos, joka poltetaan kaasuturbiinissa.

8.2 Kemiallinen absorptio

Kemiallinen absorptio on varteenotettava vaihtoehto erityisesti silloin, kun polttoaineena käytetään maakaasua, ja kun hiilidioksidin osapaine on alle 15 baaria. (IPCC, 2005)

Absorptio tapahtuu absorptiotornissa (kuvassa 11 absorber), johon kaasuseos tulee tyypillisesti alakautta ja liuotin yläkautta. Kaasuseos reagoi liuottimen kanssa matalassa lämpötilassa, jolloin hiilidioksidi sitoutuu siihen kemiallisesti. Tämän jälkeen jatko on sama kuin fysikaalisessakin absorptiossa, eli liuotin regeneroidaan, (kuvassa 11 desorber) ja hiilidioksidi siirretään jatkokäsiteltäväksi.



Kuva 11. Kemiallisen absorption periaatekuva. (CO2 CRC)

Kemiallinen absorptio vaikuttaa pintapuolisesti tarkasteltuna hyvin samankaltaiselta kuin fysikaalinenkin absorptio. Näiden kahden prosessin ero on lähinnä siinä, millä tavoin hiilidioksidi sitoutuu liuokseen.

Kemiallinen absorptio on eksoterminen reaktio, ja se tapahtuu n. 40-60 $^{\circ}C$ lämpötilassa. hiilidioksidi muodostaa kemiallisen sidoksen amiinien (tai karbonaattien, riippuen liuottimesta) kanssa, ja vetypitoinen kaasu poistuu astian yläkautta. Regenerointi vaiheessa hiilidioksidin ja amiinien välinen sidos rikotaan erotinsäiliössä nostamalla lämpötila n. 100-140 $^{\circ}C$:een, jolloin hiilidioksidi irtaantuu liuottimesta. Erotinsäiliöstä lähtevä liuotin pumpataan takaisin absorptiosäiliöön suodattimen ja lämmönsiirtimen kautta. Lämmönsiirtimessä absorptiosäiliöön palavaa liuos luovuttaa lämpöä erotinsäiliöön menevälle hiilidioksidipitoiselle liuokselle. (IPCC, 2005)

Suurin osa käytetyistä liuottimista on amiini- tai karbonaattipohjaisia (taulukko 2). Perinteisin ratkaisu on ollut MEA, joka on tarjolla olevista vaihtoehdoista halvin ja omaa suurimman teoreettisen hiilidioksidin sitomiskapasiteetin. Tätä suurinta teoreettista kapasiteettia ei ole vielä toistaiseksi saatu hyödynnettyä korroosio-ongelmien vuoksi. Ongelmana on lisäksi se, että MEA reagoi palautumattomasti joidenkin pienien epäpuhtauksien kanssa, jolloin sen laatu heikkenee. Lisäksi epäpuhtauksien aiheuttama nesteen kuohuminen voi aiheuttaa ongelmia. (IPCC, 2005)

Menetelmää käyttämällä päästään suhteellisen korkeaan, n. 80-90%:n erotusasteeseen, mutta taloudelliset kustannukset ja energian kulutus ovat yleensä korkeita. (IPCC, 2005)

Taulukko 2. Tyypillisimpiä kemiallisia liuottimia. (IPCC, 2005)

Liuotin	Tyyppi	Kemiallinen nimi
Benfield	Chemical	Potassium carbonate
MEA	Chemical	Monoethanolamine
MDEA	Chemical	Methyldiethylamine
Sulfinol	Chemical	Tetrahydrothiophene 1,1-dioxide (Sulfolane), an alkaloamine and water

8.3 Adsorptio

Adsorptiolla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa kaasu muodostaa ohuen kalvon kiinteän aineen pintaan. Hiilidioksidin talteenotossa tämä tarkoittaa sitä, että kaasuseoksen sisältämä hiilidioksidi ja muut epäpuhtaudet adsorpoituvat kiinteän aineen pintaan adsorptiosäiliössä. Prosessi on ollut kaupallisessa käytössä jo yli 30 vuotta, eikä sitä alun perin suunniteltu voimalaitoskäyttöön, mutta viime vuosina adsorptio on noussut varteenotettavaksi vaihtoehdoksi. (IPCC, 2005; UOPb, 1998)

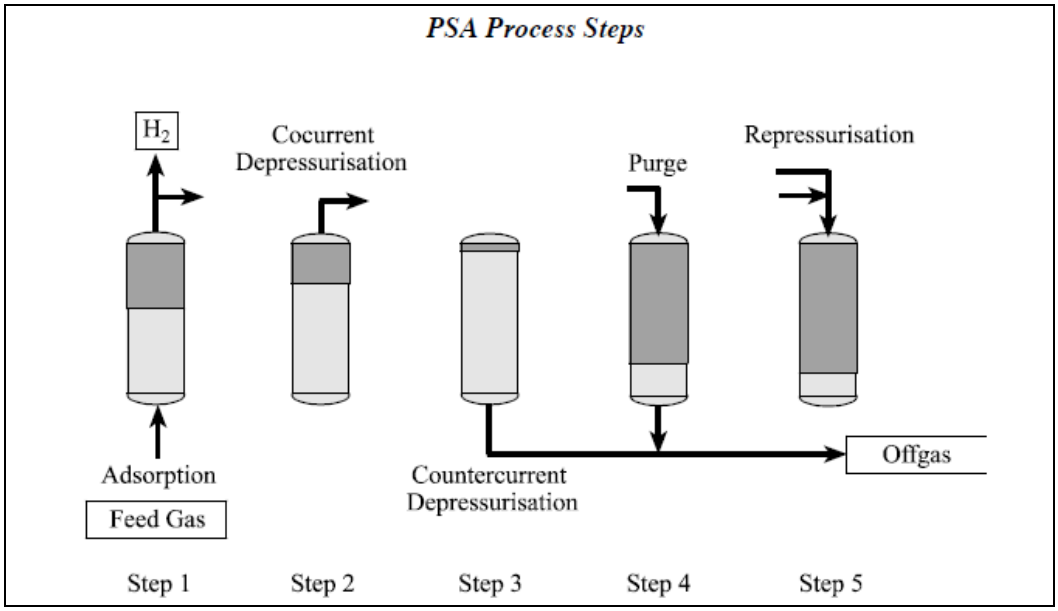
Prosessi koostuu adsorptiovaiheen ja regeneromisvaiheen (desorptio) vaiheen välisestä kierrosta. Adsorptiovaiheessa hiilidioksidi sitoutuu adsorbenttiin, ja regeneromisvaiheessa nämä adsorbentit puhdistetaan.

Adsorptiomenetelmät jaotellaan regenerointitavan mukaan. Regenerointi (desorptio) totetutaan yleensä käyttämällä joko PSA (Pressure Swing Adsorption) tai TSA (Temperature Swing Adsorption) menetelmää. PSA menetelmässä regenerointi perustuu paineen muunteluun. TSA:ssa regenerointi toteutetaan lämpötilaa nostamalla. Tällä saavutetaan tehokas puhdistusaste, mutta prosessin vaatimat lämmitys ja jäähdytys ovat sen verta hitaita toimenpiteitä, että menetelmä ei ole saavuttanut suurta suosiota. Lisäksi kehitteillä on ESA (Electrical Swing Adsorption), joka perustuu sähkövirran käyttöön. PSA on näistä kolmesta menetelmästä yleisimmin käytetty, joten siitä on kerrottu edempänä tarkemmin. (IPCC, 2005)

PSA-prosessi voidaan jakaa viiteen eri vaiheeseen, jotka ovat

–adsorptio
– myötävirta paineenalennus
– vastavirta paineenalennus
– desorptio
– uudelleen paineistus

Yllä mainitut vaiheet on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. PSA menetelmän eri vaiheet. (UOPa, 1998)

Adsorptioyksikkö koostuu useista adsorptiosäiliöistä, jotka ovat yhteydessä toisiinsa venttiilien välityksellä, ja jotka sisältävät useita adsorptiokerroksia. Adsorptiomateriaali sitoo hiilidioksidin ja muut epäpuhtaudet ja päästää vedyn ja muut ainesosat lävitse. Tuloksena saadaan jopa 99,9% vetyä.

Kun adsorptiomateriaaliin on sitoutunut riittävästi epäpuhtauksia, on se puhdistettava. Tämä tapahtuu muuntamalla painetta säiliöiden välillä. Puhdistuksen alkaessa säiliössä on vielä jonkin verran vetyä, jota käytetään paineen säätelyyn ja epäpuhtauksien poistoon. Kaasuvirta ei missään vaiheessa katkea, sillä kun adsorptiomateriaalin puhdistus yhdessä säiliössä alkaa, syötetään puhdistettava kaasu sellaiseen säiliöön, joka kykenee vielä adsorpoimaan epäpuhtauksia. Puhdistuksen lopuksi säiliö paineistetaan vedyn avulla uudelleen käyttöä varten. (UOPa, 1998; UOPb, 2001)

Adsorpoivana materiaalina on käytetty aktiivihiiltä, zeoliittiä, silikaatteja ja ns. molekyyli seulaa. Kaasujen adsorptoituminen riippuu lämpötilasta, hiilidioksidin osapaineesta, molekyylien välisistä pintavoimista ja adsorbentin huokosten koosta. (IPCC, 2005)

Menetelmän etuna on sen yksinkertaisuus ja energiatehokkuus, sekä tapa, jolla regenerointi voidaan toteuttaa. Käyttö suuremmassa mittakaavassa ja sopivan adsorptiomateriaalin kehitys ovat toistaiseksi suurimmat haasteet. (IPCC, 2005)

8.4 Membraanit/membraanireaktorit

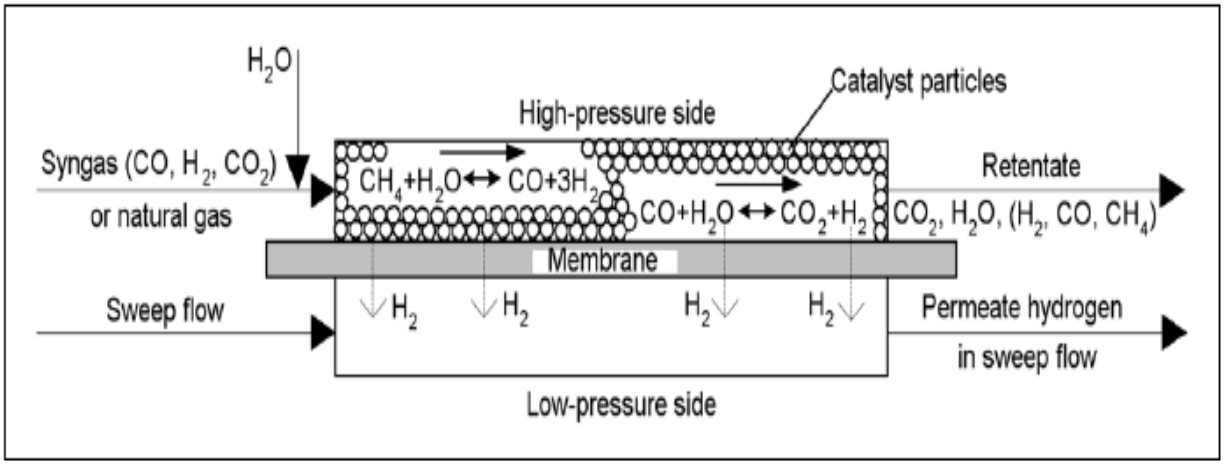
8.4.1 Membraanit

Membraanit ovat erikoisvalmisteisia kalvoja, jotka päästävät kaasuja valikoivasti lävitseen. Kalvon materiaali ratkaisee sen mitä pääsee läpi ja mitä ei. Paine-ero kalvon eri puolilla taas ratkaisee sen, kuinka nopeaa tämä kalvon läpäisy on. Vaihtoehtoja kalvomateriaaliksi on useita, ja mm. polymeerisiä, metallisia ja keraamisia materiaaleja on kokeiltu. (IPCC,2005)

Membraaneja on käytössä useissa kaupallisissa sovelluksissa, mutta ne eivät ole vielä yleistyneet voimalaitoskäytössä. Membraanien käyttö johtaa yleensä suurempiin menetyksiin tehontuotannossa, kuin muilla vedyn ja hiilidioksidin erotustekniikoilla. Lisäksi talteenottoaste on ollut perinteisesti hieman heikompi kuin muilla tekniikoilla. Menetelmän etuna ovat edulliset investointikustannukset, asennuksen helppous ja pieni energian kulutus. (IPCC, 2005)

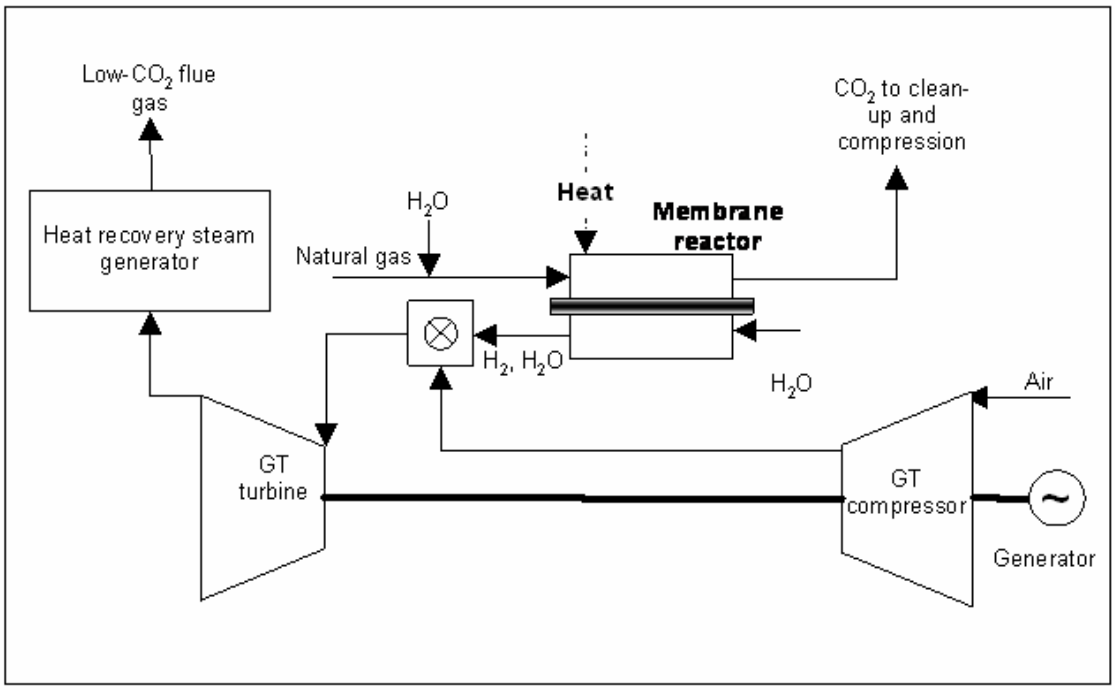
8.4.2 Membraanireaktorit

Membraanireaktorit ovat kehittyneempi versio membraaneiden käytöstä. Membraanireaktoria on kehitetty kahdenlaisena versiona. Toisessa tyypissä toteutetaan reformointi, CO:n muunto CO_2:ksi ja H2:n ja CO_2:n erotus. Toisessa mallissa reformointi toteutetaan erillään tästä membraanireaktorista, ja membraanireaktorin tehtävänä on huolehtia CO:n muunnosta CO_2:ksi ja CO_2:n ja vedyn erotuksesta. (Cachet CO2, 2007)



Kuva 13. Membraanireaktori. (IPCC, 2005)

Yllä olevassa kuvassa näkyy tyypillinen membraanireaktori, joka käsittää reformoinnin, hiilimonoksidin muunnon, sekä hiilimonoksidin ja hiilidioksidin erotuksen. Kalvon toiselle puolelle tuodaan maakaasua ja höyryä, jolloin tapahtuu reformointireaktio n. 500-600 $^{\circ}C$:n lämpötilassa ja muutaman kymmenen baarin paineessa. Tämän jälkeen reformoinnin tuloksena syntynyt vedystä ja hiilimonoksidista koostuva kaasu reagoi uudelleen vesihöyryn kanssa, jolloin syntyy vetyä ja hiilidioksidia. Prosessissa syntynyt vety siirtyy kalvon läpi toisella puolelle, josta se siirretään polttokammioon poltettavaksi. Jos on kyseessä reaktorityyppi, jossa reformointi suoritetaan reaktorin ulkopuolella erillisessa reformointiastiassa, reaktori sisältää vain CO:n muunnon CO_2:ksi ja H_2:n ja CO_2:n erotuksen. Tällöin H_2:n erotus CO_2:sta tapahtuu aivan samoin kuin ensin mainitussakin reaktorityypissä. Kuvassa 14 on esitettynä vielä membraanireaktoria käyttävän laitoksen periaatekuva. (IPCC, 2005; Cachet CO2, 2007)



Kuva 14. Membraanireaktoria käyttävän laitoksen periaatekuva. (Cachet CO2, 2007)

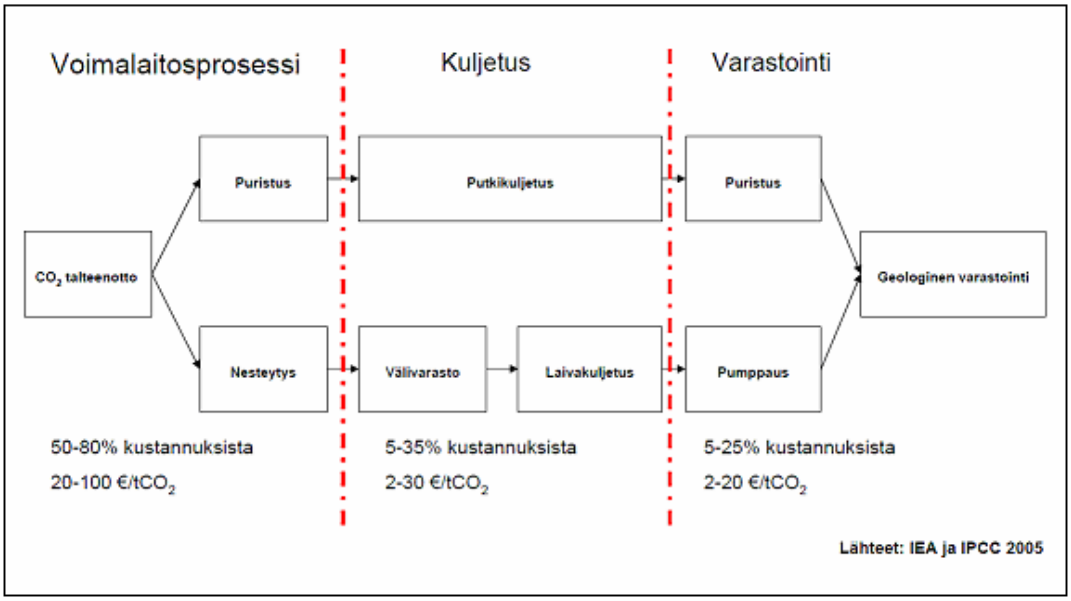
Membraanireaktoreissa on mahdollista toteuttaa reformointi ja hiilidioksidin erotus samalla kertaa, eli erillistä hiilidioksidin erotusyksikköä ei tarvita, mikä onkin yksi menetelmän suurista eduista. Muita menetelmän etuja ovat korkea puhtausaste, matalammat lämpötilat, energian säästö sekä halvemmat rakennemateriaalit perinteisiin reformointi- ja hiilidioksidin talteenottomenetelmiin verrattuna. Lisäksi poistuva hiilidioksidi on melko korkeassa paineessa, jolloin hiilidioksidin kompressointikuluissa säästetään. Menetelmällä on mahdollista saavuttaa merkittäviä taloudellisia säästöjä, ja on arvioitu, että tulevaisuudessa päästäisiin jopa yli 50% säästöihin nykyisestä. Menetelmä tarvitsee vielä kuitenkin tutkimusta sopivan kalvomateriaalin löytämiseksi, luotettavuuden parantamiseksi ja toiminnan optimoimiseksi. (IPCC, 2005; Cachet CO2, 2007)

8.5 Muut menetelmät

Aiemmin mainittujen menetelmien lisäksi on joukko kehitteillä olevia menetelmiä, kuten kryogeeninen menetelmä, kalsiumoksidiin perustuvat teknologiat, metaanin pyrolyysi, kemiallinen kiertopoltto (vapaasti käännettynä (chemical looping combustion)), SER (sorption enhanced reaction) ja mikroreformerit (microchannel reformer). Menetelmät voivat kehittyessään tarjota suuria edistysaskelia, mutta kehitys on kuitenkin vielä tällä hetkellä sen verran vaiheessa, että laajempaa käyttöä voimalaitosmittakaavassa tuskin on odotettavissa lähivuosina. (IPCC, 2005)

9 KUSTANNUKSET JA VAIKUTUS HYÖTYSUHTEESEEN

Kustannusten alentaminen on oleellista hiilidioksidin talteenoton yleistymistä ajatellen. Kustannukset vaihtelevat paljon tapauskohtaisesti, mutta yleistettynä voidaan sanoa, että hiilidioksidin talteenotto muodostaa noin kaksi kolmasosaa kaikista kustannuksista, kun lasketaan mukaan myös kuljetuksesta ja varastoinnista aiheutuvat kulut. (Hiilitieto, 2008)



Kuva 15. Hiilidioksidin talteenoton kustannusten jakautuminen osa-alueittain. (Hiilitieto, 2008)

Eräänlaisena vertailukohtana hiilidioksidin talteenoton kannattavuudelle voidaan pitää päästöoikeuden hintaa. Vielä viime kesänä päästöoikeus maksoi n. 30 euroa per hiilidioksidi tonni, mutta nyt (maaliskuu 2009) hinta on vain noin kolmasosa tästä, n.11euroa. (YLE, 2009) Päästöoikeuden hintaa ja talteenoton kustannuksia verrattaessa tulee päästöoikeuden osto nykyisillä hintatasoilla huomattavasti edullisemmaksi. Toisaalta täytyy muistaa, että hiilidioksidin talteenoton taustalla ovat enemmänkin ympäristökysymykset kuin taloudelliset näkökohdat. Hiilidioksidin talteenottotekniikan yleistymisen kannalta on kuitenkin oleellista, että siitä aiheutuvat kustannukset ovat kohtuulliset.

9.1 KUSTANNUSTEN JAKAUTUMINEN

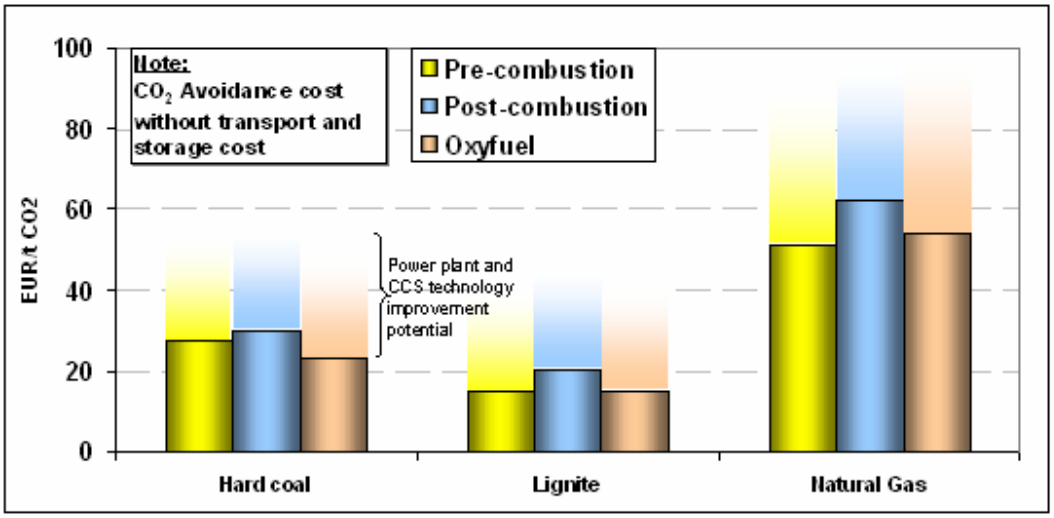
Kustannuksia laskettaessa tulee huomioida ainakin seuraavat asiat:

- Investointikustannukset
- Käyttö- ja kunnossapitokustannukset
- Polttoainekustannukset
- Hyötysuhde

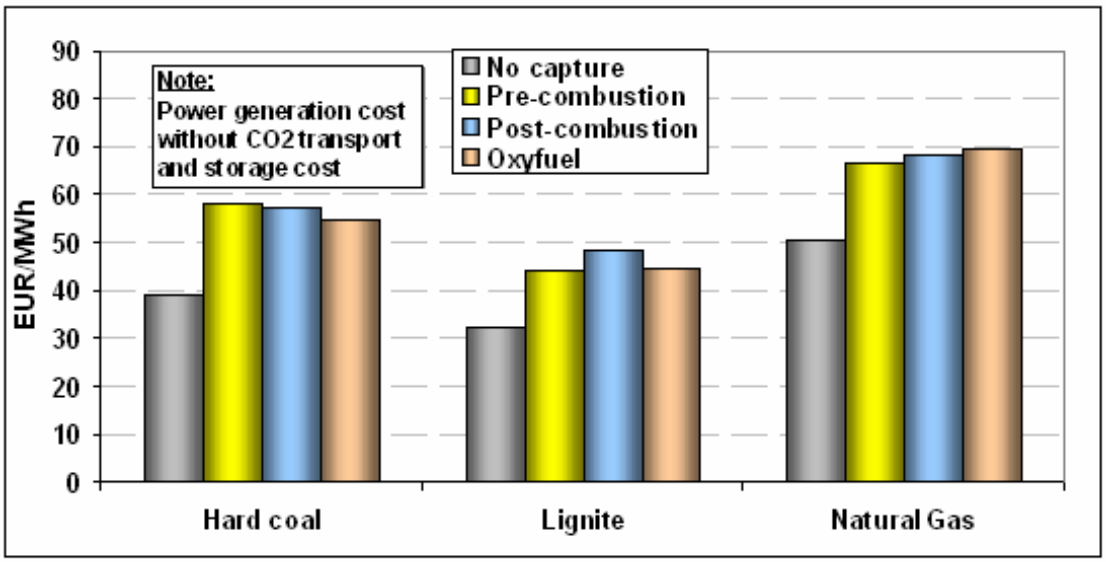
Oleellisimmat asiat, mitkä vaikuttavat kustannuksiin, ovat investointikustannukset, sekä hyötysuhteen alenemisesta aiheutuvat kustannukset. Hyötysuhteen aleneminen johtaa kasvavaan polttoaineen kulutukseen, sillä tuotettu teho halutaan todennäköisesti pitää samana huolimatta siitä oliko laitoksessa hiilidioksidin talteenottoa vai ei. Kasvanut polttoaineen kulutus taas johtaa kasvaviin polttoainekustannuksiin, jolloin polttoaineen hinnalla on merkittävä asema kokonaiskustannuksissa. Tämän takia on arveltu, että polttoaineen valinnalla voi olla jopa suurempi merkitys kuin varsinaisen talteenottotekniikan valinnalla kustannuksia ajatellen. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Uuden tekniikan tutkimus ja käyttöönotto vaatii aina suuria investointeja, joten tästäkin näkökulmasta ajatellen taloudellinen tarkastelu on varsin tärkeä asia. Investoijien mukaan saamiseksi on pystyttävä osoittamaan, että tekniikka on pitkällä tähtäimellä kannattavaa. Kaikilla nykyisillä talteenottotekniikoilla on hyvät ja huonot puolensa, ja toiset ovat hieman lähempänä läpimurtoa kuin toiset, mutta yhteistä näille kaikille on kuitenkin se, että merkittäviin taloudellisiin säästöihin on mahdollisuus tulevaisuudessa. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Alla olevissa kaavioissa on esitetty arvioidut sähköntuottokustannukset ja hiilidioksidin talteenottokustannukset vuonna 2020. On arveltu, että talteenottokustannuksissa voidaan saavuttaa jopa 15EUR/t taso vuoteen 2020 mennessä. Kaaviot koskevat kaikista lupaavimpia laitoskonsepteja. On arvioitu, että näitä konsepteja saadaan testattua riittävästi kaupallista käyttöönottoa varteen vuoteen 2020 mennessä. Tulokset perustuvat mm. sellaisten tahojen kuin ENCAP (Enhanced Capture of CO2 - project) ja CASTOR (CO2 from capture to storage - project) tutkimustuloksiin. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)



Kuva 16. Arvioidut CO_2 talteenottokustannukset ison mittakaavan laitoksille vuonna 2020. Kuvassa mainittu improvement potential tarkoittaa sitä hintaa, joka on mahdollista saada pudotettua tämän hetkisestä hinnasta. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)



Kuva 17. Arvioidut sähköntuotantokustannukset ison mittakaavan voimalaitoksille vuonna 2020. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Kuvista 16 ja 17 nähdään, että talteenottotekniikoiden väliset erot ovat kohtalaisen pieniä. Kuvasta 16 nähdään, että maakaasua käyttävällä laitoksella hiilidioksidin talteenottokustannukset tulevat huomattavasti kalliimmaksi kuin muilla polttoaineilla. Verrattaessa kuvassa 17 näkyviä laitoksia, huomataan, että sähköntuotantokustannukset ovat n. 40-50% suuremmat, jos laitos on varustettu talteenotolla.

Taulukoissa 3, 4 ja 5 on esitetty vertailua perinteisen, ilman hiilidioksidin talteenottoa toimivan pölypolttolaitoksen sekä kaasuturbiinikombivoimalaitoksen ja erilaisten hiilidioksidin talteenottotekniikalla varustettujen laitosten välillä. Nämäkin tulokset perustuvat mm. ENCAP:in ja CASTOR:in tutkimustuloksiin. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että laitokset ovat eri tehoisia, joten esim. investointikustannuksia ei voi suoraan verrata toisiinsa. Sähköntuottohyötysuhteita, hiilidioksidin talteenottoasteita, sähkön tuotantokustannuksia ja hiilidioksidin talteenottokustannuksia voidaan verrata toisiinsa kohtalaisella tarkkuudella.

Taulukko 3. Kivihiiltä käyttävien laitostyyppien vertailua. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Kivihiili	Yksikkö	Pölypoltto	Talteenotto ennen polttoa	Polton jälkeinen talteenotto	Happipoltto
Tuotettu teho	MW	560	740	460	470
Sähköntuotto hyötysuhde	%	46	36	36	36
CO_2:n talteenottoaste	%	-	92	85	91
Investointikustan.	milj. EUR	590	1340	770	780
Sähkön tuotankustannus	EUR/MWH	39	58	58	55
CO2:n talteenottokustannus	EUR/t	-	21	22	18

Taulukko 4 Maakaasua käyttävien laitostyyppien vertailua. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Maakaasu	Yksikkö	Kombivoimalaitos	Talteenotto ennen polttoa	Polton jälkeinen talteenotto	Happipoltto
Tuotettu teho	MW	420	760	660	330
Sähköntuotto hyötysuhde	%	58	48	48	48
CO_2:n talteenottoaste	%	-	93	85	100
Investointikustan.	milj. EUR	200	660	570	420
Sähkön tuotantokustannus	EUR/MWH	51	67	68	69
CO_2 talteenotto kustannus	EUR/t	-	42	50	45

Taulukko 5. Ruskohiiltä käyttävien laitostyyppien vertailua. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Ruskohiili	yksikkö	Pölypoltto	Talteenotto ennen polttoa	Polton jälkeinen talteenotto	Happipoltto
Tuotettu teho	MW	920	720	730	760
Sähköntuotto hyötysuhde	%	43	41	39	41
CO_2 talteenotto aste	%	-	85	85	90
Investointikustan.	milj. EUR	1180	1340	1480	1520
Sähkön tuotantokustannus	EUR/MWH	32	44	48	45
CO_2 talteenotto kustannus	EUR/t	-	14	18,2	14,1

Polttoaineen vaikutus

Yllä olevista taulukoista huomataan polttoaineen huomattava merkitys laitoksen tunnuslukuihin. Maakaasua käyttävissä laitoksissa päästään hyvään hyötysuhteeseen, mutta toisaalta hiilidioksidin talteenoton hinta ja sähköntuotantokustannukset ovat korkeat. Kivihiiltä käyttävissä laitoksissa hyötysuhde jää vaatimattomaksi, mutta hiilidioksidin talteenottokustannus on varsin edullinen maakaasulaitoksiin verrattuna. Investointikustannuksiltaan kivihiiltä käyttävä laitos on kalliimpi, mutta sähköntuotantokustannukset hieman edullisemmat. Ruskohiiltä käyttävissä laitoksissa hiilidioksidin talteenoton ja sähköntuotantokustannusten hinta on kaikista edullisin, mutta investointikustannukset ovat korkeat kaikilla talteenottotekniikoilla. Hyötysuhde ruskohiililaitoksissa on maakaasulaitosten ja kivihiililaitosten välimaastossa. Keskimäärin paras talteenottoaste saavutetaan maakaasulla toimivissa laitoksissa.

Talteenottotekniikoiden vaikutus

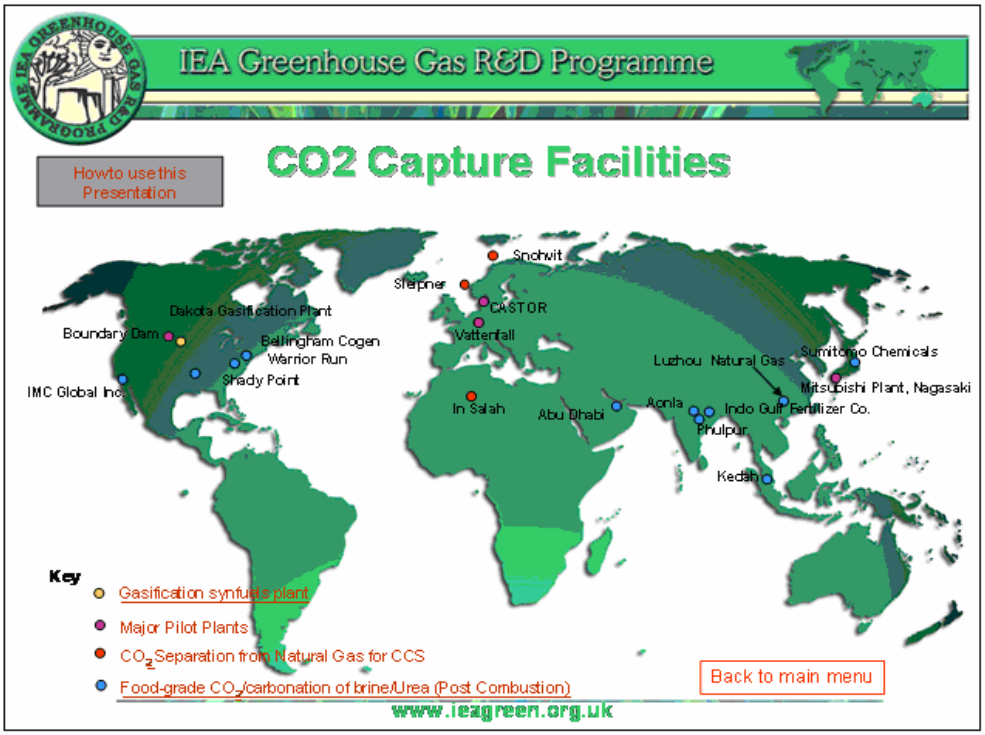
Vertailtaessa eri talteenottotekniikoita näyttäisi eroja laitosten välillä olevan investointi- ja talteenottokustannuksissa, talteenottoasteessa sekä sähköntuotantohinnassa. Talteenottoastetta tarkasteltaessa happipoltolla on keskimääräisesti paras talteenottoaste. Seuraavana tulee ennen polttoa tapahtuva talteenotto ja viimeisenä talteenotto polton jälkeisistä savukaasuista. Investointikustannusten jakautuminen laitostyyppien kesken riippuu paljon polttoaineesta. Kivihiiltä ja maakaasua käyttävissä laitoksissa ennen polttoa tapahtuvaa talteenottoa käyttävä laitos tulee selkeästi kalleimmaksi kahden muun tekniikan ollessa suunnilleen samaa tasoa. Toisaalta ruskohiiltä käyttävässä laitoksessa ennen polttoa tapahtuvaa talteenottoa käyttävä laitos on kolmikon edullisin. Talteenottokustannuksia tarkasteltaessa huomataan, että talteenotto polton jälkeisistä savukaasuista tulee kalleimmaksi kahden muun tekniikan ollessa suunnilleen samaa tasoa, vaikkakaan tekniikoiden väliset erot eivät ole merkittäviä. Hyötysuhde samaa polttoainetta käyttävissä laitoksissa on lähestulkoon sama kaikissa laitostyypeissä.

Erot perinteisten laitosten ja talteenotolla toimivien laitosten välillä

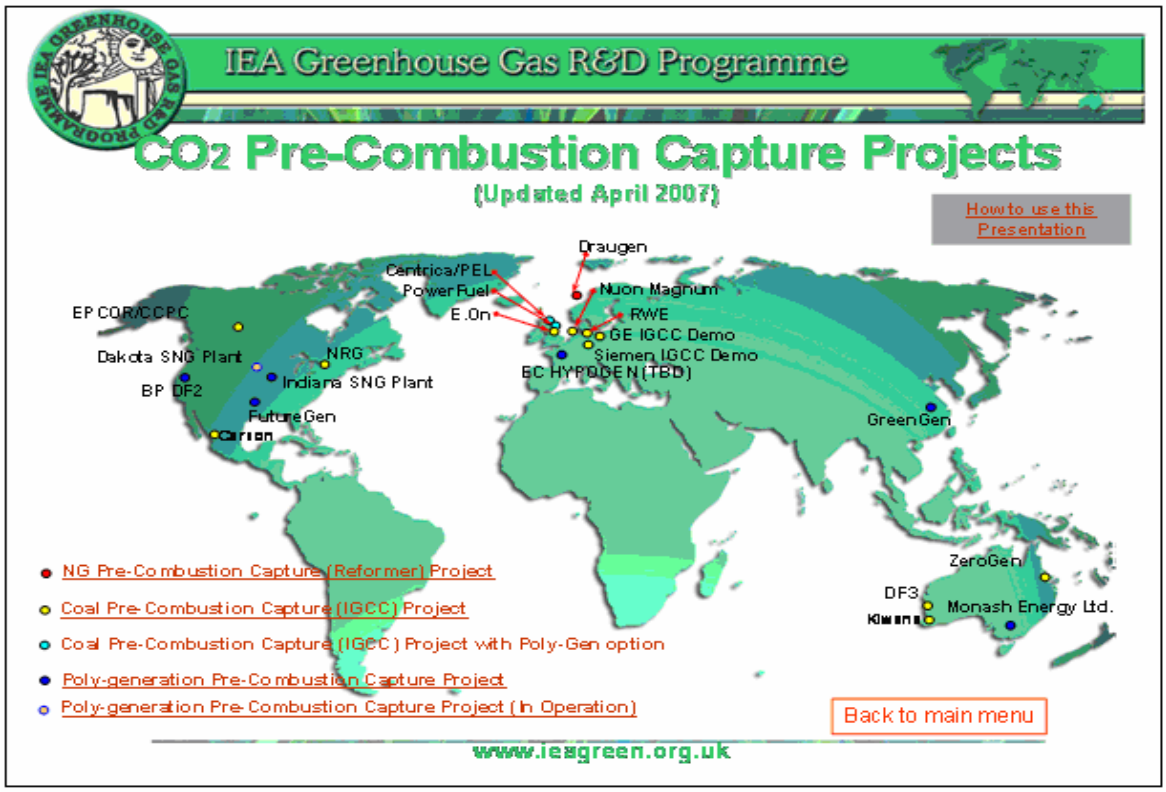
Pääpiirteet perinteisten laitosten ja talteenottolaitosten välillä on taloudellisten kustannusten ja hyötysuhteiden väliset erot. Riippumatta polttoaineesta tai talteenottotekniikasta, kustannukset kasvavat ja hyötysuhde alenee aina kun laitokseen asennetaan hiilidioksidin talteenottojärjestelmä. Erot vaihtelevat toki laitostyyppien ja polttoaineiden kesken, mutta pääsääntöisesti erot näiden suureiden välillä pysyvät huomattavina. Toisaalta jos tarkastellaan kaikista positiivisimpia lukuja kultakin osa-alueelta, näyttävät tulokset jo paremmilta. Saatujen tulosten perusteella lienee mahdoton sanoa, että mikä talteenottotekniikoista tai polttoaineista olisi ehdoton ykkönen, mutta tuloksista voidaan kuitenkin varmasti oppia paljon tulevia projekteja ajatellen.

10 TUTKIMUSPROJEKTEJA

Hiilidioksidin talteenottoon liittyen tehdään enenevissä määrin tutkimusta ympäri maailmaa. Kuvassa 18 näkyy projekteja, joista osa on jo loppuun saatettu, osa käynnissä, ja osa käynnistyy lähitulevaisuudessa. Kuvassa 18 olevat kohteet ovat hiilidioksidin talteenotolla varustettuja suuremman mittakaavan koelaitoksia, ja kuva 19:ssa näkyy ennen polttoa tehtävään talteenottoon liittyvää tutkimusta. Osa kuvan 19 laitoksista on vasta suunnitteilla, ja varsinaiset koelaitokset rakennetaan lähivuosina.



Kuva 18. Hiilidioksidin talteenotolla varustetut laitokset maailmalla. (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2006)



Kuva 19. Ennen polttoa tapahtuvaan talteenottoon liittyvät projektit maailmalla. (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2006)

10.1 ENCAP

Encap on tutkimusprojekti, jonka tarkoituksena on kehittää hiilidioksidin talteenottotekniikoita. Kuvassa 18 ENCAP-projekti löytyy nimellä Vattenfall, joka on yksi isoimmista projektissa mukana olevista tahoista. Tutkimus keskittyy pääosin fossiilisia polttoaineita käyttäviin laitoksiin. Projekti koostuu useasta eri osa-alueesta ja tässä työssä keskitytään osa-alueeseen, jossa vertaillaan IGCC- ja NGCC-laitoksia talteenotolla ja ilman. (Encap, 2003)

Kahdeksi päätavoitteeksi projektissa on asetettu seuraavat:

- Tavoitteena on kehittää tekniikoita, joilla saavutetaan vähintään 90%:n talteenottoaste
- Kustannuksissa pyritään saavuttamaan vähintään 50%:n säästö (vertailukohtana ennen projektin alkua oleva taso, joka oli n. 50-60EUR/t CO_2 (Encap, 2003)

Projekti sisältyy yhteen EU:n kuudesta isosta projektista, ja siinä on 33 eri tahoa mukana, sisältäen mm. 6 suurta Euroopan fossiilisten polttoaineiden käyttäjää, sekä 11 johtavaa teknologian kehittäjää. Projektista saatujen tuloksien perusteella on tarkoitus käynnistää uusi projekti, jossa rakennetaan laaja demonstraatiolaitos. Tämä laitos on tavoitteena ottaa laajaan kaupalliseen käyttöön joskus vuosien 2015-2020 paikkeilla. (Encap, 2003)

10.1.1 Laitostyypit

IGCC/NGCC laitosten talteenottoa käsittelevä tutkimus koostui 5:stä eri laitostyypistä. Nämä laitokset olivat

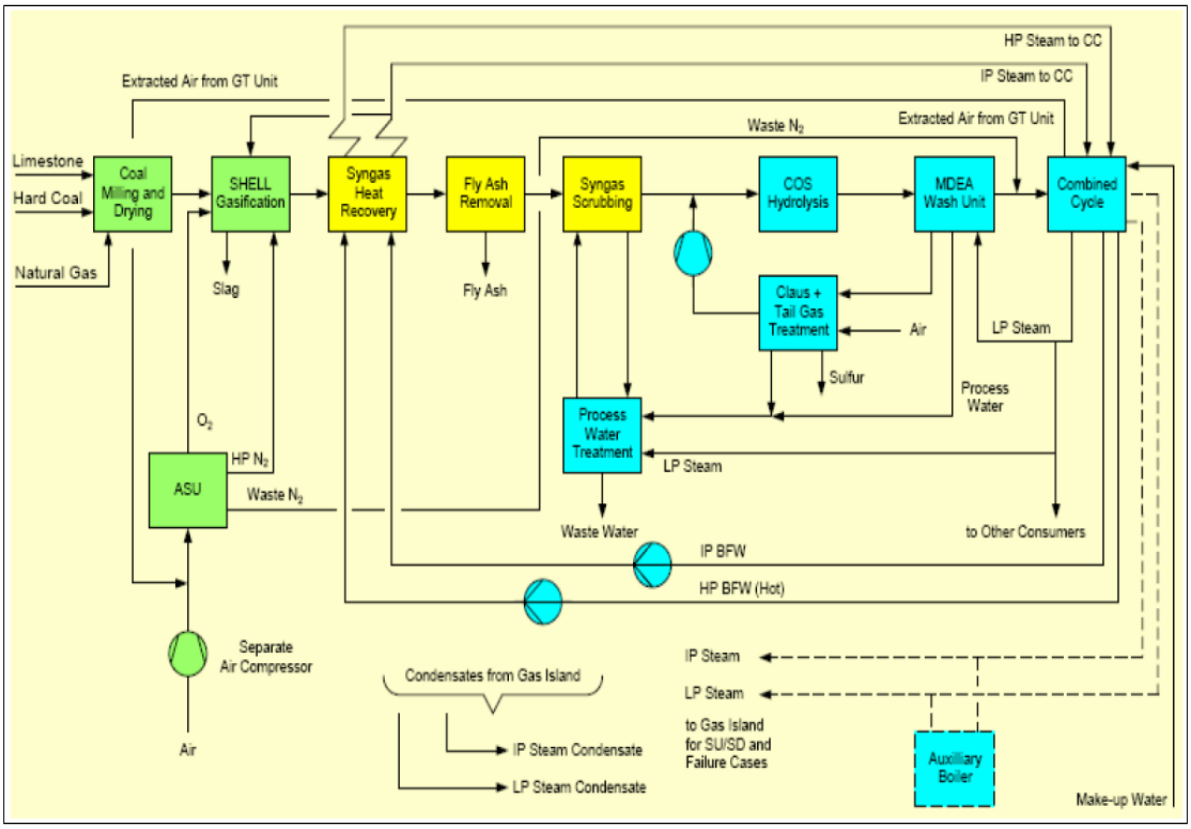
- Kivihiiltä käyttävä IGCC laitos ilman CO_2 talteenottoa (tapaus 1)
- Ruskohiiltä käyttävä IGCC laitos ilman CO_2 talteenottoa (tapaus 2)
- Maakaasua käyttävä NGCC (ATR) CO_2 talteenotolla (tapaus 3)
- Kivihiiltä käyttävä IGCC CO_2 talteenotolla (tapaus 4)
- Ruskohiiltä käyttävä IGCC CO_2 talteenotolla (tapaus 5)

(Kuske ym. 2008)

Kivihiiltä käyttävä IGCC laitos ilman CO2 talteenottoa (tapaus 1)

Laitoksessa sovelletaan ns. two train - menetelmää, eli energiantuotanto hoidetaan kahdella kaasuturbiinilinjalla samaan aikaan. Tällöin kaikkia tärkeimpiä komponentteja, kuten kaasuttimia, kaasuturbiineja, CO2:n erotusyksikköjä jne. on kaksi kappaletta laitoksessa.

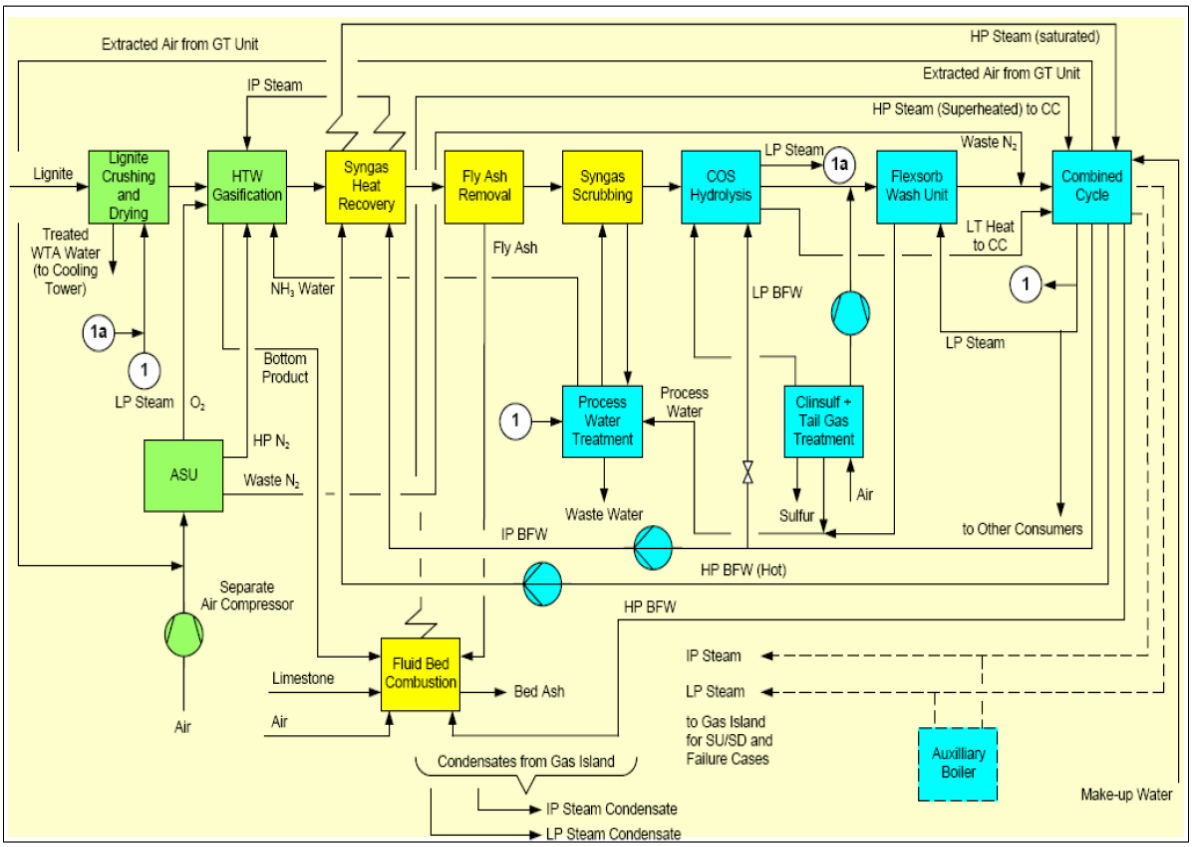
Höyrykierto on kuitenkin näillä eri tuotantolinjoilla yhteinen. Aluksi kivihiili kuivataan 8%:n kosteudesta 3%:iin, jonka jälkeen se jauhetaan pölyksi ja syötetään kaasuttimeen. Syntynyt tuotekaasu jäähdytetään, jonka jälkeen siitä poistetaan tuhkapartikkelit. Tämän jälkeen tuotekaasulle suoritetaan märkäpuhdistus ja COS-hydrolyysi, jossa syntynyt H_2S poistetaan kemiallisen absorption avulla. Absorptiokemikaalin regenerointi on molemmille linjoille yhteinen. Vetypitoinen kaasu poltetaan kaasuturbiineissa, ja savukaasujen sisältämällä lämmöllä höyrystetään vettä, jonka avulla tuotetaan sähköä höyryturbiinissa. (Kuske ym. 2008)



Kuva 20. Kivihiiltä polttoaineenaan käyttävä IGCC laitos ilman CO_2 talteenottoa (tapaus1). (Kuske 2008 ym.)

Ruskohiiltä käyttävä IGCC laitos ilman CO2 talteenottoa (tapaus 2)

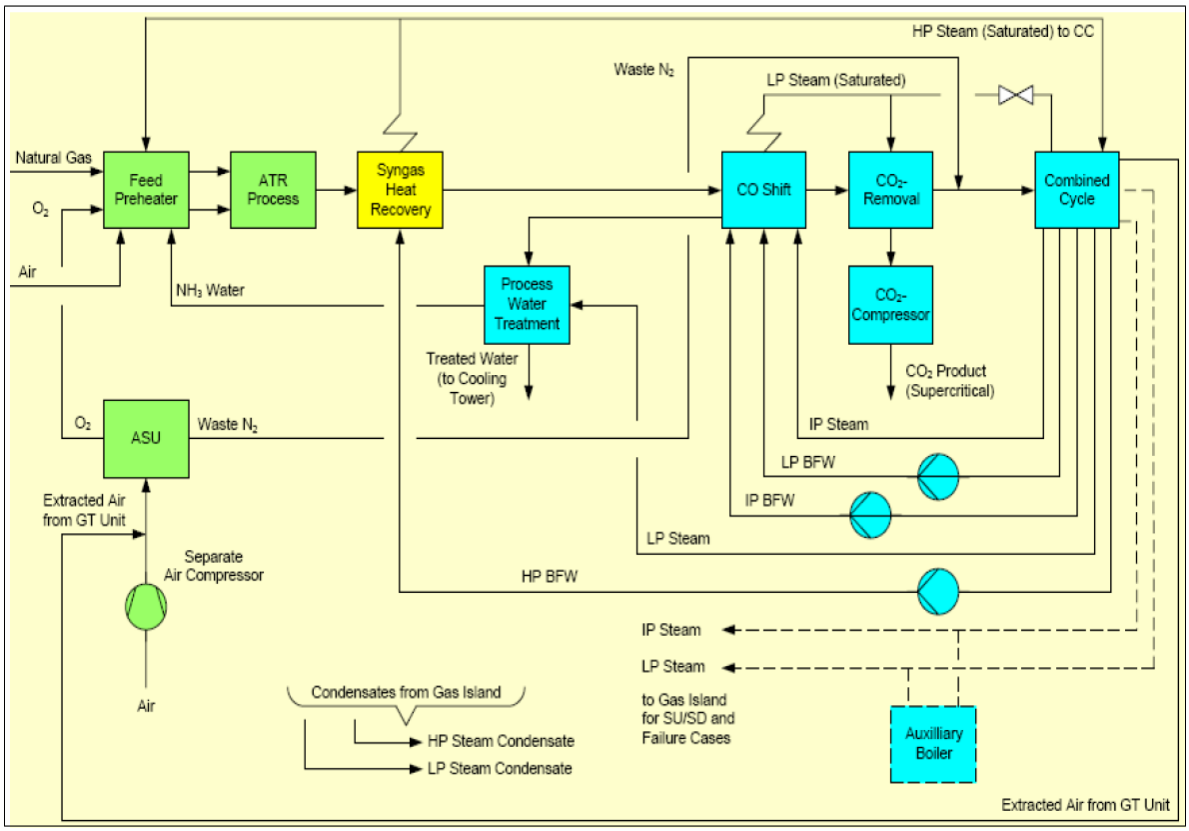
Laitos on pitkälti samantapainen kuin tapauksessa 1. Tapauksen 1 kaltaisesti tämäkin laitos toimii kahden kaasuturbiinilinjan periaatteella. Polttoaineena käytettävä ruskohiili kuivataan 55%:sta 12%:iin, jonka jälkeen loppuosa kierrosta on hyvin samankaltainen kuin edellisessäkin tapauksessa. Kaasutusmenetelmä ja H_2S:n absorptiomenetelmät eroavat hieman edellisestä tapauksesta, mutta muuten laitos on periaatteeltaan hyvin samankaltainen. (Kuske ym. 2008)



Kuva 21. Ruskohiiltä polttoaineenaan käyttävä IGCC laitos ilman CO_2 talteenottoa (tapaus 2). (Kuske ym. 2008)

Maakaasua käyttävä NGCC CO2 talteenotolla (tapaus 3)

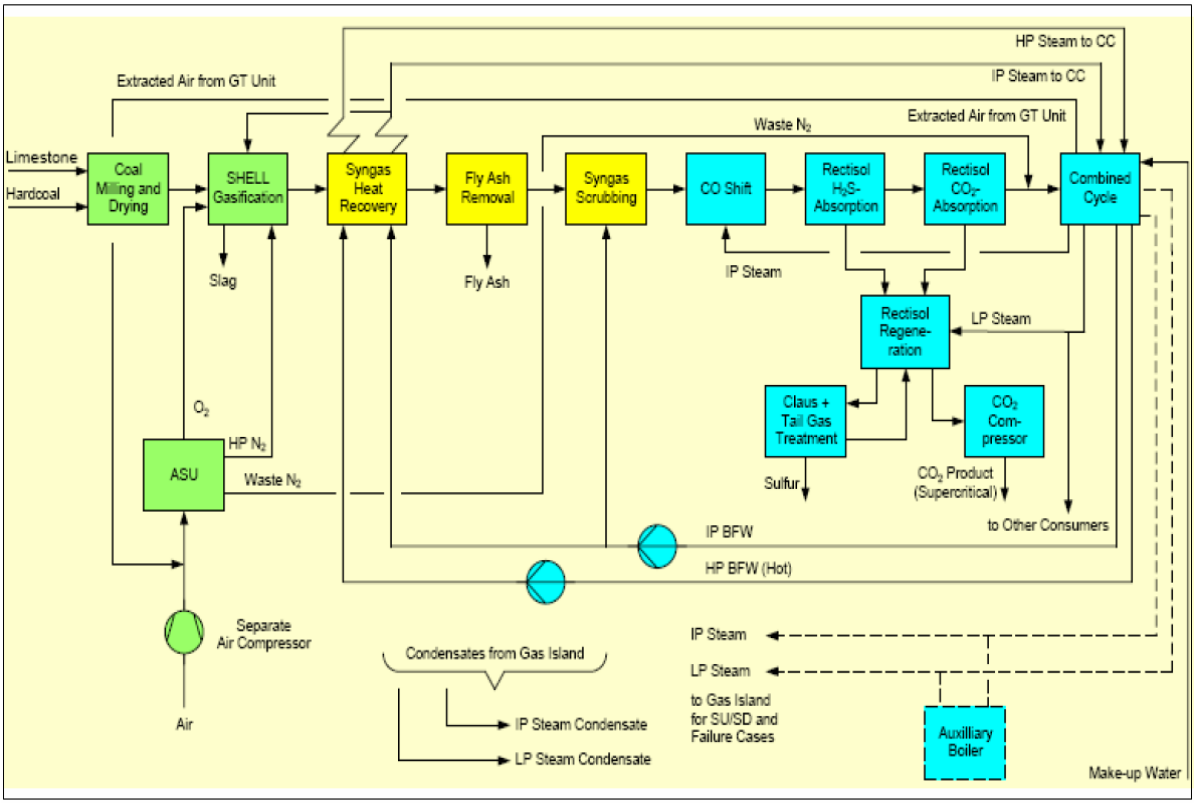
Tämäkin laitos toimii käyttäen kahta eri kaasuturbiinilinjaa. Laitos käyttää polttoaineenaan maakaasua, jonka reformointi suoritetaan ATR menetelmällä. Tässä menetelmässä tarvitaan happea, joten laitoksessa on myös hapen valmistusyksikkö. Syntyvä tuotekaasu jäähdytetään, jonka jälkeen hiilimonoksidi muunnetaan hiilidioksidiksi vesihöyryn avulla käsittelemällä. Hiilidioksidin talteenotto hoidetaan kemiallista absorbtiota käyttäen. Loppuosa kierrosta tapahtuu kuten aikaisemmissakin tapauksissa. (Kuske ym. 2008)



Kuva 22. Maakaasua käyttävä NGCC (ATR) laitos CO_2 talteenotolla (tapaus 3). (Kuske ym. 2008)

Kivihiiltä käyttävä IGCC CO2 talteenotolla (tapaus 4)

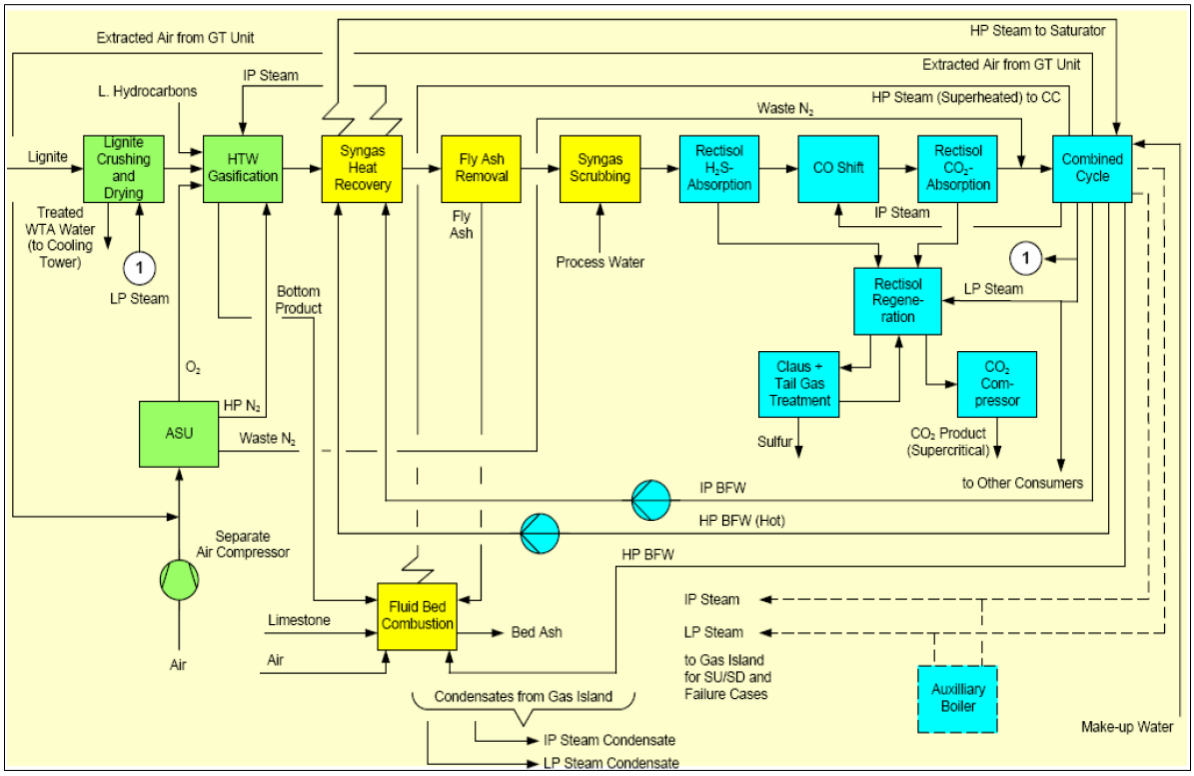
Laitos on pitkälti aikaisempien tapauksien kaltainen. Käytössä on kaksi kaasuturbiinilinjaa, mutta höyrytuotanto, absorptio liuttimen regenerointi sekä CO_2 kompressointi ovat molemmille linjoille yhteiset. Absorptio tapahtuu käyttäen fysikaalista absorptiota. (Kuske ym. 2008)



Kuva 23. Kivihiiltä käyttävä IGCC laitos CO_2 talteenotolla (tapaus 4). (Kuske ym. 2008)

Ruskohiiltä käyttävä IGCC CO2 talteenotolla (tapaus 5)

Periaate pitkälti sama kuin edellisessä tapauksessa, paitsi että polttoaineena on kivihiilen sijaan ruskohiili. (Kuske ym. 2008)



Kuva 24. Ruskohiiltä käyttävä IGCC laitos CO_2 talteenotolla (tapaus 5). (Kuske ym. 2008)

10.1.2 Projektin tulokset

Projekti alkoi vuonna 2004 ja loppui vuonna 2008. Laitosten toiminnan kannalta oleellisimmista tunnusluvuista pidettiin kirjaa. Taulukossa 6 on esitettynä merkittävimmät tulokset projektista.

Taulukko 6. Eri laitostyyppien tulokset projektista. (Kuske ym. 2008)

		Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5
Laitostyyppi		IGCC	IGCC	NGCC (ATR)	IGCC	IGCC
Polttoaine	-	Kivihiili	Ruskohiili	Maakaasu	Kivihiili	Ruskohiili
CO_2 :n talteenotto	-	Ei	Ei	On	On	On
CO_2 :n erotus Tekniikka	-	-	-	Kemiallinen absorptio, MDEA	Fysikaalinen absorptio (rectisol)	Fysikaalinen absorptio (rectisol
Polttoaineteho	MW	1860	1600	1840	2050	1770
Bruttoteho	MW	990	930	870	960	900
Bruttohyötysuhde	%	53	59	48	47	51
Apulaitteiden tehon kulutus	MW	110	110	120	220	180
Nettoteho	MW	870	830	750	740	720
Nettohyötysuhde	%	46	52	41	36	40
Talteenotettu CO_2	kg/s	-	-	96	184	169
Talteenottoaste	%	-	-	92	92	85

Yllä olevassa taulukossa kohta ”apulaitteiden energian kulutus” tarkoittaa niiden osa-alueiden energian kulutusta, joihin CO_2 :n talteenotto vaikuttaa.

Kaikki tuloksia, kuten hyötysuhteita, ei voida suoraan vertailla, koska esim. polttoaineen kosteus- ja hiilipitoisuuksissa eroja. Joitain eroja laitosten kesken on kuitenkin mahdollista ja tarpeellista selventää. (Kuske ym. 2008)

Saaduista tuloksista nähdään, että talteenotto huonontaa merkittävästi laitoksen hyötysuhdetta. Keskimääräinen hyötysuhteen alenema on n. kymmenen prosenttiyksikköä. Maakaasua polttoaineenaan käyttävässä laitoksessa CO_2 :n talteenoton aiheuttamat energiahäviöt ovat merkittävästi pienemmät kuin hiiltä polttoaineenaan käyttävissä laitoksissa. Perinteinen ilman talteenottoa toimiva IGCC kuluttaa energiaa suunnilleen saman verran, kun mitä talteenotolla varustettua NGCC-laitos. Käytännössä tämä näennäinen taloudellinen etu kuitenkin tasoittuu maakaasun kalliimman hinnan takia.

Pienempi talteenottoaste tapauksessa viisi johtuu ns. high temperature winkler -kaasutuksesta, jolla ei päästä yhtä hyvään talteenottoasteeseen kuin tapauksissa kolme ja neljä. (Kuske ym. 2008)

Taulukossa 7 on eritelty vielä tarkemmin niiden osa-alueiden energiankulutusta, joihin CO_2:n talteenotto vaikuttaa.

Taulukko 7. CO_2:n talteenoton energian kulutus osa-alueittain. (Kuske ym. 2008)

Energian kulutus		Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4	Tapaus 5
Kaasutus/reform.	MW	12	35	1	13	39
Kaasun käsittely	MW	3	3	33	88	75
Kaasun jäähdytys	MW	20	19	18	19	18
Hapen tuotto	MW	75	48	58	96	48
Muut	MW	3	1	9	4	2
Kokonaiskulutus	MW	110	110	120	220	180

Suurin ero kulutuksessa talteenotolla toimivien ja ilman talteenottoa toimivien laitosten välillä on kaasun käsittelyssä. Tämä johtuu siitä, että talteenotolla varustetut laitokset vaativat sellaisia lisätoimenpiteitä kaasun käsittelylle, kuten CO:n muunto CO_2:ksi ja CO_2:n ja H_2:n erotus.

Kuten tuloksista nähdään, maakaasua käyttävässä talteenotolla varustetussa laitoksessa energiaa kuluu lähes puolet vähemmän talteenoton vaatimiin toimenpiteisiin kuin hiiltä käyttävissä laitoksissa. Oleellisimmat tähän vaikuttavat tekijät ovat kaasutuksen vaatima suurempi energian tarve reformointiin verrattuna, sekä hiilen kaasutuksessa syntyvän tuotekaasun suurempi puhdistustarve. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että hiili sisältää huomattavasti enemmän epäpuhtauksia kuin maakaasu. Kivihiilen kaasutus vaatii myös tulosten mukaan happea selkeästi kuin enemmän kuin mitä ruskohiilen kaasutus tai maakaasun reformointi, mikä ilmenee suurimpana hapen valmistuksen tehontarpeena.

Lisäksi suoritettiin vertailua perinteisiin voimalaitoksiin, joissa ei ole hiilidioksidin talteenottoa. Vertailulaitoksina käytettiin kolmea eri voimalaitosta, jotka olivat

- 1000 MW:n ruskohiiltä polttoaineenaan käyttävä pölypolttolaitos
- 600 MW:n bitumihiiltä käyttävä pölypolttolaitos
- 393 MW:n maakaasua käyttävä NGCC-laitos

(Public summary report of ENCAP deliverable D.1.2.4, 2008)

Taulukossa 8 on esitetty osa saaduista tuloksista.

Taulukko 8. Tunnuslukujen vertailua eri laitostyyppien kesken. (Public summary report of ENCAP deliverable D.1.2.4, 2008)

Nettoteho		1000MW PP	IGCC talteenottolla	393 MW NGCC	NGCC talteenotolla	600MW PP	IGCC talteenotolla
Tuotettu teho	MW	920	717	385	755	575	737
Polttoaine	-	Ruskohiili	Ruskohiili	Maakaasu	Maakaasu	Bitumihiili	Bitumihiili
Sähköntuotanto hyötysuhde	%	49	41	57	41	45	36
CO_2 -päästöt	g/kWh	810	150	360	38	770	81
CO_2 talteenottoaste	%	-	82	-	90	-	90
Pääomakustannus	e/MWh	17	23	7	10	13	22
Käyttö ja kunnossapito	e/MWh	5	9	4	4	5	9
Polttoainekustannus	e/MWh	8	10	22	31	13	16
Kokonaiskustannus	e/MWh	30	42	33	45	31	47
Kustannusten suhde (talteenotto laitos /	%	-	140	-	140	-	150

vertailulaitos)							
CO_2 -talteenotto kustannus	EUR/t		18		25		36

Tulokset ovat keskiarvoja, ja kustannuksissa tapahtuisi suuriakin muutoksia jos käytettäisiin kaikkein negatiivisimpia tai optimistisempia arvioita.

Yhteistä kaikille tapauksille on se, että talteenotto kasvattaa kustannuksia ja huonontaa hyötysuhdetta, joka myös osaltaan lisää taas kustannuksia. Tuloksista on huomattavissa maakaasun korkean hinnan vaikutus kokonaishintaan. Toisaalta pääomakustannukset maakaasua käyttävässä laitoksessa ovat varsin pienet verrattuna hiiltä käyttäviin laitoksiin. Encapissa kaksi päätavoitetta toteutuivat osittain. 90%:n talteenottoaste saavutettiin osalla tekniikoista, ja niilläkin joilla ei saavutettu päästiin hyvin lähellä tätä. Toiseksi tavoitteeksi asetettu 50%:n säästö hiilidioksidin talteenoton kustannuksissa saavutettiin myös melko onnistuneesti, vaikkakin bitumihiiltä käyttävässä laitoksessa kustannuksissa jäätiin hieman tästä tavoitteesta. Saatujen tulosten perusteella on tarkoitus käynnistää uusia projekteja lähitulevaisuudessa.

11 TULEVAISUUDENNÄKYMIÄ

11.1 Talteenoton yleisnäkymät

Talteenottotekniikan kehitys ja testaus on ollut jo vuosia hyvässä vauhdissa, mutta paljon töitä on vielä tehtävänä. EU valmistelee laajan hiilidioksidin talteenottoon liittyvän projektin toteuttamista seuraavalla vuosikymmenellä. EU ehdottaa n. 10–12 suuren talteenotolla varustetun laitoksen rakentamista, joissa on kaikissa mukana koko hiilidioksidin talteenottoketju, eli talteenotto, kuljetus ja varastointi. Vuoteen 2015

mennessä on tavoitteena saada useita demoprojekteja käyntiin, jotta vuoteen 2020 mennessä olisi saatu laajamittaista kokemusta talteenotosta. (Hiilitieto, 2008)

Hiilidioksidin talteenottoa käyttävien laitosten oletetaan yleistyvän, kunhan vain tutkimukseen panostetaan tarpeeksi. Tämä vaatii useiden koelaitosten pystyttämistä, jotta kaikista kehitteillä olevista tekniikoista saadaan tarpeeksi pitkäaikaista käyttökokemusta. On arvioitu, että vuoden 2020 jälkeen Euroopassa rakennetusta uudesta fossiilisiin polttoaineisiin perustuvasta sähkötehosta voisi n.20-80GW olla päästötöntä. Nykyisen kehityksen perusteella vuoteen 2025 mennessä arvioidaan olevan maksimissaan 30 talteenotolla varustettua suuren mittakaavan laitosta. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

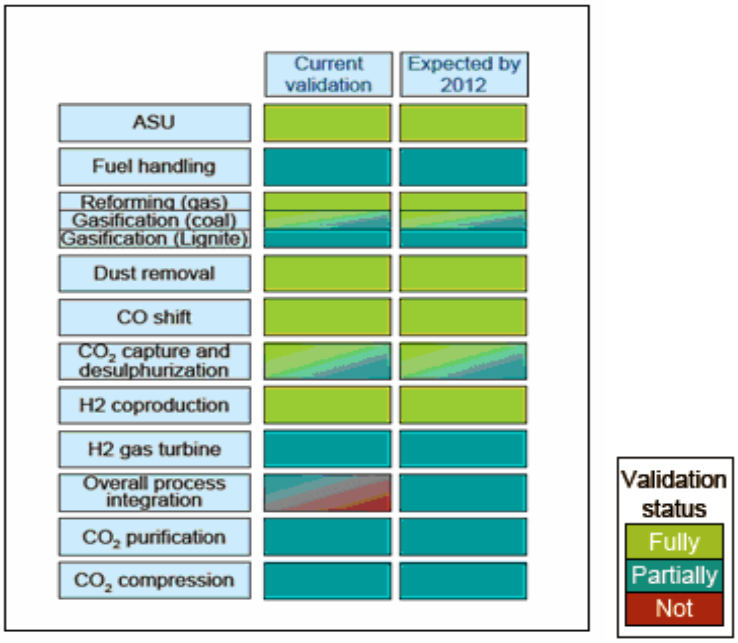
Tärkeää tulevaisuuden kannalta on talteenottotekniikan hintakehitys. Olisi pyrittävä siihen, että talteenottotekniikkaa käyttävät laitokset eivät häviäisi kilpailukyvyssä ilman talteenottoa toimiville laitoksille. Kaksi tärkeää mittapuuta ovat talteenotetun hiilidioksiditonnin hinta, sekä sähköntuotantokustannukset. Talteenotetun hiilidioksidin kustannuksiksi on arvioitu parhailla tekniikoilla jopa 15EUR/t taso vuoden 2020 jälkeen, joka olisi jo suhteellisen kilpailukykyinen taso, jos mittapuuna käytetään tämän hetken (maaliskuu 2009) päästöoikeuden hintaa (n.11EUR/t). Sähköntuotantokustannuksissa arvioidaan saavutettavan parhailla konsepteilla vuoteen 2020 mennessä n. 45-55e/MWh. Tämän hetken tuotantokustannukset laitoksissa, jotka toimivat ilman talteenottoa, ovat n.35-45EUR/MWh. Näistä luvuista voidaan päätellä, että talteenotto tekniikan tekeminen kannattavaksi taloudelliseksi vaihtoehdoksi ei ole mahdoton tehtävä, mutta tutkimukseen on pistettävä vielä paljon aikaa ja rahaa tämän tavoitteen saavuttamiseksi. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

Eri talteenottotekniikat kilpailevat edelleen keskenään, ja selkää ykkösvaihtoehtoa ei ole näkyvissä. Ennen polttoa tapahtuvalla talteenotolla on täydet mahdollisuudet nousta ykkösvaihtoehdoksi. Toisaalta tekniikat sisältävät paljon yhteisiäkin piirteitä, joten tekniikoiden asettaminen selkeään paremmuusjärjestykseen kehitysvaiheessa ei ole

järkevää. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

11.2 Ennen polttoa tapahtuvan talteenoton näkymät

Alla olevassa kuvassa 25 on esitetty eri osa-alueiden kehitysvaihe ennen polttoa tapahtuvassa talteenotossa nyt ja vuonna 2012.



Kuva 25. Ennen polttoa tapahtuvan talteenoton eri osa-alueiden kehitystilanne nyt ja vuonna 2012. (CO2 Capture and Storage (CCS) - Matrix of Technologies, 2008)

Kuvassa 25 näkyvä “validation status” kertoo kunkin osa-alueen kehitysvaiheen. Eri kehitysvaiheiden selitykset:

Fully: Laajempaa kaupallista kokemusta

Partially: Valmis isoon demoprojektiin

Not: Ei testattu / vain pienen mittakaavan testausta

Kuten kuvasta 25 nähdään, moni osa-alue on hyvä mallilla, mutta kehitystä tarvitaan tekniikoiden optimoimiseksi. Kaikilla osa-alueilla on saavutettu toimiva kokonaisuus, mutta kustannusten, hyötysuhteen ja luotettavuuden maksimoimiseksi kehitetään olemassa olevia tekniikoita ja materiaaleja jatkuvasti.

Ennen talteenottoa tapahtuvassa talteenotossa suurimmat haasteet ovat seuraavilla osa-alueilla

-kaasutus/reformointi
-kaasuturbiini
-energiahäviöt CO:n muuntoreaktiossa ja CO_2 :n talteenotossa
-prosessi-integrointi

Kaasutus/reformointi saadaan toteutettua nykyisilläkin menetelmillä varsin onnistuneesti, mutta erilaisia variaatioita sen toteuttamiseen on monia, ja selkeää ykkösvaihtoehtoa haetaan vielä. Kaasuturbiini on yksi avainasioista kun halutaan parantaa laitoksen hyötysuhdetta. Vetypitoisen kaasun poltto vaatii kaasuturbiinilta uusia ominaisuuksia, ja näiden ominaisuuksien saavuttamiseksi on vielä tehtävä töitä. Hiilimonoksidin muunto hiilidioksidisi ja hiilidioksidin talteenotto saadaan toteutettua, ja hyvään puhtausasteeseen päästään niin vedyn kuin hiilidioksidin osalta, mutta energiankulutus näissä prosesseissa on vielä toistaiseksi liian suurta. Suurin haaste on ehkä kuitenkin toimivan laitoskokonaisuuden luominen, jossa kaikki nämä osa-alueet on yhdistetty yhdeksi optimoiduksi laitoskokonaisuudeksi, jossa saadaan tuotettua sähköä luotettavasti kilpailukykyiseen hintaan, ja siinä sivussa otettua hiilidioksidi rutiininomaisesti talteen. (ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants, 2006)

12 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli työn nimen mukaisesti antaa yleiskatsaus ennen polttoa tapahtuvasta hiilidioksidin talteenotosta ja tätä tekniikkaa käyttävistä laitoksista. Lisäksi tarkasteltiin myös kustannuspuolta, laitosten suorituskykyä ja alan tämän hetkistä tutkimusta.

Tiivistettynä työn tuloksista voisi sanoa, että talteenotolle on kysyntää ja tekniikka on saatu toimimaan, mutta kaikissa osa-alueissa ja kokonaisuudessa on vielä hiomista. Nykyisellään talteenotto tulee vielä liian kalliiksi, mutta on arveltu, että merkittäviin säästöihin on mahdollisuus. Talteenotossa tarvittava tekniikka on saatu toimimaan suhteellisen luotettavasti, kuten esim. Encap-projektista voidaan päätellä. Tutkimusta asiaan liittyen tehdään paljon koko ajan enenevissä määrin, ja lähitulevaisuudessa onkin tarkoitus käynnistää mittavia projekteja asiaan liittyen. Lisää tutkimusta ja koelaitoksia tarvitaan, jotta saataisiin pitkäaikaista kokemusta tekniikasta.

Tiivistettynä hiilidioksidin talteenotto ennen polttoa koostuu kaasutuksesta/reformoinnista, tämän tuloksena syntyvän kaasun käsittelystä jotta talteenotto olisi mahdollista, hiilidioksidin erotuksesta, kompressoinnista ja siirrosta jatkotoimenpiteitä varten. Kaasu- ja höyrykiertoihin hiilidioksidin talteenotolla ei periaatteessa ole kaasuturbiinia lukuun ottamatta paljoakaan vaikutusta. Kunkin osa-alueen toteuttamiseen on useita vaihtoehtoja, mutta tällä hetkellä ei ole vielä täyttä selvyyttä näiden vaihtoehtojen paremmuusjärjestyksestä.

Hiilidioksidin talteenotto on iso energian kuluttuja. Ilman talteenottoa toimivaan laitokseen verrattuna huomattavasti suurempi osa laitoksen tuottamasta energiasta kuluu laitoksen omaan käyttöön. Tämä on taas asia, joka vaikuttaa suoraan kustannuksiin, ja kustannuskysymys on oleellinen asia tekniikan yleistymisen kannalta. Optimistisimpien arvioiden mukaan kustannuksissa on arveltu saavutettavan taso 15EUR per talteenotettu hiilidioksidi tonni vuoteen 2020 mennessä. Nykyisen hintatason perusteella päästöoikeuden osto (n.11EUR/t, maaliskuu 2009) tulee tällöin edelleen halvemmaksi. Toisaalta

päästöoikeuden hinta on vaihdellut rajusti suuntaan jos toiseenkin, joten tämän perusteella ei kannata tehdä liikaa johtopäätöksiä. Minkäänlaisten hiilidioksidin talteenottoa suosivien pitkänlinjan päätösten tekeminen ei vielä tällä hetkellä ole kuitenkaan järkevää, sillä talteenottotekniikoissa on vielä paljon tutkittavaa. Sitten kun talteenoton lopullinen hintataso alkaa hahmottua, päättäjien on aika miettiä millä tavoin hiilidioksidin talteenotosta saataisiin taloudellisestikin houkutteleva vaihtoehto.

Ennen polttoa tapahtuvan talteenoton suhdetta muihin talteenottotekniikoihin ei tässä työssä paljoakaan käsitelty, mutta tästäkin asiasta lienee hyvä mainita muutama sana näin lopuksi. Tällä hetkellä vaihtoehdot ovat talteenotto ennen polttoa, happipoltto ja polton jälkeinen talteenotto, eikä selkeää ykkösvaihtoa tästä kolmikosta ole selvillä. Tekniikoissa on eroja muun muassa talteenottoasteessa, investointi- ja talteenottokustannuksissa ja hyötysuhteessa. Tekniikan valinta lienee loppujen lopuksi hyvin tapauskohtaista. Yhtenä ratkaisevana tekijänä on mikä asetetaan etusijalla päätöstä tehdessä. Ratkaisevaksi tekijäksi voi nousta mm. investointikustannukset, talteenottokustannukset, talteenottoaste tai laitostyyppi. Myös sillä on merkitystä rakennetaanko talteenotto vanhan laitoksen yhteyteen vaan täysin uuteen laitokseen. Unohtaa ei pidä myöskään polttoaineen tärkeää merkitystä.

Hiilidioksidin talteenotolla pyritään hiilidioksidi päästöjen vähentämiseen, ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisellä pyritään ilmastonmuutoksen hillitsemiseen. Energiateollisuus on suuri hiilidioksidipäästöjen tuottaja, eikä nykyistä energiantuotantokapasiteettia pysty millään korvaamaan hetkessä päästöttömillä muodoilla. Tästä voidaan näin lopuksi vetää se johtopäätös, että niin kauan kuin huoli ilmastonmuutoksesta jatkuu, jatkuu myös talteenottotekniikoiden kehitys, ja tämä kehitys näyttää arvioiden mukaan lupaavalta.

LÄHDELUETTELO

Cachet CO2. Hydrogen membrane reactors for pre combustion CO2 capture. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.6.2009]. 2007. Saatavissa: http://www.cachetco2.eu/publications/pps/SP1-WP3%20Membranes%20for%20capture%20(part%201%20ECN).ppt#264,8,H2-Membrane Reactor_Conceptual process design

CO2 Capture and Storage (CCS) - Matrix of Technologies. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.4.2009]. 2008. ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants. Saatavissa: http://www.zero-emissionplatform.eu/website/docs/ETP%20ZEP/ZEP%20Technology%20Matrix.pdf

CO2 CRC. Pre-combustion demonstration. [CO2 CRC:n www-sivuilla]. Päivitetty 3.4.09. Saatavissa: **http://www.co2crc.com.au/research/demo_precomb_solvent.html**

Encapco, Enhanced Capture of CO2. Pre-Combustion Decarbonisation Technologies. [Encap:in www-sivuilla]. [Viitattu 7.4.2009]. Saatavissa: http://www.encapco2.org/sp2.htm

Encapco, Enchanced capture of CO2. The Encap Project. [Encapin www-sivuilla]. 2003. [Viitattu 8.4.2009]. Saatavissa: http://www.encapco2.org/

Euroopan komissio. Energia-, teknologia- ja ilmastopolitiikan maailmannäkymät vuoteen 2030. [Euroopan komission www-sivuilla]. [Viitattu 7.4.2009]. Saatavissa: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_fi.pdf

Get Energy Smart. Hydrogen Production – Steam Methane Reforming (SMR). [Get energy smartin www-sivuilla]. [Viitattu 7.4.2009]. Saatavissa: http://www.getenergysmart.org/Files/HydrogenEducation/6HydrogenProductionSteamMethaneReforming.pdf

Grasys. Cryogenic oxygen plants. [Grasyksen www-sivuilla]. Saatavissa: http://www.grasys.com/products/gas/oxygen/cryogenic/

Hiilitieto. CCS Fortumissa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.4.2009]. 2008. Saatavissa: http://www.hiilitieto.fi/File/4bc40872-00d5-467b-938d-70abb4600e03/CCS+Fortumissa,+esitys+seminaarissa+27.2.2008.pdf

IEA Greenhouse Gas R&D Programme. R, D & D Project database. [Verkkodokumentti]. 2006. [Viitattu 4.6.2009].
Saatavissa: http://www.co2captureandstorage.info/WorldMapCCSDetail.ppt

In Genuity Creations. Hydrogen. [In Genuity creationsin www-sivuilla]. 2008. [Viitattu 7.4.2009]. Saatavissa: http://ingenuitycreations.com/

IPCC, Intergovernmental panel on climate change. 2005. Carbon dioxide capture and storage. Erikoisraportti.. New York. Cambridge University Press. ISBN-13 978-0-521-8664 3-9.Saatavissa: http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/SRCCS-final/IPCCSpecialReportonCarbondioxideCaptureandStorage.htm

Kentucky department for energy development & independence. CO2Capture for Power Plant Applications. [verkkodokumentti]. 2008. [Viitattu 7.4.2009]. Saatavissa: **http://www.energy.ky.gov/NR/rdonlyres/A13ABAA7-2D89-4777-96C1-2877CDC86FF9/0/Neatherypresentation.pdf**

Kuske ym.. Public summary report of ENCAP deliverable D.2.5.1 Preliminary documentation of complete plant concepts for all cases. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.6.2009]. 2008. Saatavissa: http://www.encapco2.org/publications/D_2_5_1_SummaryReport.pdf

Lenze ja Carroni. Public summary report of ENCAP deliverable D2.3.3 Report on limits of current burners using H2-rich fuel mixtures. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.4.2009]. 2008. Saatavissa: http://www.encapco2.org/publications/SP2_2_3_3_SummaryReport.pdf

Merichem. Cleaning Up Gasification Syngas. [Merichemin www-sivuilla]. Saatavissa: http://www.gtp-merichem.com/news/releases/syngas.php

Public summary report of ENCAP deliverable D.1.2.4. Report on power systems evaluation and benchmarking. [Verkkodokumentti]. 2008. [Viitattu 8.4.2009] Saatavissa: http://www.encapco2.org/publications/D_1_2_4_SummaryReport.pdf

Raiko, Risto; Jaakko Saastamoinen; Hupa, Mikko; Kurki-Suonio, Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. Toinen täydennetty painos. Helsinki. Teknillistieteelliset akatemiat. 750s. ISBN 951-666-604-3.

Toshiba. Power-generation systems. [Toshiban www-sivuilla]. Saatavissa: http://www3.toshiba.co.jp/power/english/thermal/products/power_gene/gensys4.htm

Tekniikka ja talous. Ilmastonmuutos. [Tekniikka ja talous lehden www-sivuilla]. 2009. Päivitetty 5.4.2009. [Viitattu 7.4.2009]. Saatavissa: http://www.tekniikkatalous.fi/energia/ilmastonmuutos/article267599.ece

Ulla-Maija Mroueh & Torsti Loikkanen. 1998. Tulevaisuuden kaupunkivoimala. Espoo. VTT, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 98s. ISBN 951–38–5303–9. Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1907.pdf

Universal Industrial Plants Mfg. Co. General Basic Principles for the Production of Oxygen from Atmospheric Air. [Universal Indsturial Plantsin www-sivuilla]. Saatavissa: http://www.air-separation-plants.com/oxygen-generating-plants.html

UOPa. 30 Years of PSA Technology for Hydrogen Purification. [Verkkodokumentti]. 1998. [Viitattu 4.6.2009]. Saatavissa: **http://www.uop.com/objects/30yrspsatechhydpurif.pdf**

UOPb. PSA-animation. [UOP:n www-sivuilla]. 2001. [Viitattu 6.4.2009]. Saatavissa: **http://www.uop.com/objects/psaanimation.html**

Voimalaitosoppi. Kombilaitokset. [Yliopiston intranetissä]. 2008. Saatavissa: Yliopiston intranetissä, vaatii salasanan.

WG1 Power Plant and Carbon Dioxide Capture. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.4.2009]. 2006. ETP ZEP, European technology platform for zero emission fuel power plants. Saatavissa: http://www.zero-emissionplatform.eu/website/library/index.html#etpzeppublications

Wong, Sam; Bioletti, Rob, Carbon Dioxide Separation Technologies. [Verkkodokumentti]. [viitattu 15.7.2007]. 2002. Saatavissa: http://www.aidis.org.br/span/ftp/CARBON%20DIOXIDE%20SEPARATION%20TECHNOLOGIES.pdf

YLE. Hiilidioksidin päästöoikeuksia saa nyt halvalla. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 17.3 2009. [Viitattu 4.6.2009]. Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/ulkomaat/2009/03/hiilidioksidin_paastooikeuksia_saa_nyt_halvalla_618195.html

Ympäristöministeriö. Pitkän aikavälin energia- ja ilmastostrategia. [Verkkodokumentti]. 2008. [Viitattu 6.4.2009]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=86191&lan=FI